

ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群往復探査と深宇宙クルージング観測 The Solar Power Sail for Round Trip Exploration to Jupiter Trojans and Deep Space Cruising Observation

矢野 創^{1*}; 中村 良介²; 松浦 周二¹; 関根 康人³; 豊田 岐聡⁴; 青木 順⁴; 吉田 二美⁵; 高遠 徳尚⁵; 木下 大輔⁶; 米徳 大輔⁷; 吉川 真¹; 森 治¹; 太陽系小天体探査WG T .¹; ソーラー電力セイルWG .¹
YANO, Hajime^{1*}; NAKAMURA, Ryosuke²; MATSUURA, Shuji¹; SEKINE, Yasuhito³; TOYODA, Michisato⁴; AOKI, Jun⁴; YOSHIDA, Fumi⁵; TAKATO, Naruhisa⁵; KINOSHITA, Daisuke⁶; YONETOKU, Daisuke⁷; YOSHIKAWA, Makoto¹; MORI, Osamu¹; SOLAR SYSTEM SMALL BODY EXPLORATION WGT, .¹; SOLAR POWER SAIL WG, .¹

¹ 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所, ² 産業技術総合研究所, ³ 東京大学, ⁴ 大阪大学, ⁵ 国立天文台, ⁶ 台湾中央大学, ⁷ 金沢大学

¹JAXA/ISAS, ²AIST, ³The University of Tokyo, ⁴Osaka University, ⁵NAOJ, ⁶Taiwan Central University, ⁷Kanazawa University

Since 2002, the Solar Power Sail WG has been studying a mission design of Japan's first outer planet region exploration, by demonstrating the solar power sail technology, and it is bound to Jupiter Trojan asteroids, which may hold fundamental clues of the Solar System formation and revolution discussed by two competing hypotheses between the classic model and the planetary migration model. The former suggests that Trojan asteroids are mainly survivors of building blocks of the Jupiter system, while the latter claims that they must be intruders from outer regions after the planetary migration of gas planets settled.

After Jupiter flyby, the spacecraft will reach to a candidate Trojan asteroid, hopefully being larger than a few 10's of km in size. Both global remote observation and deployment of an autonomous lander will be conducted. On the surface of the Trojan asteroid, sampling will be attempted for in-situ TOF mass spectrometry and passing the sample container to the mothership for a possible sample return option.

Also during the cruising operation, "dust free" astronomical platform beyond the cocoon of the zodiacal light formed by the main asteroid belt for the benefit of infrared astronomy searching for the first generation light of the Universe, let alone continuous observation of the zodiacal light structure of the Solar System. Extremely long baseline with the observation from the Earth, gamma-ray burst observation can identify their sources.

This presentation discusses major scientific objectives of an exploration mission to Jupiter Trojans for the first time in the history, its mission design and spacecraft system using solar power sail, a hybrid propulsion system of electric propulsion and photon sail, which inherited from the IKAROS deep space solar sail spacecraft, together with major engineering challenges, in-situ observation instruments and operational options including landing and sample return from the surface of a Trojan asteroid.

キーワード: ソーラー電力セイル, 木星トロヤ群小惑星, 深宇宙探査, 深宇宙天文学, 黄道光, サンプルリターン

Keywords: Solar Power Sail, Jupiter Trojans, Deep Space Exploration, Deep Space Astronomy, Zodiacal Light, Sample Return

EUROPA CLIPPER MISSION CONCEPT OVERVIEW EUROPA CLIPPER MISSION CONCEPT OVERVIEW

PAPPALARDO Robert¹ ; GOLDSTEIN Barry¹ ; MAGNER Thomas² ; PROCKTER Louise² ; SENSKE David¹ ; PACZKOWSKI Brian¹ ; COOKE Brian¹ ; Vance Steven^{1*} ; PATTERSON G. Wesley²
PAPPALARDO, Robert¹ ; GOLDSTEIN, Barry¹ ; MAGNER, Thomas² ; PROCKTER, Louise² ; SENSKE, David¹ ; PACZKOWSKI, Brian¹ ; COOKE, Brian¹ ; VANCE, Steven^{1*} ; PATTERSON, G. wesley²

¹Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, ²The Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory, Laurel, MD, 20723

¹Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, ²The Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory, Laurel, MD, 20723

A NASA-appointed Science Definition Team (SDT) recently considered options for a future strategic mission to Europa, with the stated science goal: Explore Europa to investigate its habitability. The team worked closely with a technical team from the Jet Propulsion Laboratory (JPL) and the Applied Physics Laboratory (APL). Together, the group considered several mission options, which were fully technically developed, then costed and reviewed by technical review boards and planetary science community groups. Study results strongly favored an architecture consisting of a spacecraft in Jupiter orbit, making many close flybys of Europa, and concentrating on remote sensing to explore the moon. The resulting nominal mission design is innovative for its use of gravitational perturbations of the spacecraft trajectory to permit flybys at a wide variety of latitudes and longitudes. The design enables globally distributed regional coverage of the moon's surface, nominally with 45 close flybys at altitudes from 25 to 100 km. We will present the science and reconnaissance goals and objectives, a mission design overview, and the notional spacecraft for this concept, which has become known as the Europa Clipper. The Europa Clipper concept provides a cost-efficient means to explore Europa and investigate its habitability, through understanding the satellite's ice and ocean, composition, and geology. The set of investigations derived from these science objectives traces to a notional payload for science, consisting of: Ice Penetrating Radar (for sounding of ice-water interfaces within and beneath the ice shell), Topographical Imager (for stereo imaging of the surface), ShortWave Infrared Spectrometer (for surface composition), Neutral Mass Spectrometer (for atmospheric composition), Magnetometer and Langmuir Probes (for inferring the satellite's induction field to characterize an ocean), and Gravity Science (to confirm an ocean). Among the many science investigations addressed, Europa Clipper could potentially characterize plumes linked to Europa's internal lakes or ocean. The mission would also include the capability to perform reconnaissance for a future lander, with the Reconnaissance goal: *Characterize safe and scientifically compelling sites for a future lander mission to Europa*. To accomplish these reconnaissance objectives and the investigations that flow from them, principally to address issues of landing site safety, two additional instruments would be included in the notional payload: a Reconnaissance Camera (for high-resolution imaging) and a Thermal Imager (to characterize the surface through its thermal properties). These instruments, in tandem with the notional payload for science, could assess the science value of potential landing sites. This notional payload serves as a proof-of-concept for the Europa Clipper during its formulation stage. The actual payload would be chosen through a NASA Announcement of Opportunity. If NASA were to proceed with the mission, it could be possible to launch early in the coming decade, on an Atlas V or the Space Launch System (SLS).

キーワード: Europa, Icy Worlds, Astrobiology, Europa Clipper, Missions, Planetary Science
Keywords: Europa, Icy Worlds, Astrobiology, Europa Clipper, Missions, Planetary Science

Investigation of the Galilean Moons with the Ganymede Laser Altimeter (GALA) Investigation of the Galilean Moons with the Ganymede Laser Altimeter (GALA)

HUSSMANN, Hauke^{1*}; LINGENAUER, Kay¹; MICHAELIS, Harald¹; KOBAYASHI, Masanori²; THOMAS, Nicolas³; LARA, Luisa M.⁴; ARAKI, Hiroshi⁵; BEHNKE, Thomas¹; GWINNER, Klaus¹; KIMURA, Jun⁶; NAMIKI, Nori²; NODA, Hiroto⁵; OBERST, Juergen¹; ROATSCH, Thomas¹; RODRIGO, Rafael⁴; SASAKI, Sho⁷; SEIFERLIN, Karsten³; SPOHN, Tilman¹; BARNOUIN, Olivier⁸; BREUER, Doris¹; CASOTTO, Stefano⁹; CASTRO, Jose⁴; CHOBLET, Gael¹⁰; CHRISTENSEN, Ulrich¹¹; FERRAZ-MELLO, Sylvio¹²; GIESE, Bernd¹; KALLENBACH, Reinald¹¹; KURITA, Kei¹³; LAINEY, Valery¹⁴; LICHOPOL, Alexander¹; LOETZKE, Horst-georg¹; LUPOVKA, Valery¹⁵; MOORE, William B.¹⁶; RODRIGUEZ, Adrian⁶; SANTOVITO, Maria rosaria¹⁷; SCHREIBER, Ulrich¹⁸; SCHROEDTER, Rolf¹; SOHL, Frank¹; DEL TOGNO, Simone¹; VERMEERSEN, Bert¹⁹; WIECZOREK, Mark²⁰; YSEBOODT, Marie²¹

HUSSMANN, Hauke^{1*}; LINGENAUER, Kay¹; MICHAELIS, Harald¹; KOBAYASHI, Masanori²; THOMAS, Nicolas³; LARA, Luisa M.⁴; ARAKI, Hiroshi⁵; BEHNKE, Thomas¹; GWINNER, Klaus¹; KIMURA, Jun⁶; NAMIKI, Nori²; NODA, Hiroto⁵; OBERST, Juergen¹; ROATSCH, Thomas¹; RODRIGO, Rafael⁴; SASAKI, Sho⁷; SEIFERLIN, Karsten³; SPOHN, Tilman¹; BARNOUIN, Olivier⁸; BREUER, Doris¹; CASOTTO, Stefano⁹; CASTRO, Jose⁴; CHOBLET, Gael¹⁰; CHRISTENSEN, Ulrich¹¹; FERRAZ-MELLO, Sylvio¹²; GIESE, Bernd¹; KALLENBACH, Reinald¹¹; KURITA, Kei¹³; LAINEY, Valery¹⁴; LICHOPOL, Alexander¹; LOETZKE, Horst-georg¹; LUPOVKA, Valery¹⁵; MOORE, William B.¹⁶; RODRIGUEZ, Adrian⁶; SANTOVITO, Maria rosaria¹⁷; SCHREIBER, Ulrich¹⁸; SCHROEDTER, Rolf¹; SOHL, Frank¹; DEL TOGNO, Simone¹; VERMEERSEN, Bert¹⁹; WIECZOREK, Mark²⁰; YSEBOODT, Marie²¹

¹DLR Institute of Planetary Research, Berlin, Germany, ²Chiba Institute of Technology, Planetary Exploration Research Center, Chiba, Japan, ³Physics Institute, University of Bern, Switzerland, ⁴CSIC, Instituto de Astrofísica de Andalucía, Granada, Spain, ⁵National Astronomical Observatory of Japan, Mizusawa, Japan, ⁶Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, Japan, ⁷Osaka University, Toyonaka Japan, ⁸Space Dept., The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, MD, USA, ⁹University of Padua, Dept. of Physics and Astronomy and Center for Space Studies, Padova, Italy, ¹⁰Laboratoire de Planetologie et Geodynamique de Nantes, France, ¹¹Max Planck Institute for Solar System Research, Katlenburg-Lindau, Germany, ¹²Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Science, Sao Paulo, Brasil, ¹³University of Tokyo, Earthquake Research Institute, Tokyo, ¹⁴IMCCE-Observatoire de Paris, France, ¹⁵Moscow State University of Geodesy and Cartography, (MIIGAiK), Russia, ¹⁶Hampton University, National Institute of Aerospace, USA, ¹⁷CO.R.I.S.T.A. Consortium of Research on Advanced Remote Sensing Systems, Napoli, Italy, ¹⁸Technische Universität München, Fundamentalstation Wettzell, Germany, ¹⁹Aerodynamics & Space Missions, Faculty of Aerospace Engineering, TU Delft, Netherlands, ²⁰Institut de Physique du Globe de Paris, France, ²¹Royal Observatory of Belgium, Brussels, Belgium

¹DLR Institute of Planetary Research, Berlin, Germany, ²Chiba Institute of Technology, Planetary Exploration Research Center, Chiba, Japan, ³Physics Institute, University of Bern, Switzerland, ⁴CSIC, Instituto de Astrofísica de Andalucía, Granada, Spain, ⁵National Astronomical Observatory of Japan, Mizusawa, Japan, ⁶Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, Japan, ⁷Osaka University, Toyonaka Japan, ⁸Space Dept., The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, MD, USA, ⁹University of Padua, Dept. of Physics and Astronomy and Center for Space Studies, Padova, Italy, ¹⁰Laboratoire de Planetologie et Geodynamique de Nantes, France, ¹¹Max Planck Institute for Solar System Research, Katlenburg-Lindau, Germany, ¹²Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Science, Sao Paulo, Brasil, ¹³University of Tokyo, Earthquake Research Institute, Tokyo, ¹⁴IMCCE-Observatoire de Paris, France, ¹⁵Moscow State University of Geodesy and Cartography, (MIIGAiK), Russia, ¹⁶Hampton University, National Institute of Aerospace, USA, ¹⁷CO.R.I.S.T.A. Consortium of Research on Advanced Remote Sensing Systems, Napoli, Italy, ¹⁸Technische Universität München, Fundamentalstation Wettzell, Germany, ¹⁹Aerodynamics & Space Missions, Faculty of Aerospace Engineering, TU Delft, Netherlands, ²⁰Institut de Physique du Globe de Paris, France, ²¹Royal Observatory of Belgium, Brussels, Belgium

The icy moons of Jupiter ? Europa, Ganymede, and Callisto ? are believed to contain global subsurface water oceans underneath their icy crusts. The possibility is intriguing that these large liquid water oceans represent "habitable" environments. Investigation of the latter is a major objective of ESA's Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE) mission. The Ganymede Laser Altimeter (GALA) is one of the instruments focusing on aspects related to the presence and characterization of subsurface water oceans by measuring Ganymede's tidal deformation. GALA will further contribute (a) to the exploration of the surface morphology and physical properties of Ganymede, Europa and Callisto, (b) to determination of their interior structures from a combination of shape, topography and gravitational field data, and (c) to understanding the satellites formation and evolution especially with respect to subsurface water oceans. GALA will investigate the surface and topography of Ganymede in particular. Topography data is needed to account for the effects of topographic heights on the gravity field and to account for near surface

PPS01-03

会場:418

時間:4月30日 14:55-15:10

mass distribution anomalies above the reference figure; to support geological studies, e.g. to identify and characterize tectonic and cryo-volcanic regions on the icy moons and to identify periodic variations of Ganymede's shape due to tides.

Investigations by GALA will furthermore contribute to determine the orientation and rotational state of Ganymede and to study surface characteristics (roughness, slopes, and albedo) on Ganymede, Europa, and Callisto.

The instrument can be operated from ranges smaller than about 1000 to 1300 km (depending on the different albedo values and surface slopes of Europa, Ganymede and Callisto) during flybys and orbital pericenter passages. The main phases for acquiring data at Ganymede are the final circular orbit phases, where continuous operations are possible from altitudes around 500 km and 200 km, respectively.

Here, we will give an overview on the GALA experiment focusing on its scientific goals and performance.

キーワード: Laser altimetry, Satellites of Jupiter, Ganymede, Tides

Keywords: Laser altimetry, Satellites of Jupiter, Ganymede, Tides

Longevity of an internal ocean in Ganymede Longevity of an internal ocean in Ganymede

木村 淳^{1*}; Vance Steven²; Hussmann Hauke³; 栗田 敬⁴

KIMURA, Jun^{1*}; VANCE, Steven²; HUSSMANN, Hauke³; KURITA, Kei⁴

¹ 東京工業大学地球生命研究所, ² ジェット推進研究所, ³ ドイツ航空宇宙研究所, ⁴ 東京大学地震研究所

¹Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, ²Jet Propulsion Laboratory, ³DLR Institute of Planetary Research,

⁴Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

The outer solar system may provide a potential habitat of extra-terrestrial life. Most moons orbiting planets in the outer Solar System, at orbits beyond the snow line, such as Jupiter or Saturn, are covered with water ice and are referred to as "icy moons". Galileo's detection of induced magnetic fields combined with imaged surface characteristics and thermal equilibrium modeling of the moons, support that the Jovian icy moons Europa and Ganymede, and possibly Callisto, may harbor liquid water oceans underneath the icy crusts. The presence of internal oceans in the icy moons means that a deep habitat different from Earth's biosphere may exist, located beyond the "habitable zone" of the Sun. Evidence for oceans is not definitive, however, and awaits confirmation measurements. Also, the depth and composition of the oceans remain unclear, as do their variability through time.

Here we focus on Ganymede, the largest moon in the Solar System and the primary target of a new mission to the Jupiter system, the Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE), which is planned by the European Space Agency (ESA). The bulk density of Ganymede, 1.936 g/cc, indicates a composition of approximately equal amounts of rocky material and water. Previous measurements of Ganymede's gravitational field and intrinsic magnetic field by the Galileo orbiter suggest that its interior is completely differentiated into three layers, a convecting metallic core at the center, a rocky mantle surrounding the core, and an outermost water-ice shell. The water-ice layer in total has a thickness of 800-1000 km. A layer of melted, salty water that lies beneath the icy crust would be the best way to explain the signal of magnetic induction.

To investigate the lifetime of an ocean (thickness change through time) assumed to be initially in an entirely liquid state, we performed numerical simulations for the internal thermal evolution using a spherically symmetric model for the convective and conductive heat transfer with radial dependence of viscosity, heat source distribution, and other material properties. Here we take into account the energy due to decay of long-lived radioactive elements and also evaluate the effect of tidal heating. If the ocean were composed of pure water, a primordial ocean would have disappeared (completely solidified) within 1 Gyr even if tidal heating for the current orbital state were included. Consistent with previous predictions, this result indicates that significant tidal heating in the past, or strong antifreeze components (e.g., salts or ammonia),

are needed if the presence of the internal ocean in Ganymede would be confirmed from future JUICE observations. We numerically investigate their effect on the lifetime of the ocean.

Keywords: satellite, evolution, ocean, habitability, ice, Ganymede

冥王星における衝突盆地の緩和: 内部海存在への示唆 Impact basin relaxation on Pluto: Implications for the presence of a subsurface ocean

鎌田 俊一^{1*}; Francis Nimmo²
KAMATA, Shunichi^{1*}; NIMMO, Francis²

¹北海道大学理学研究院, ²カリフォルニア大学サンタクルーズ校
¹Hokkaido University, ²UC Santa Cruz

Large-scale topographies, such as impact basins, on solid planetary bodies deform in geologically long timescales. The degree of deformation depends mainly on the viscosity, and the viscosity is strongly controlled by temperature. Consequently, viscous relaxation of large impact basins has been studied to investigate the thermal evolution of terrestrial planets as well as that of icy satellites of giant planets [e.g., 1-4].

Pluto, an icy dwarf planet, is likely to possess large impact basins. In this study, we investigate long-term viscoelastic deformation of impact basins on Pluto which can be compared with forthcoming observational data from New Horizons, the first Pluto explorer.

Although little is known for Pluto, its interior is likely differentiated into a rocky core and an outer H₂O layer [e.g., 5]. The presence of a subsurface ocean, however, is highly uncertain. If the outer (solid) H₂O layer is convective, the radiogenic heat from the rocky core is efficiently transferred to the surface, and temperature of the H₂O layer can be lower than its melting temperature. On the other hand, if the outer H₂O layer is conductive, the heat from the core can melt the H₂O layer. The main controlling factor whether the H₂O layer is convective or conductive is the reference viscosity: the ice viscosity at its melting temperature [6]. In this study, we calculate viscoelastic deformation of impact basins assuming different viscosity profiles and examine the effect of the presence of a subsurface ocean on basin relaxation.

For the initial study, we use two time-independent viscosity profiles; one profile assumes a stiff top shell overlying a thick subsurface ocean, and the other assumes a completely solidified interior. The same viscosity profile in the shell is assumed.

Our results indicate that the instantaneous elastic response largely differ between the viscosity models. However, long-term relaxation does not differ much because it is controlled by the viscosity profile in the shell, which is identical in our calculations. Nevertheless, long-term relaxation strongly depends on the reference viscosity, the main controlling factor whether the shell is convective. Consequently, relaxation state of impact basins can be used to infer the reference viscosity as well as the presence of a subsurface ocean. This result would be applicable to icy satellites of Jupiter and Saturn.

Our next step is to use time-dependent viscosity profiles. To do so, we have modified our relaxation code to take into account the temporal change in the shell thickness. The results will be discussed.

[1] Kamata et al. JGR 118, 398-415, 2013. [2] Mohit and Phillips, GRL, 34, L21204, 2007. [3] Robuchon et al. Icarus 207, 959-971, 2010. [4] Solomon et al. JGR 87, 7763-7771, 1982. [5] McKinnon et al. in Pluto and Charon, pp. 295-343, 1997. [6] Robuchon and Nimmo, Icarus 214, 426-439, 2011.

キーワード: 衝突盆地, 緩和, 冥王星, 粘弾性
Keywords: Impact basin, Relaxation, Pluto, Viscoelasticity

サブミリ波観測で拓く氷天体の固体惑星科学：惑星形成と宇宙化学 Sub-millimeter observations of icy bodies toward understanding of planetary formation and cosmochemistry

関根 康人^{1*}; 笠井 康子²; 佐川 英夫²; 黒田 剛史³; 兒玉 賢哉¹; 堀 安範⁴; 生駒 大洋¹; 倉本 圭⁵; 坂本 尚義⁵
SEKINE, Yasuhito^{1*}; KASAI, Yasuko²; SAGAWA, Hideo²; KURODA, Takeshi³; KODAMA, Kenya¹; HORI, Yasunori⁴; IKOMA, Masahiro¹; KURAMOTO, Kiyoshi⁵; YURIMOTO, Hisayoshi⁵

¹ 東京大学, ²NICT, ³ 東北大学, ⁴ 国立天文台, ⁵ 北海道大学

¹University of Tokyo, ²NICT, ³Tohoku University, ⁴NAOJ, ⁵Hokkaido University

The present-day composition of regular icy satellites consists of combinations of initial conditions and subsequent evolution. These icy satellites are considered to have been formed in a circumplanetary disk associated with giant planet formation. Thus, icy satellites that are not geologically active, such as Callisto, would serve as solar system fossils, which may preserve the information of the protoplanetary disk and planetary formation. On the other hand, geologically active satellites, such as Europa and Enceladus, would provide particular geological processes and consequent products of geochemical reaction. Sub-millimeter observations are capable of providing unique isotopic and chemical compositions of gas molecules in atmospheres and plumes of the icy satellites. In this paper, we discuss key observational targets and their importance for planetary formation theory and geo/cosmochemistry, especially focusing on sub-millimeter observations of Galilean satellites by the Jupiter Icy moons Explorer mission, JUICE.

キーワード: サブミリ波観測, 氷衛星, 惑星形成, 宇宙化学

Keywords: sub-millimeter observation, icy satellite, planetary formation, cosmochemistry

周惑星ガス円盤中で形成する巨大氷衛星の原始大気 Proto-atmospheres on giant icy satellites forming within gaseous circum-planetary disks

三上 峻^{1*}; 倉本 圭¹
MIKAMI, Takashi^{1*}; KURAMOTO, Kiyoshi¹

¹ 北海道大学理学院宇宙理学専攻

¹Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

In spite of the great similarity in size and mean density, the giant icy satellites Ganymede, Callisto, and Titan have very different surface environments. In particular, only Titan holds a thick atmosphere dominated by N₂. Recent data of the Cassini spacecraft indicated that atmospheric N₂ is probably originated from other nitrogen-bearing species like NH₃. However, it still remains an open question when and how N₂ was generated. This is partly because the physical states of giant icy satellites have been poorly understood.

According to a widely-accepted theory of regular satellites formation, the giant icy satellites were formed in subnebulae with low temperature and low pressure taking a long accretion time. Some models assert that their surfaces were kept too cold to induce significant differentiation during accretion. However, these satellites may capture a significant amount of subnebula gas, which possibly forms proto-atmospheres along with gases volatilized from icy components. Such a hybrid-type proto-atmosphere may have significant blanketing effect.

Here, we numerically analyze the structure and effect of a hybrid-type proto-atmosphere. Our model atmosphere is hydrostatically connected with subnebula at the satellite Hill radius. It contains H₂ and He as nebula gas components, H₂O and NH₃ as volatilized ice components. The radiative-convective equilibrium structure is solved as a function of surface temperature. The subnebula conditions are given by Canup and Ward (2002), the temperatures are 150 K at Ganymede, 120 K at Callisto, and 50 K at Titan, and the corresponding subnebula pressures are varied over 0.1-10 Pa.

For all the boundary conditions, the proto-atmosphere is opaque due to water vapor, so that the outgoing thermal radiation (OTR) flux at top of the atmosphere is smaller than that of black body radiation without atmosphere when the surface temperature is higher than 273 K. When the surface temperature is lower, the OTR fluxes from the proto-atmospheres of Ganymede and Callisto are close to black-body radiation because these atmospheres have low surface pressure and are optically thin due to large scale height under high background temperature. On the other hand, the proto-atmosphere of Titan has another type of solution with the OTR fluxes significant lower than blackbody radiation under low surface temperature. This is due to the formation of optically thick atmosphere tightly bounded by gravity because of low background temperature.

These results imply that a warm proto-atmosphere near 200 K could be kept on Titan for a long time after the end of accretion. Our stability analysis suggests that the proto-atmospheres of Ganymede and Callisto were lost associated with the dissipation of the Jovian subnebula, but that of Titan survived after the dissipation of the Saturnian subnebula.

In the case, NH₃ vapor pressure would be kept high under the irradiation of the solar UV for a long time. The present atmospheric N₂ of Titan may be generated by photochemical reaction of NH₃ vapor in such a warm proto-atmosphere.

キーワード: 巨大氷衛星, 大気, 周惑星円盤

Keywords: Giant icy satellites, Atmosphere, Circum-planetary disks

木星と土星における雲形成過程の違い The difference of cloud formation process between Jupiter and Saturn.

高橋 康人^{1*}; はしもと じょーじ²; 石渡 正樹¹; 高橋 芳幸³; 大西 将徳³; 倉本 圭¹
TAKAHASHI, Yasuto^{1*}; HASHIMOTO, George²; ISHIWATARI, Masaki¹; TAKAHASHI, Yoshiyuki³; ONISHI, Masanori³
; KURAMOTO, Kiyoshi¹

¹ 北海道大学, ² 岡山大学, ³ 神戸大学

¹Hokkaido Univ, ²Okayama Univ, ³Kobe Univ

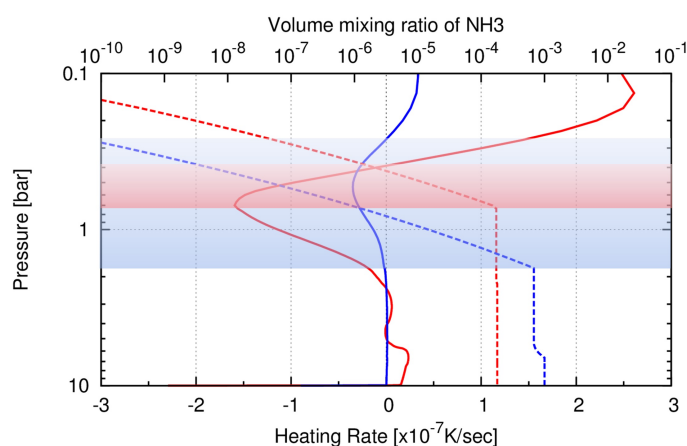
Gas giant planets have hydrogen-rich, thick atmospheres, and their styles of cloud activities are thought to be closely related to the profile of radiative cooling rate in troposphere. For example, Recent studies indicate that it basically controls the intermittency of cumulonimbus clouds. In spite of its significance, however, no systematic estimate has been made for the radiative cooling profiles of gas giant planets.

Recently, we have developed a 1D radiative-convective equilibrium model for such hydrogen-rich atmospheres. The model atmosphere continues to a lower boundary where the optical depth from the top of atmosphere is sufficiently large and the thermal structure follows convective equilibrium. The atmospheric composition and potential temperature of each planet are given from observational constraints. The mixing ratios of H₂O, CH₄, NH₃, H₂S, PH₃ and NH₄SH follow their saturation vapor pressure in the altitudes where their condensation occurs. Collision induced absorption of H₂-H₂ and H₂-He, and line absorption of H₂O, CH₄, NH₃, H₂S, PH₃ are included while the extinction by condensates is neglected. Under these settings, our model can calculate a reasonable atmospheric vertical structure by the iteration of radiative transfer calculation and convective adjustment.

For the case of Jupiter, the peak of radiative cooling rate is 1.6e-7 K/sec at 0.7 bar level. Also, our model predicts the radiative-convective boundary i.e., tropopause to be located around 0.3-0.4 bar level, where is slightly higher than the uppermost NH₃ condensation layer ~0.5 bar. For the case of Saturn, the peak of radiative cooling rate is 3.5e-8 K/sec at 0.53 bar, and the separation of tropopause and NH₃ cloud layer is larger than that of Jupiter. This implies that the Saturnian NH₃ cloud formation is essentially confined in the troposphere, whereas the Jovian one is also affected by the stratospheric processes.

Figure description : Radiative heating rate profile (solid lines, bottom x axis, K/sec) and Volume mixing ratio of NH₃ profile (dashed lines, top x axis, mole fraction). Y axis is pressure (bar). Shaded area represents between NH₃ condensation level and tropopause level. Red means Jovian model, and blue means Saturnian model. Note that these results are calculated with the polytropic temperature profiles for preliminary calculation, not thermal equilibrium profiles.

Keywords: Jupiter, Saturn, Cloud, Radiative transfer, Convection



木星の影中におけるガニメデ・カリストの予想外の近赤外線輝度の検出 Near-infrared detections of surprisingly bright Ganymede and Callisto in the Jovian shadow

津村 耕司^{1*}; 有松 亘²; 江上 英一³; 早野 裕⁴; 本田 親寿⁵; 木村 淳⁶; 倉本 圭⁷; 松浦 周二¹; 美濃和 陽典⁴; 中島 健介⁸; 中本 泰史⁹; 白旗 麻衣¹; スレース ジェイソン¹⁰; 高橋 康人⁷; 和田 武彦¹
TSUMURA, Kohji^{1*}; ARIMATSU, Ko²; EGAMI, Eiichi³; HAYANO, Yutakla⁴; HONDA, Chikatoshi⁵; KIMURA, Jun⁶; KURAMOTO, Kiyoshi⁷; MATSUURA, Shuji¹; MINOWA, Yosuke⁴; NAKAJIMA, Kensuke⁸; NAKAMOTO, Taishi⁹; SHI-RAHATA, Mai¹; SURACE, Jason¹⁰; TAKAHASHI, Yasuto⁷; WADA, Takehiko¹

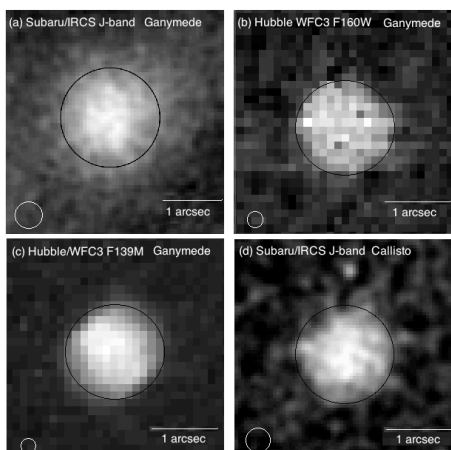
¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ² 東京大学, ³ アリゾナ大学, ⁴ 国立天文台 すばる観測所, ⁵ 会津大学, ⁶ 東京工業大学 地球生命研究所, ⁷ 北海道大学, ⁸ 九州大学, ⁹ 東京工業大学, ¹⁰ カリフォルニア工科大学

¹Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ²University of Tokyo, ³Arizona University, ⁴Subaru Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, ⁵The University of Aizu, ⁶Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, ⁷Hokkaido University, ⁸Kyushu University, ⁹Tokyo Institute of Technology, ¹⁰California Institute of Technology

The Galilean satellites (Io, Europa, Ganymede, and Callisto) are expected to be dark when eclipsed by the Jovian shadow. However, we have discovered that Ganymede and Callisto are still surprisingly bright at $1.5 \mu\text{m}$ even when not directly lit by sunlight, based on observations from the Hubble Space Telescope and the Subaru Telescope. Their eclipsed luminosity was one-millionth of their uneclipsed brightness (i.e. $\sim 50 \mu\text{Jy}$ for Ganymede and $\sim 30 \mu\text{Jy}$ for Callisto in eclipse), which is low enough that this phenomenon has been undiscovered until now. In contrast, Europa in eclipse was not detected ($< 5.5 \mu\text{Jy}$), a potential clue to the origin of the source of luminosity. Likewise, Ganymede was observed at $3.6 \mu\text{m}$ by the Spitzer Space Telescope but it was not detected either ($< 3.6 \mu\text{Jy}$), suggesting a significant wavelength dependence. Why are they luminous even when in the Jovian shadow? These facts may be consistent with sunlight scattered by dust in the Jovian upper atmosphere, and if this is the case, observations of Ganymede and Callisto while eclipsed by the Jovian shadow provide us with a new method to investigate Jupiter's atmospheric composition.

キーワード: ガリレオ衛星食, ガニメデ, カリスト, エウロパ, 木星上層大気

Keywords: Galilean satellite eclipse, Ganymede, Callisto, Europa, Jovian upper atmosphere



木星成層圏における分子による放射強制のシミュレーション Simulated radiative forcing by molecules in Jupiter's stratosphere

黒田 剛史^{1*}; Medvedev Alexander²; Hartogh Paul²
KURODA, Takeshi^{1*}; MEDVEDEV, Alexander²; HARTOGH, Paul²

¹ 東北大・理, ² マックスプランク太陽系研究所

¹Tohoku Univ., ²MPS

本発表では、木星の上部対流圏および成層圏 ($10^3 \sim 10^{-3}$ hPa) における大気分子による放射加熱・冷却率について、大気大循環モデル (GCM) への導入用に開発された大気放射スキームを用いた計算結果を示す。このスキームは相関 k -分布法に基づいたバンドモデルで、 CH_4 による太陽光吸収、および C_2H_6 , C_2H_2 , CH_4 分子ならびに $\text{H}_2\text{-H}_2/\text{H}_2\text{-He}$ 衝突誘起吸収による赤外放射を考慮している。

このバンドモデルによる計算結果は、line-by-line 法と比較して誤差 10% 以内の精度を達成しており、よってこのスキームを用いた炭化水素の混合比の変化による加熱・冷却率の変化、および放射対流平衡温度の計算結果を本発表で紹介する。放射対流平衡温度は赤道域において観測された鉛直温度分布に近い結果が得られた。またこのスキームを用いた計算では、上部成層圏の放射強制が Conrath et al. [1990] による示唆よりもはるかに強いことが示された。本研究での計算結果では放射緩和時間は上層に行くにつれて指数関数的に短くなり、対流圏界面付近では約 10^8 秒の放射緩和時間が上部成層圏では約 10^5 秒となっている。

キーワード: 木星, 大気放射, 巨大ガス惑星, JUICE

Keywords: Jupiter, atmospheric radiation, gas giants, JUICE

地球周回からみた木星と金星 EXCEED EUV spectral images of Jupiter and Venus

吉川 一朗^{1*}; 吉岡 和夫²; 村上 豪²; 土屋 史紀³
YOSHIKAWA, Ichiro^{1*}; YOSHIOKA, Kazuo²; MURAKAMI, Go²; TSUCHIYA, Fuminori³

¹ 東京大学, ² 宇宙研, ³ 東北大学
¹University of Tokyo, ²ISAS, ³Tohoku University

An earth-orbiting Extreme Ultraviolet (EUV) spectroscopy is the first mission of the Small scientific satellite Platform for Rapid Investigation and Test -A (Sprint-A) conducted by ISAS/JAXA. A single science instrument (EXCEED) is boarded on Sprint-A. We have started to observe the solar planets in the EUV spectral range, and will extend to the identification of extrasolar planet atmosphere.

SPRINT-A is the world's first observatory in space observing planets, Venus, Mars, Jupiter, and Saturn. Spectroscopic imaging in the spectral range of extreme ultraviolet (EUV), which cannot be observed on the ground, allows us to collect information on the atmosphere that flows into space and the magnetosphere. This enables us to analyze the composition of the atmosphere and the behavior of the magnetosphere. I will show the first light of the EXCEED and the next.

キーワード: 惑星大気光, スプリント A, 極端紫外光, 惑星プラズマ, 可視化
Keywords: Planetary Airglows, Sprint-A, EUV, plasma, visualization

Occurrence characteristics of Saturn's short-term radio burst Occurrence characteristics of Saturn's short-term radio burst

丸野 大地¹; 笠羽 康正^{1*}; 木村 智樹²; 森岡 昭¹; Cecconi Baptiste³
MARUNO, Daichi¹; KASABA, Yasumasa^{1*}; KIMURA, Tomoki²; MORIOKA, Akira¹; CECCONI, Baptiste³

¹ 東北大, ²ISAS/JAXA, ³Obs. Paris

¹Tohoku Univ., ²ISAS/JAXA, ³Obs. Paris

Saturn kilometric radiation (SKR) is emitted from auroral electrons and suggested to be correlated with Saturn's auroral processes. We extracted northern SKR (N-SKR) and southern SKR (S-SKR) burst events, by newly defined selection criteria, with radio data observed by the Cassini Radio and Plasma Wave Science (RPWS) instrument in the period from day 250 of 2005 to day 200 of 2006. The data was separated into northern and southern components according to its circular polarization degree. As a result, 16 N-SKR burst events and 36 S-SKR burst events were identified in this period. Based on statistical studies of these events, we obtained the following results: (1) We derived typical frequency profiles of N- and S-SKR during SKR bursts to compare the intensity of N- and S-SKR bursts. The profiles show that the S-SKR burst was more intense than the N-SKR by 7 dB in the main frequency range. From the recent studies, the north-south asymmetry could be explained by the difference in solar illumination due to the tilted the magnetic and rotational axis. (2) By comparing onset timings of N- and S-SKR bursts, we found that 67 % of S-SKR burst events were accompanied by N-SKR bursts or burst-like enhancements. (3) To elucidate what determines the timing of SKR burst onsets, we compared the onset timing of N- and S-SKR bursts with each SKR phase of the periodic modulations. The result showed that the timing of SKR burst onsets generally depends on both the N- and S-SKR modulation phases. This suggests the existence of the internal control of SKR burst onsets. It is, however, noted that some SKR bursts occurred out of phases with SKR modulation phases. That indicates the timing of SKR bursts can also be determined by the external process, i.e., solar wind compressions. (4) We investigated the time evolutions of SKR intensities in the main frequency range and the low frequency range before and after SKR bursts. By comparing them with AKR intensity evolutions at AKR breakup, we found that they had two similarities: the enhancement of lower-altitude source regions prior to onsets and the formation of the distinct higher source regions. On the other hand, their timescales are quite different. In addition, this study pointed out that the two-step evolution scenario could not be directly applied to Saturn's case.

In conclusion, our study demonstrated the north-south asymmetry, the conjugacy and the dependence on the SKR periodic modulations of SKR bursts. These results would be helpful for understanding the auroral process at Saturn's magnetotail reconnections by elucidating the relationship between SKR bursts and reconnections. We consider the third result is particularly important because this suggests that both northern and southern periodicities would affect magnetotail reconnections.

キーワード: 土星, SKR, aurora, Cassini

Keywords: Saturn, SKR, aurora, Cassini

木星圏探査機 JUICE 搭載サブミリ波放射計 SWI の開発 Submillimeter-Wave Instrument (SWI) for JUICE: Current Status of the Instrumental Development

佐川 英夫^{1*}; 笠井 康子¹; 菊池 健一¹; 西堀 俊幸²; 真鍋 武嗣³; 落合 啓¹; 黒田 剛史⁴; 関根 康人⁵; Hartogh Paul⁶
SAGAWA, Hideo^{1*}; KASAI, Yasuko¹; KIKUCHI, Kenichi¹; NISHIBORI, Toshiyuki²; MANABE, Takeshi³; OCHIAI, Satoshi¹; KURODA, Takeshi⁴; SEKINE, Yasuhito⁵; HARTOGH, Paul⁶

¹ 情報通信研究機構, ² 宇宙航空開発研究機構, ³ 大阪府立大学, ⁴ 東北大学, ⁵ 東京大学, ⁶ マックスプランク研究所 太陽系研究部門

¹National Institute of Information and Communications Technology (NICT), ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³Osaka Prefecture University, ⁴Tohoku University, ⁵University of Tokyo, ⁶Max Planck Institute for Solar System Research

The Submillimetre-Wave Instrument (SWI) is a passive submillimeter-wave heterodyne instrument proposed as one of the scientific payload instruments for the Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE) mission. It measures the thermal emission from atmosphere of Jupiter and its moons at the frequency region of 500 - 600 GHz (with keeping 1200 GHz range as an optional concept). Thermal emission from the surface of moons will also be measured. JUICE/SWI provides unique observational data for characterization of the Jovian stratosphere such as thermal structure, dynamics, and distribution of minor species; and for exploration of tenuous-atmosphere and surface environment of the Jovian moons. By detecting hydrogen and oxygen isotopes in the water vapor of Jovian moons' atmosphere, SWI can also contribute to understanding the origin and distribution of water in our solar system.

This paper presents the current status of the development of SWI instrument, including the updates on the science targets and their feasibility studies. The SWI instrument is being developed through international cooperation. The Japanese team contributes to the development of the submillimeter reflector (mirror). The submillimeter reflector is one of the key components of SWI, and it determines the spatial resolution of observations. Currently a 30-cm aperture diameter reflector is considered, providing a spatial resolution of 2 mrad (FWHM) at 600 GHz. In order to fulfill the stringent requirement of weight reduction, we evaluated the material of the reflector and optimized its rib structure. The side lobe suppression is also an important factor to improve the quality of observations.

キーワード: 木星, 氷衛星, JUICE, サブミリ波, リモートセンシング, 測器開発

Keywords: Jupiter, Icy moon, JUICE, Submillimeter wave, Heterodyne

Development of JUICE/Ganymede Laser Altimeter (GALA) Development of JUICE/Ganymede Laser Altimeter (GALA)

並木 則行¹; 木村 淳^{2*}; 小林 正規¹; Hussmann Hauke³; Lingenauber Kay³; GALA-Japan Team⁴
NAMIKI, Noriyuki¹; KIMURA, Jun^{2*}; KOBAYASHI, Masanori¹; HUSSMANN, Hauke³; LINGENAUER, Kay³; TEAM,
Gala-japan⁴

¹ 千葉工業大学惑星探査研究センター, ² 東京工業大学地球生命研究所, ³ ドイツ航空宇宙研究所, ⁴ JUICE Japan Group
¹ PERC/Chitech, ² Earth-Life Science Institute, Tokyo institute of Technology, ³ DLR Institute of Planetary Research, ⁴ JUICE
Japan Group

The overarching theme for JUICE is: The emergence of habitable worlds around gas giants, and the focus is to characterise the conditions that may have led to the emergence of habitable environments among the Jovian icy satellites, with special emphasis on the three oceanbearing worlds, Ganymede, Europa, and Callisto. JUICE will be launched in 2022, and will arrive at Jupiter in 2030. After several fly-bys to Europa and Callisto, JUICE will be inserted into an orbit around Ganymede in 2032 and will continue scientific observations for eight months until the end of nominal mission in 2033. Ganymede Laser Altimeter, GALA, measures distance between the spacecraft and the surface of the satellite from time of flight of a laser pulse. Together with positions of the spacecraft and mass center of the satellite, surface topography of the satellite is calculated from measured distances. The GALA data are particularly important for finding of internal ocean.

1) if the ocean exists beneath icy crust, tidal deformation of the satellite is so large that temporal variation of the topography as great as a few tens meter shall be detected.

2) small eccentricity of orbit of Ganymede causes libration that will be observed as lateral shifts of footprint of laser beam at the surface.

3) improved determination of spacecraft orbits by cross over analysis results in precise estimate of low degree harmonics of gravity field. Thus accurate Love number will be calculated to infer internal density structure of the satellite.

Global topographic data derived by GALA are also important for the study of tectonic history at the surface, elastic and viscous structure of ice crust, and thermal evolution of interior of the icy satellite. For example, linear structures such as ridges and grabens reveal extension stresses due to past variation of thermal states. As well, flat surface and thin crust may indicate partial melting of the crust and consequent internal lake. These observations on various geologic activities lead to understanding of transport of heat and materials from interior to the surface. Further, a comparison of styles of tectonics of ice crust and that of silicate lithosphere will likely shed a new light on the theory of plate tectonics of the Earth.

GALA is developed by international collaboration of scientists and engineers in Germany, Switzerland, and Japan. Its conceptual design is based on the laser altimeter on board of Mercury orbiter, BepiColombo, and consists of transceiver unit (TRU) with laser optics and appropriate electronics, electronic unit (ELU) with digital range finder module, digital processing module and power converter module, and laser electronic unit (LEU) with laser control electronics. Japanese team provides receiver telescope, backend optics, detector, and analogue electronics of TRU. The transmission optics of TRU and entire LEU are developed at DLR in Germany, and ELU is developed at Bern University in Switzerland. Assembly and integration are conducted at DLR under a supervision of the principal investigator of GALA. We therefore need to pay special caution on interfaces between analogue electronics and range finder, low-temperature environment, and radiation environment that Japanese space scientists have never experienced before.

Keywords: Jupiter, Ganymede, Laser Altimeter, Exploration, Spacecraft, Habitability

周惑星円盤への衛星材料物質の供給 Accretion of Solid Materials onto Circumplanetary Disks from Protoplanetary Disks

谷川 享行^{1*}; 丸田 有希人²; 町田 正博²
TANIGAWA, Takayuki^{1*}; MARUTA, Akito²; MACHIDA, Masahiro²

¹ 北大低温研, ² 九大理

¹ILTS, Hokkaido University, ²Kyushu University

We investigate accretion of solid materials onto circumplanetary disks from heliocentric orbits rotating in protoplanetary disks, which is a key process for the formation of regular satellite systems. In the late stage of gas-capturing phase of giant planet formation, the accreting gas from protoplanetary disks forms circumplanetary disks. Since the accretion flow toward the circumplanetary disks affects the particle motion through gas drag force, we use hydrodynamic simulation data for the gas drag term to calculate the motion of solid materials. We consider wide range of size for the solid particles (10^{-2} - 10^6 m), and find that the accretion efficiency of the solid particles peaks around 10m-sized particles because energy dissipation of drag with circumplanetary disk gas in this size regime is most effective. The efficiency for particles larger than 10m size becomes lower because gas drag becomes less effective. For particles smaller than 10m, the efficiency is lower because the particles are strongly coupled with the back-ground gas flow, which prevent particles from accretion. We also find that the distance from the planet where the particles are captured by the circumplanetary disks is in a narrow range and well described as a function of the particle size.

キーワード: 衛星形成, 周惑星円盤

Keywords: satellite formation, circumplanetary disks

火星地下氷の水素同位体比と厚さ：マルチリザーバーモデルからの制約 Hydrogen Isotope Ratio and Thickness of Martian Ground Ice: Implication from Multi-Water-Reservoir Model

黒川 宏之^{1*}; 臼井 寛裕²; 出村 裕英³; 佐藤 雅彦⁴

KUROKAWA, Hiroyuki^{1*}; USUI, Tomohiro²; DEMURA, Hirohide³; SATO, Masahiko⁴

¹名古屋大学, ²東京工業大学, ³会津大学, ⁴九州大学

¹Nagoya University, ²Tokyo Institute of Technology, ³University of Aizu, ⁴Kyushu University

Martian surface ice is currently observed only as polar layered deposits (PLDs), whereas Mars Odyssey Gamma Ray Spectrometer (Boynton et al., 2002; Boynton et al., 2007) and Mars Express radar sounder observations (Mouginot et al., 2012) propose the presence of much larger amount of ground ice in the mid- to high-latitudes. The total volume of PLDs is 20-30 m in Global Equivalent Depth (Zuber et al., 1998; Plaut et al., 2007). Ground-ice region is expected to spread over a few tenths of percent of the total Martian surface, yet the thickness (i.e. volume) is poorly constrained (Mouginot et al., 2012).

The thickness of the ground ice is related to the evolution history of the Martian water reservoirs. After ancient oceans became extinct (~4Ga), the oceanic water would become "surface ice", which currently occur as PLDs, and "ground ice" which would extend from high latitude to mid- or low-latitude. Atmospheric escape of hydrogen and oxygen through the Martian history causes decrease of the amount of the ice. The signature of the evolution history is recorded by hydrogen isotope ratio (D/H). Martian atmosphere and soil have D/H ratio of ~6 (relative to SMOW) (Owen et al., 1988; Webster et al., 2013), which is higher than the Martian primitive D/H ratio of ~1.3 (Usui et al., 2012).

We constrain the hydrogen isotope ratio of surface ice and ground ice, and estimate the thickness of ground ice, using a multi-water-reservoir box model (see figure shown below). The model solves the evolution of water inventories and D/H ratio of atmosphere, surface ice, and ground ice during the ice age. Atmospheric escape and sublimation are considered as D/H fractionation processes. We adapt our model to the Martian ice age (4Ga to present). The initial D/H ratio is that of ancient ocean, which is informed by D/H data of the Martian meteorite ALH84001 formed at ~4.1Ga (Lapen et al., 2010): D/H = 2.2-4.0 (relative to SMOW) (Boctor et al., 2003, Greenwood et al., 2008).

First, we show the results from two water-reservoir box model (ice and atmosphere). The ratio of atmospheric D/H and ice D/H is in a quasi-equilibrium state of the fractionation caused by atmospheric escape and sublimation. The ratio of the present Mars is mainly determined by the fractionation caused by sublimation.

Second, we show the results from four water-reservoir box model (surface ice, ground ice, high-latitude atmosphere, and mid- to high-latitude atmosphere). Assuming the atmospheric condition of the present Mars, the mixing of two atmospheric reservoir is inefficient in D/H exchange between surface ice and ground ice, which results in the independent growth of D/H ratio of the surface ice and the ground ice. To fractionate the D/H ratio of the surface ice and the ground ice into ~6, the thickness of active ground ice which can exchange water with atmosphere is constrained. Thin active ice causes high deuterium concentration. The required thickness is a few hundred meters, which is distinctly large value compared to the thickness that HDO diffusion works (~10 m in 1 Gyrs). Nature of this active ground ice might be partially melted ice suggested by recent observations of recurring slope lineae (McEwen et al., 2014), hydrated clathrates in underground cryosphere, or breathing porous permafrosts.

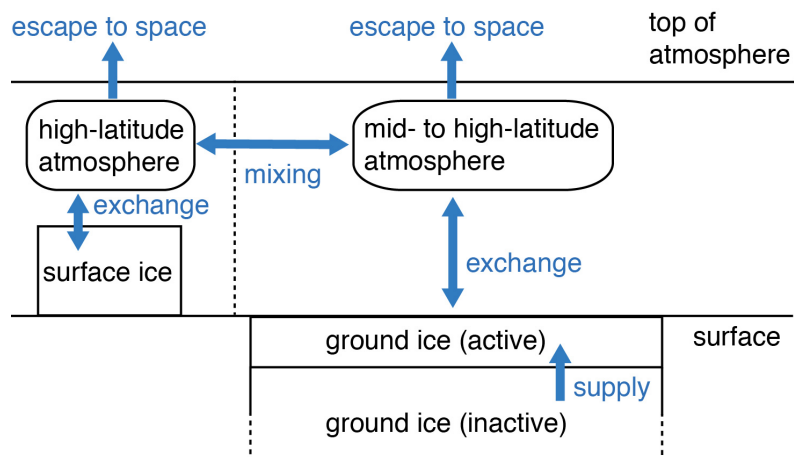
キーワード: 地下氷, 水素同位体比, 大気散逸

Keywords: ground ice, hydrogen isotope ratio, atmospheric escape

PPS02-01

会場:418

時間:4月28日09:00-09:25



火星におけるプレートテクトニクス存否の証拠：付加帯 New evidence for plate tectonism on Mars: Accreted Terrains

Dohm James^{1*}; 丸山 茂徳¹
DOHM, James^{1*}; MARUYAMA, Shigenori¹

¹ 東京工業大学地球生命

¹Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

Reported evidence for plate tectonism has included spatial association among magnetic anomalies, large (thousands of kilometers long) structures, and highly degraded promontories interpreted to be andesitic domes, thrust faults, folds, structurally-controlled basins, large mountain ranges, and topographic and crustal-thickness-model signatures of structural control (including plate movement) within and along the margin of the northern plains. Significant evidence for an ancient phase of plate tectonism on Mars, newly identified, is accretionary complexes, informed through Earth analogs exquisitely detailed here in Japan. This finding represents a new frontier in the geologic investigation of Mars, bringing greater attention to pre-Tharsis (~>4.0 Ga) terrains, which record Earth-like conditions. Pre-Tharsis, Earth-like conditions include an active dynamo and plate tectonism, as well as Habitable-Trinity conditions?an ocean, relatively thick atmosphere, and primordial crustal materials enriched in phosphorous, iron, among other elements important to life, all of which interact due to hydrological cycling driven by the Sun. Accreted terrains, which mark major crustal shortening through subduction of oceanic crustal materials and associated accumulation of andesites and granites, could comprise rock records on Mars dating back more than 4.2 Ga. Considering planetary evolution of Mars, largely informed through our understanding of the evolution of Earth, the accretionary complexes are likely to record environmental conditions during a time range of several hundred million years, which includes possible fossil life if initiated and evolved during the extremely ancient (>4.0 Ga) Habitable-Trinity conditions. A prime example of an extremely ancient accretionary complex is located to the west of Claritas rise, southwest margin of the Tharsis superplume. At the meeting we will present evidence of a Martian accretionary complex and discuss the implications of such a significant finding, including highlighting the next phase of geologic investigation of the evolution of Mars and its bearing on Astrobiology.

キーワード: プレートテクトニクス, 付加帯, 海洋プレート層序
Keywords: Plate tectonics, accretionary complex, OPS

火星探査 MELOS 計画のためのエアロゾル・水蒸気観測用環境監視カメラの提案 Environmental monitoring camera system for the Martian aerosols and water vapor for the Japanese Mars rover, MELOS

眞子 直弘^{1*}; 野口 克行²; 小郷原 一智³; 鈴木 睦⁴; はしもと じょーじ⁵

MANAGO, Naohiro^{1*}; NOGUCHI, Katsuyuki²; OGOHARA, Kazunori³; SUZUKI, Makoto⁴; HASHIMOTO, George⁵

¹ 千葉大学, ² 奈良女子大学, ³ 滋賀県立大学, ⁴ 宇宙航空研究開発機構, ⁵ 岡山大学

¹Chiba University, ²Nara Women's University, ³University of Shiga Prefecture, ⁴Japan Aerospace Exploration Agency, ⁵Okayama University

We propose the environmental monitoring camera system of aerosols and water vapor in the Martian atmosphere for the Japanese Mars rover, MELOS. The meteorology and the climate of Mars are strongly controlled by the aerosols, which consists of dust and clouds in the Martian atmosphere, and the better understanding of the basic parameters such as optical depth, radius distribution and composition of the aerosols enables us to describe the effect on the Martian meteorology and climate quantitatively. The water vapor also affects the Martian meteorology and climate through the infrared radiation and the generation of clouds. The MELOS aims at the search for life, and it needs the basic knowledge of the meteorology and climate at the landing site for detailed discussion. Therefore we should conduct the measurements of aerosols and water vapor at the MELOS landing site simultaneously.

To satisfy the requirement of monitoring the aerosols and water vapor in the MELOS rover mission, we propose a three-CMOS-camera system, which consists of a direct sunlight camera, a scattering light camera and a high-resolution color camera. The direct sunlight camera has four wavelength band (340 or 450nm and 550nm for aerosols and 870 and 940nm for water vapor). The scattering light camera also has the same wavelength band, but it is directed at the neighborhood of the sun and at several points along the great circle including the sun and is utilized for aerosol measurements. The arrangement proposed here basically follows the previous Mars missions, e.g., Viking lander, Mars Pathfinder and Mars Exploration Rover. The high-resolution color camera obtains pseudo color pictures around the rover and is intended to support the navigation for the life search experiment.

Keywords: MELOS rover mission, Martian atmosphere

火星大気散逸観測オービター計画の検討 Examination of Mission Scenario and Spacecraft System to Study Martian Atmospheric Escape

松岡 彩子^{1*}; 関 華奈子²; 寺田 直樹³; 横田 勝一郎¹; 山崎 敦¹; 川勝 康弘¹; 阿部 琢美¹; 二穴 喜文⁴; 平原 聖文²; 今村 剛¹; 石坂 圭吾⁵; 熊本 篤志³; 栗原 純一⁶; 中川 広務³; 小倉 聡司¹; 坂野 井 健⁷; 田口 真⁸; 八木 谷 聡⁹
MATSUOKA, Ayako^{1*}; SEKI, Kanako²; TERADA, Naoki³; YOKOTA, Shoichiro¹; YAMAZAKI, Atsushi¹; KAWAKATSU, Yasuhiro¹; ABE, Takumi¹; FUTAANA, Yoshifumi⁴; HIRAHARA, Masafumi²; IMAMURA, Takeshi¹; ISHISAKA, Keigo⁵; KUMAMOTO, Atsushi³; KURIHARA, Junichi⁶; NAKAGAWA, Hiromu³; OGUURA, Satoshi¹; SAKANOI, Takeshi⁷; TAGUCHI, Makoto⁸; YAGITANI, Satoshi⁹

¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ² 名古屋大学 STE 研, ³ 東北大学理学部, ⁴ IRF スウェーデン, ⁵ 富山県立大学工学部, ⁶ 東北大学理学部惑星プラズマ大気研究センター, ⁷ 北海道大学理学部, ⁸ 立教大学理学部, ⁹ 金沢大学工学部
¹ ISAS/JAXA, ² STEL, Nagoya Univ., ³ Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ., ⁴ IRF, Sweden, ⁵ Toyama Pref. Univ., ⁶ Planet. Plasma Atmos. Res. Cent., Tohoku Univ., ⁷ CosmoSciences, Hokkaido Univ., ⁸ Rikkyo Univ., ⁹ Kanazawa Univ.

火星の大気の変遷には、太陽風との相互作用が大きく影響したと考えられているが、今現在の火星においてさえ、大気と太陽風との相互作用の物理プロセスは明らかになっていない。

地球と異なり、現在の火星は惑星固有の磁場を持たない。その結果、太陽風は低い高度にまで達し、火星の大気と直接相互作用して、火星大気の一部は散逸される。この過程は、長い間には火星大気の組成を変化させるまでの作用を及ぼし、火星大気や、ひいては地上・地下の二酸化炭素（ドライアイス）や水・氷の変遷に大きく影響した可能性があると考えられている。大気散逸の様子は、太陽活動や太陽との距離によって影響を受けるため、大気の長期的な変遷を考えるためには、様々な太陽の状態について相互作用の働きを知らなければならない。

我々は、2011年12月にJAXA宇宙科学研究所理学委員会において火星大気散逸探査検討ワーキンググループを発足させた。このワーキンググループは、大気散逸に焦点を当て、2つのオービターによって散逸の全体像とプロセスを同時に観測することを検討している。1つのオービター（大気散逸その場観測衛星）によって、大気散逸が起きているその場のプラズマや中性粒子の観測を観測を行い、もう1つのオービター（リモート観測衛星）によって、散逸する大気等から発せられる光をリモートで撮像し、また同時に太陽風をモニターするというものである。大気散逸の物理プロセス、グローバルな全体像、物理プロセスを決める太陽風のモニターを同時に行うことは、複数衛星によって初めて可能となる、真に大気散逸の全容解明に迫る観測である。

現在我々は、2024年頃の太陽活動極大期における火星観測を行う大気散逸観測オービターの実現に向けて、サイエンス・観測機器・衛星の検討を行っている。科学目標の定量的・具体的な策定、それを達成するために必要な観測機器技術、計画を実現させるための衛星システムおよび軌道計画を検討している。検討内容の報告と、今後の開発計画を発表する。

Development of a dust imager for Mars landing mission Development of a dust imager for Mars landing mission

佐藤 毅彦^{1*}; 小郷原 一智²; はしもと じょーじ³; 三浦 和彦⁴; 間野 高明⁵
SATO, Takehiko^{1*}; OGOHARA, Kazunori²; HASHIMOTO, George³; MIURA, Kazuhiko⁴; MANO, Takaaki⁵

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²University of Shiga Prefecture, ³Okayama University, ⁴Tokyo University of Science,
⁵National Institute for Materials Science

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²University of Shiga Prefecture, ³Okayama University, ⁴Tokyo University of Science,
⁵National Institute for Materials Science

We report progress in developing a dust imager for future Mars landing missions. As Martian dust is a key element of its environment and a potential hazard for human exploration, it is essential to know what is Martian dust and how it works. However, little is known about the Martian dust due primarily to lack of measurements. Direct imaging would greatly increase our knowledge about the Martian dust (previously, an Atomic-Force Microscope onboard Phoenix acquired just one image).

The dust imager under development is not a microscope but a "bare" imaging sensor of which pixels are fine pitched. After exposing the sensor to the air with dust for a while, we illuminate the sensor with a parallel beam so that shadows of particles on the sensor are directly imaged. In this way, the imager does not need a focusing mechanism and is expected to be very light-weighted and robust. Although the status is still the laboratory-experiment level, this small tool would greatly contribute to the Mars science and exploration.

Keywords: Mars, dust, imager, landing, mission

生命探査顕微鏡：蛍光顕微鏡をもちいた火星表面での微生物探査 Life Detection Microscope: Search for Microbes on the Mars Surface with a Fluorescent Microscope

山岸明彦^{1*}; 佐藤毅彦²; 塩谷圭吾²; 宮川厚夫¹; 佐々木聰³; 吉村義隆⁴; 本多元⁵; 出村裕英⁶; 今井栄一⁵; 白井寛裕⁷; 藤田和央⁸; 石上玄也⁹; 小澤宇志⁸; 大野宗祐¹⁰; 佐々木晶¹¹; 宮本英昭¹²
YAMAGISHI, Akihiko^{1*}; SATOH, Takehiko²; ENYA, Keigo²; MIYAKAWA, Atsuo¹; SASAKI, Satoshi³; YOSHIMURA, Yoshitaka⁴; HONDA, Hajime⁵; DEMURA, Hirohide⁶; IMAI, Eiichi⁵; USUI, Tomohiro⁷; FUJITA, Kazuhisa⁸; ISHIGAMI, Genya⁹; OZAWA, Takashi⁸; OHNO, Sohsuke¹⁰; SASAKI, Sho¹¹; MIYAMOTO, Hideaki¹²

¹ 東京薬科大学生命科学部, ² 宇宙科学研究所, ³ 東京工科大学, ⁴ 玉川大学, ⁵ 長岡科学技術大学, ⁶ 会津大学, ⁷ 東京工業大学, ⁸ 宇宙科学研究開発機構, ⁹ 慶応大学, ¹⁰ 千葉工業大学, ¹¹ 大阪大学, ¹² 東京大学

¹Tokyo University of Pharmacy and Life Sciences, ²ISAS/JAXA, ³Tokyo University of Technology, ⁴Tamagawa University, ⁵Nagaoka Univ. Tech., ⁶The University of Aizu, ⁷Tokyo Institute of Technology, ⁸JAXA, ⁹Keio University, ¹⁰Chiba Institute of Technology, ¹¹Osaka University, ¹²The University of Tokyo

Past trial of direct detection of life on Mars by 1970's Viking mission reported a negative conclusion, whereas numbers of circumstances provided by recent Mars exploration missions in the last decade indicate that there are good reasons to perform another life detection program.

Here we propose Life Detection Microscope that has much higher sensitivity than the instrument onboard Viking. Indeed Life Detection Microscope (LDM) that we propose here could detect less than 10⁴ cells in 1 gram clay. Our life detecting instrument has the sensitivity that is three orders of magnitude higher than the one onboard Viking that issued the negative conclusion. LDM is capable of identifying what we think to be the most fundamental features that a cell should possess to constitute life.

Our Investigation Goals are:

- 1: High-resolution characterization of regolith and dust particles.
- 2: Search for any type of organic compounds in Mars surface samples. The compounds include cells, other biological materials, and abiotic polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH).
- 3: Identify cell-like structure in which organic compounds are enveloped by membrane, which may represent Martian life.

キーワード: 火星, 生命探査, 蛍光顕微鏡, 微生物, 有機物

Keywords: Mars, Life search, Fluorescence microscope, Microbe, Organic compounds

火星生命探査顕微鏡を用いた生命探査のための着陸地点候補 Landing-site candidates for the Life Detection Microscope instrument

宮本 英昭^{1*}; 臼井 寛裕²; 小松 吾郎³; Dohm James²; 新原 隆史⁴; 小熊 みどり¹; 佐藤 毅彦⁵; 山岸 明彦⁶
MIYAMOTO, Hideaki^{1*}; USUI, Tomohiro²; KOMATSU, Goro³; DOHM, James²; NIIHARA, Takafumi⁴; OGUMA, Midori¹
; SATOH, Takehiko⁵; YAMAGISHI, Akihiko⁶

¹ 東京大学, ² 東京工業大学, ³ 国際惑星科学研究大学院, ⁴ 国立極地研究所, ⁵ 宇宙科学研究所, ⁶ 東京薬科大学
¹University of Tokyo, ²TiTech, ³IRSPS, ⁴National Institute of Polar Research, ⁵ISAS, ⁶Tokyo University of Pharmacy and Life Science

Mars explorations of past decades indicate that ancient Mars had environment somehow similar to that of Earth. Existence of large bodies of water, chemical building blocks of life, a wide range of oxidation states, and a magnetic field indicate that Mars would have been habitable. Recent studies of microbes in extreme environments show that some terrestrial microbes have possibilities for surviving and proliferating under the current martian environment, if these are placed in some specific conditions such as with sufficient shield from UV light (attained only at more than several centimeters below the surface) and with the existence of gradients of free energy. Such environmental conditions likely exist at some specific locations even the present Mars. For this reason, we are developing a new instrument called LDM (Life Detection Microscope), which is designed to detect less than 10^4 cells in 1 gram clay, orders of magnitude higher than previous attempts performed by Viking landers. To maximize the chances of the detection of organisms, the landing sites should be carefully selected in terms of the possibility of the existence of near-surface water, as well as recent geological activities and release of volatiles. Traces of possible liquid water flow have been reported at a number of locations including those recognized as the recurring slope lineae, seasonal flows on slopes of several craters, and anastomosing slope streaks. These are proposed to be the result of small and continuous seeps of subsurface brine water, which could persist for a longer period providing a habitable environment. In this talk, we examine the morphologic characteristics of these features and discuss their origins in the line of geological contexts for selecting appropriate landing sites for the LDM instrument.

キーワード: 火星, 生命探査, 顕微鏡, 着陸地点, 水

Keywords: Mars, extraterrestrial life, life detection microscope, landing site, water

火星探査機 MRO 搭載 MCS により観測された火星大気ダストと水氷雲の子午面分布
の複数年解析
Interannual analyses of the meridional distributions of Martian dust and clouds obtained
by MRO-MCS

野口 克行^{1*}; 今江 香織¹; 川西 麻衣¹
NOGUCHI, Katsuyuki^{1*}; IMAE, Kaori¹; KAWANISHI, Mai¹

¹ 奈良女子大学
¹Nara Women's University

We investigated the interannual variability of the meridional distributions of dust and clouds in the Martian atmosphere by using Mars Reconnaissance Orbiter Mars Climate Sounder (MRO-MCS) measurements. As the previous analyses did not consider measurement errors to depict the zonal averages, we took a criterion of 10% for the measurement error. Results show that Mars Year (MY) 29, which is regarded as a standard year in the previous analyses, had an enhancement of dust in the high altitudes (above 10 Pa) in the tropical region, and such an enhancement was not found in other MYs (28, 30 and 31). On the other hand, the distribution of ice clouds in MY 29 roughly agreed with other MYs' distribution.

キーワード: 火星, MRO, MCS, ダスト, 水氷雲

火星におけるダスト巻き上げスキームの DCPAM への実装とそれを用いた地表面ダストフラックス診断実験 Implementing Martian dust lifting scheme into DCPAM, and a diagnosis experiment of surface dust flux

荻原 弘堯^{1*}; 高橋 芳幸²; 石渡 正樹¹; 小高 正嗣¹; 林 祥介³

OGIHARA, Hiroataka^{1*}; TAKAHASHI, Yoshiyuki O.²; ISHIWATARI, Masaki¹; ODAKA, Masatsugu¹; HAYASHI, Yoshiyuki³

¹ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻, ² 神戸大学大学院理学研究科, ³ 神戸大学・大学院理学研究科地球惑星科学専攻
¹Department of CosmoSciences, Graduate school of Science, Hokkaido University, ²Graduate School of Science, Kobe University, ³Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kobe University

火星ではダスト循環が大気熱構造に影響しており, 大気構造を決める重要な要素となっている (Gierasch and Goody, 1968). ダスト循環過程には, 地表面からのダスト巻き上げ, 乱流拡散, 移流, 重力沈降がある. その中でもダスト巻き上げ過程ではモデルで解像された風による巻き上げとモデルで解像できない塵旋風 (ダストデビル) による巻き上げを考慮する必要がある. 各国の研究グループでは, これらの過程に関するパラメタリゼーションスキームを組み込んだ大気大循環モデルによる計算が行われている. 例えば Kahre et al.(2006) の数値実験では, 完全にではないが, 北半球の秋から冬にかけて大気ダスト量が増加する季節変化の特徴を捉えることができている. これに対して, 我々が開発を進めてきた大気大循環モデル DCPAM (高橋他, 2012) では, 上記のダスト過程を組み込んでいない状況であった. 本研究では, DCPAM にダスト過程スキームを実装し, ダスト循環に関して考察するための数値実験を行うことを目的とする. 将来的には, 未だどのモデルでも再現できていない火星のダスト分布の年々変動に関する考察に進むことを予定している. ここでは, 上記のダスト過程の一つであるモデルで解像された風によるダスト巻き上げスキームを DCPAM へ実装する. 更に, ダスト巻き上げスキームの振る舞いを調べるために放射的に不活性なダストをトレーサーとしたトレーサー巻き上げ実験を行い, その結果と Kahre et al.(2006) の結果を比較する.

ここで用いるモデルは地球流体電脳倶楽部にて開発されている大気大循環モデル DCPAM である. DCPAM では 3 次元球面プリミティブ方程式を用いている. 放射過程では CO₂ と大気ダストを考慮し, Takahashi et al.(2003, 2006) のスキームを用いる. 放射スキームに与えるダスト分布は固定したものをを用いる. 乱流過程は Mellor and Yamada (1974) の方法に従って決めた鉛直拡散係数を用いて評価する. 地表面過程は Louis et al.(1982) の方法に従って評価する. 各パラメータには火星における一般的なパラメータを用いる. 地表面の熱慣性, アルベド, 地形高度にはマーズグローバルサーベイヤーの観測結果を用いる. 水平離散化にはスペクトル法を用い全波数 21 で打ち切りを行う, 鉛直方向には差分法を用い, 鉛直層数は 32 とする. 積分時間は 3 火星年であり, 最後の 1 火星年分を解析に用いた.

今回, ダスト巻き上げスキームとして KMH スキーム (Kahre et al., 2006) と呼ばれるものを DCPAM へ実装した. これを用いて地表面ダストフラックス計算を行った. その結果, Kahre et al.(2006) のモデル計算の結果と季節, 位置ともに類似した. 具体的には北半球の秋から冬にかけての北緯 50 度付近と南緯 30 度付近でダストが強く巻き上がっているという結果となった. 北緯 50 度付近では東西波数 1, 周期 6 火星日の東進する波の影響で多く巻き上がっていると想像される. この波は傾圧不安定波に関係すると想像される (Briggs et al., 1979). また, 南緯 30 度付近では東西波数 1, 周期 1 火星日の西進する波の影響で多く巻き上がっていると想像される. この波は一日周期熱潮汐波だと想像され (Joshi et al., 1997), 地方時で 16 時にダストが巻き上がりやすい. この結果では定性的には先行研究と一致しているが, 定量的には完全に一致していない. 例えば, 本モデルのダストフラックスは Kahre et al.(2006) よりも北極の極冠で一桁大きくなっている. この結果は鉛直層の厚さと乱流混合の評価の仕方に関係すると思われる. ここではモデルで解像された風によるダスト巻き上げスキームが実装できたので, 現在ダストデビルによるダスト巻き上げスキームの実装を進めている. 順次, 移流過程, 重力沈降過程も含んだ実装実験を行っていく予定である.

キーワード: ダスト, 火星, 大気大循環モデル

Keywords: Dust, Mars, General Circulation Model

惑星大気大循環モデル DCPAM を用いた MELOS1 探査機のための火星表層環境評価 Assessment of Mars surface environment for MELOS1 lander using Planetary General circulation model DCPAM

小高 正嗣^{1*}; 杉山 耕一朗²; 高橋 芳幸³; 西澤 誠也⁴; 林 祥介⁵; はしもと じょーじ⁶
ODAKA, Masatsugu^{1*}; SUGIYAMA, Ko-ichiro²; TAKAHASHI, Yoshiyuki O.³; NISHIZAWA, Seiya⁴; HAYASHI, Yoshiyuki⁵; HASHIMOTO, George⁶

¹ 北海道大学大学院理学学院宇宙理学専攻, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ³ 惑星科学研究センター, ⁴ 理化学研究所 計算科学研究推進機構, ⁵ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ⁶ 岡山大学大学院自然科学研究科
¹Department of CosmoSciences, Hokkaido University, ²Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ³Center for Planetary Science, ⁴RIKEN Advanced Institute for Computational Science, ⁵Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kobe University, ⁶Department of Earth Sciences, Okayama University

1. はじめに

現在, わが国の宇宙工学および理学コミュニティにおいて着陸船による生命・表層環境探査を主体とした火星探査計画 (MELOS1) の検討が進められている。計画では, 地表に探査機を降下させ, バイキングが実施した実験よりも 3 桁以上精度を上げた生命探査と, 気温・気圧・風速および大気中のダストを観測対象とした火星表層環境のモニタリングを行うことを目指している。探査機および搭載する観測機器の設計, および探査機の安全な着地と運用のためには, 着陸予定地点の環境を事前にある程度把握しておく必要がある。

この問題に対し, 我々は大気大循環モデル, 領域気象モデル, ラージエディシミュレーションモデルの計算結果を基に, 惑星規模から大気境界層スケールにいたる火星表層環境に関する情報を提供することを目指している。メソスケールから大気境界層スケールの環境評価は, 名古屋大学水循環研究センターで開発された CReSS および理化学研究所で開発された SCALE-LES を用いて行うとし, 現在両モデルの火星大気へのチューニング作業と予備的な数値実験を行っている (杉山他 2013; 西澤 他 2013)。惑星規模スケールの環境評価は地球流体電脳倶楽部にて開発されてきた惑星大気大循環モデル DCPAM (高橋他 2012) を用いる。本研究では, DCPAM の計算結果とバイキングおよびマーズパスファインダーの観測結果とを比較し, それに基づいて大気大循環モデルのデータを用いた適切な環境評価方法の検討を行う。次にその方法を用いた探査機の着陸候補地点における環境評価の結果について示す。

2. 使用するデータ

DCPAM はスペクトル法を用いた大気大循環モデルであり, 大気放射等の物理過程は火星に対応したものを組み込んでいる。地表面のアルベドおよび熱慣性の値はマーズグローバルサーベイヤーの観測結果に基づいている。水平切断波数は 31 で対応する水平格子間隔は約 200 km である。鉛直層数は 36 層で, 最下層の高度は約 3 m である。モデルにはマーズグローバルサーベイヤーで観測された平均的なダストの時空間分布を与え, 等温静止状態初期条件とし 7 火星年計算を行う。解析にはその最後の 2 年分の結果をもちいた。

解析する物理量は 3 つの着陸候補地点 (ニュートンクレータ, ニリ溪谷, インディス平原) における地表面温度と地表気圧, 高度 1 m の気温と水平風速, 地表における太陽放射直達成分, 太陽放射散光成分, 空温度 (下向き赤外放射量に対応する黒体温度) である。これらのデータが探査機の設計に必要とされている。解析期間は現在想定している 4 つの到着時期 (Ls = 331, 324, 14, 135) から 90 火星日で, 到着後から 15 火星日毎の各物理量の日変化を調べる。

3. 解析方法の検討と結果

モデルの結果をバイキングおよびマーズパスファインダーとの観測結果と比較する際の問題は, モデルの最下層の高度が観測高度と異なること, モデルの格子スケールで平均した標高は実際の標高とは異なることである。そこで, 気温と風速は地表付近で中立成層を仮定した相似則が成り立つと仮定して観測高度における値を評価し, 地表気圧についてはモデルで計算された気温に対応するスケールハイトを用いて実際の標高における気圧を評価する。比較の結果, 気温についてはモデル第 2 層 (高度約 12.5 m) の計算結果を用いて高度補正を行うと, 観測された気温の日変化をよく再現することがわかった。気圧についてはモデル第 10 層 (高度約 1.35 km) の気温で与えられるスケールハイトを用いて高度補正を行い, さらに全体として 60 Pa 差し引くと観測される気圧の年変化をおおむね再現することが確かめられた。

以上の結果に基づき, 3 つの着陸候補地点の 4 つの探査期間におけるデータの解析を行った。第 1 候補地点であるニュー

PPS02-P03

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 28 日 18:15-19:30

トンクレータ (202.5E, 42.7S) の $L_s = 331$ からの期間については、探査機の熱設計に必要な物理量に着目すると、日平均気温は 190 - 220 K で日変化の振幅は約 50 - 70 K, 空温度は期間中ほぼ一定の値を示し、その値は約 140 K であった。太陽放射の直達成分と散乱成分の最大値はそれぞれ 480 Wm^{-2} と 40 Wm^{-2} となることがわかった。今後はダストの時空間分布を変えた計算結果を解析し、着陸候補地点における気温や気圧などの物理量がどの程度変動しうるかを評価する予定である。

キーワード: 火星探査, 大気大循環モデル, 火星表層環境

Keywords: Exploration of Mars, General Circulation Model, Surface environment of Mars

火星の大気主成分凝結を考慮した MGS 電波掩蔽観測データの再導出とその応用 Estimation of Martian atmospheric composition change caused by CO₂ condensation and its application to radio occultation

池田 さやか^{1*}; 野口 克行¹; 黒田 剛史²; ペッツォルド マーチン³
IKEDA, Sayaka^{1*}; NOGUCHI, Katsuyuki¹; KURODA, Takeshi²; PAETZOLD, Martin³

¹ 奈良女子大学, ² 東北大学, ³ ケルン大学
¹Nara Women's University, ²Tohoku University, ³University of Cologne

We estimated the Martian atmospheric composition change caused by CO₂ condensation using the Ar measurements obtained by Gamma Ray Spectrometer (GRS) onboard the 2001 Mars Odyssey. We applied this estimation of the composition change to the rederivation of the radio occultation (RO) measurements of Mars Global Surveyor (MGS) obtained at polar latitudes of the winter hemisphere, because the MGS RO standard product which is available to the public did not consider the atmospheric composition change by CO₂ condensation. Using the rederived MGS RO measurements, we investigated the occurrence of CO₂ supersaturation in the Martian polar winter atmosphere and found that there were more supersaturation in the rederived data than in the original data.

キーワード: 火星, CO₂, 過飽和, 凝結, 電波掩蔽
Keywords: Mars, CO₂, supersaturation, condensation, radio occultation

(Fe,Ni)₃S相の状態方程式と火星内部構造への適用 Equation of state of (Fe,Ni)₃S phase - Implications for Mars internal structure

赤木 俊介¹; 境 毅^{1*}; 平尾 直久²
AKAGI, Shunsuke¹; SAKAI, Takeshi^{1*}; HIRAO, Naohisa²

¹地球深部ダイナミクス研究センター、愛媛大学, ²高輝度光科学研究センター
¹Geodynamics Research Center, Ehime University, ²Japan Synchrotron Radiation Research Institute

火星内部は、地球同様に地殻、マントル、核の層構造を持つ。特にマントルは上部マントル・マントル遷移層・下部マントルに分かれるが、下部マントルが存在するかどうかは核マントル境界の深さによって決定される。火星の核マントル境界の深さは、マントルと核の密度分布と火星の総質量から決定される。火星の核には鉄の他に硫黄が含まれていると考えられ、密度についてはこれまでFeとFeSの混合物として算出されていた(e.g., Urakawa et al., 2004)。しかし、火星の核に相当する圧力ではFe₃Sという中間化合物が現れることが分かっており(Fei et al., 2000)、この相について考慮する必要がある。またSNC隕石に基づく化学モデルではニッケルの存在も示唆されていることから、ニッケルの密度に与える影響も考慮する必要がある。

我々はダイヤモンドアンビルセルを用いた高圧実験を行い、ニッケルを固溶する(Fe_{0.89}Ni_{0.11})₃S相について火星核に相当する圧力での状態方程式を決定した。γ-Fe (Tsujino et al., 2013), γ-FeNi (Tsujino, 2012), Fe₃S (Seagle et al., 2006), および(Fe_{0.89}Ni_{0.11})₃Sの状態方程式を使って算出された密度に対して線形回帰分析を行い、ニッケルと硫黄が密度に与える効果について明らかにした。SNC隕石に基づく化学モデルによると火星の核は16 wt.%Sと7 wt.%Niとなっている(Sanloup et al., 1999)。さらに核が高温で全体的に融解しているとした場合(Fei and Bertka, 2005)、2%程度の融解による体積膨張(Anderson and Isaal, 2000; Laio et al., 2000)も考慮する必要がある。この場合に核マントル境界深さを算出すると、火星の下部マントルは存在できない可能性があることが分かった。

キーワード: 火星核, 状態方程式, 火星下部マントル
Keywords: Mars core, equation of state, Mars lower mantle

About drift, oscillations and steps of the center of mass of the Moon About drift, oscillations and steps of the center of mass of the Moon

BARKIN, Yury^{1*} ; HANADA, Hideo²
BARKIN, Yury^{1*} ; HANADA, Hideo²

¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia, ²National Astronomical Observatory of Japan, Mizusawa, Japan
¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia, ²National Astronomical Observatory of Japan, Mizusawa, Japan

We have previously predicted and studied a step (abrupt) shift of the center of mass of the Earth in 1997 - 1998 years relatively to the mantle (Zotov, Barkin, Lubushin, 2009). In accordance with the basic provisions of the geodynamic model of excitation of planets and satellites shells (Barkin, 2002) we expected and we expect similar displacements of the centers of mass for other bodies in the solar system (for Mercury, Moon, Sun, Titan, Mars, etc.). Moreover, according to our hypothesis these abrupt geodynamic phenomena for solar system bodies are synchronous (Barkin, 2000) and, in particular, it should appear in 1997-1998. On the Earth, the similar jumps in 1997-1998 were observed in almost all planetary processes (Barkin, 2009). In the case of the Moon similar jump of center of mass obtains a confirmation in the data of laser observations and accounts for a specified period of time 1997-1998.

The jump (step) in the center of mass of the Moon in 1997 on data of laser ranging of reflectors on the lunar surface. On the basis of current laser measurements of distances to reflectors mounted on the Moon the preliminary estimates of the parameters of drift, oscillations and jump of the center of mass of the Moon were obtained. Their dynamic interpretation on the base of a geodynamic model of forced relative oscillations of the shells of planets and satellites has been done (Barkin, 2002). In the paper of G.A. Krasinskii (2003) from the analysis of lunar laser range measurements (or rather their residual differences compared with the theoretical celestial-mechanical design values of ranges) an abrupt (step) changes (in 1997 - 1998) in the coordinates of reflectors on the very substantial distances of about 15 -25 cm in selenographic coordinate system of the epoch have been discovered. Since jumps of coordinates for all four observed reflectors were quite close, it is natural to assume that the jump occurred in the position of the center of mass of the Moon by about 25-35 cm relatively to the lunar crust (in direction toward the Earth). Extremely important here is the fact that the jumps occurred in 1997-1998, as it was predicted by the theory of the unified geodynamic synchronous rhythms in variations of the activity of natural processes on the bodies of the solar system (Barkin, 2000). For the mean values of displacements of reflectors the following values were obtained (in meters): -0.15 +/- 0.04 m (offset along x coordinate - from the Earth), 0.23 +/- 0.07 m (offset on y - east), - 0.23 +/- 0.07 m (offset along z - to the north). Thus in 1997, the center of mass of the Moon abruptly shifted to a geographical point on the lunar surface with coordinates 40.00 N, 32.10 W approximately on distance in 0.36 +/- 0.11 m. According to the Krasinskii work (2003) we have identified trends in the changes of distances to reflectors and their abrupt changes before 1997 and after 1998, with rates of about 0.036 ns / year (before the jump) and at a rate of 0.128 ns / year (after the jump). If we consider only the drift relatively to the axis x, then estimates the drift velocities decrease: 0.98 cm / year - until 1997 and 1.47 cm / year - since 1998. It is expected to perform a spectral analysis of the residual differences of distances in order to identify their cyclic variations (with lunar months periods and with multiple periods).

キーワード: center of mass of the Moon, jumps and trends of center of mass of the Moon, LLR data
Keywords: center of mass of the Moon, jumps and trends of center of mass of the Moon, LLR data

Interpretation of unexplained secular changes of the lunar orbit Interpretation of unexplained secular changes of the lunar orbit

BARKIN, Yury^{1*}
BARKIN, Yury^{1*}

¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

Unexplained secular effects in the orbital motion of the Moon are consequences of the observed phenomenon of remove of the center of mass of the Moon relatively to its mantle and crust toward the back-side. An explanation of anomalous part of secular variation in the longitude of the Moon and in the eccentricity of the lunar orbit has been obtained.

Unexplained secular variation of the eccentricity of the lunar orbit. In the works of James Williams and his colleagues showed that the observed rate of secular change of the eccentricity of the orbit of the Moon in 2.3×10^{-11} 1/year can not be explained within the framework of the classical model of the tides. Earth tides give only a fraction of the value specified in 1.3×10^{-11} 1/year and lunar tides result even effect with the opposite sign and give part of the acceleration in -0.6×10^{-11} 1/year. Remains unexplained an anomalous part of the secular change in the eccentricity (1.6 ± 0.4) $\times 10^{-11}$ 1/year. This value corresponds to abnormal changes in the distances to the perigee and apogee at 6 mm / year. "Abnormal speed distances to the perigee and apogee of the lunar orbit is up to 6 mm / year and its cause is unknown" (Williams J., 2006).

Tidal acceleration and evolution of the Moon's orbit. Laser ranging method proved to be very sensitive to the tidal acceleration of the Moon. Tides on the Earth dominate in the transfer of angular momentum, and energy in the orbital motion, in particular in the removal of the Moon from the Earth. Tidal effects on the Moon are separable from the effects of Earth tides in laser range measurements to the Moon (Chapront et al., 2002; Williams et al., 2009). Full tidal acceleration in the mean orbital longitude (due to the tides of the Earth and the Moon) is estimated at $-25.85''$ 1/cy², corresponding to the removal of the Moon from the Earth at a speed of 3.81 cm / year (Williams et al., 2009). The rate of secular variation of the eccentricity of the lunar orbit $e = (9 \pm 3) \times 10^{-12}$ 1/year also detected on the basis of long laser observations over a period of 38.7 years (March 16, 1970 - November 22, 2008) (Williams, Boggs, 2009). The basis of dynamical studies makes a precision lunar ephemeris DE421, taking into account all of Newtonian and Einsteinian effects. The authors believe that the study of the evolution of the lunar orbit is an important and surprisingly difficult task. Lunar laser ranging provides the numerical values for the two sources of dissipation on the Earth and the Moon.

Possible secular drift of the center of mass of the Moon relative to its crust and mantle toward the back side and an explanation of the anomalies of the orbital motion. In this report we give some first estimations of the possible rate of the secular drift of the Moon center of mass with respect to its crust and mantle in the 10 - 15 mm / year toward the back-side of the satellite. This secular drift of the center of mass of the Moon should be considered by the studying of the orbital motion of the Moon on laser-based observations. Namely, to add to the value obtained by laser observations. The result will be an estimate of the secular increasing of semi-major axis is the center of mass of the Moon. It should be expected that this will obtain the interpretation and explanation of the unexplained part of the secular acceleration of the Moon orbit and the anomalous part of the secular variation of the eccentricity of the lunar orbit, identified according to the perennial laser observations of the Moon. An anomalous part of the orbital acceleration (unexplained) of the Moon is $0.7''$ / cy², and the anomalous part of the secular variation of the eccentricity is characterized by rate in 1.23×10^{-11} 1/year (Williams et al., 2011). Found offset - drift of the center of mass of the Moon (12 - 15 mm / year) is explained by the mechanism of excitation and the relative displacements of the shells of the Moon (solid core, liquid core, mantle) (Barkin, 2002).

キーワード: anomalous secular variation of the eccentricity of the lunar, tidal and non-tidal acceleration of the Moon, the center of mass of the Moon drift

Keywords: anomalous secular variation of the eccentricity of the lunar, tidal and non-tidal acceleration of the Moon, the center of mass of the Moon drift

アポロ月震計データと最新の測月データから推定される月深部構造 Deep interior structure of the Moon inferred from Apollo seismic data and the latest se- lenodetic data

松本 晃治^{1*}; 山田 竜平¹; 菊池 冬彦¹; 鎌田 俊一²; 岩田 隆浩³; 石原 吉明³; 花田 英夫¹; 佐々木 晶⁴
MATSUMOTO, Koji^{1*}; YAMADA, Ryuhei¹; KIKUCHI, Fuyuhiko¹; KAMATA, Shunichi²; IWATA, Takahiro³; ISHIHARA,
Yoshiaki³; HANADA, Hideo¹; SASAKI, Sho⁴

¹ 国立天文台 RISE 月惑星探査権糖質, ² カリフォルニア大学サンタクルーズ校, ³ 宇宙航空研究開発機構, ⁴ 大阪大学
¹RISE Project Office, NAOJ, ²University of California Santa Cruz, ³JAXA, ⁴Osaka University

Internal structure and composition of the Moon provide important clue and constraints on theories for how the Moon formed and evolved. The Apollo seismic network has contributed to the internal structure modeling. Efforts have been made to detect the lunar core from the noisy Apollo data (e.g., [1], [2]), but there is scant information about the structure below the deepest moonquakes at about 1000 km depth. On the other hand, there have been geodetic studies to infer the deep structure of the Moon. For example, LLR (Lunar Laser Ranging) data analyses detected a displacement of the lunar pole of rotation, indicating that dissipation is acting on the rotation arising from a fluid core [3]. Bayesian inversion using geodetic data weakly suggests a fluid core and partial melt in the lower mantle region [4]. Further improvements in determining the second-degree gravity coefficients and the Love numbers will help us to better constrain the lunar internal structure.

Recent analyses of GRAIL data have achieved the improved k_2 accuracy; JPL solution is 0.02405 ± 0.00018 [5], and GSFC solution is 0.02427 ± 0.00026 [6]. The two solutions are consistent with each other within their error bounds, and the accuracy of k_2 is now about 1 %. By introducing the improved gravity coefficients and k_2 from GRAIL mission, the updated LLR data analysis has also resulted in a better h_2 determination. Such accurately-determined Love numbers will contribute to constrain the structure of the lunar deep interior, such as the radius of the possible liquid core. It is difficult, however, to tightly constrain the internal structure from the geodetic data only because there are trade-offs among the structures of crust, mantle, and core. The combination of the Apollo seismic data and the geodetic data therefore afford the key to better determination of the lunar interior structure. We included geodetic data of the mass, the mean moment of inertia, the Love numbers h_2 and k_2 , and 262 P and S travel time data in the analysis.

Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method is used to infer the model parameters. When we used a five-layer model consisting of crust, upper-mantle, mid-mantle, lower-mantle, and core, the core radius is estimated to be 483 ± 22 km, and the core density values tend to be sampled around the assumed lower limit of 3600 kg/m^3 . However, the inferred core radius is significantly larger than the magnetic constraint from SELENE data [7] which predicts the upper bound of the core radius to be 400 km. This discrepancy might be attributed to a possible low velocity layer above the core-mantle boundary which was not included in the five-layer model. We will discuss the results when such a low velocity layer is taken into account.

- [1] Weber et al. (2011), *Science*, 331, 309-312, doi:10.1126/science.1199375
- [2] Garcia et al. (2011), *PEPI*, doi:10.1016/j.pepi.2011.06.015
- [3] Williams et al. (2001), *JGR*, 106, E11, 27,933-27,968
- [4] Khan and Mosegaard (2005), *GRL*, 32, L22203, doi:10.1029/2005GL023985
- [5] Konopliv et al (2013), *JGR*, 118, doi:10.1002/jgre.20097
- [6] Taken from the PDS label of GRAIL Derived Data Products
- [7] Simizu et al. (2013), *Icarus*, 222, doi:10.1016/j.icarus.2012.10.029

キーワード: 月, 内部構造, 重力場, 潮汐ラブ数, グレイル

Keywords: Moon, internal structure, gravity field, tidal Love number, GRAIL

月面での回転観測：可能性と問題点 Observations of lunar rotation on the Moon: possibility and problems.

花田 英夫^{1*}; 鶴田 誠逸¹; 浅利 一善¹; 千葉 皓太²; 稲葉 健太²; 船崎 健一²; 佐藤 淳²; 谷口 英夫²; 加藤 大雅²; 菊池 護²; 荒木 博志¹; 野田 寛大¹; 鹿島 伸悟¹
HANADA, Hideo^{1*}; TSURUTA, Seiitsu¹; ASARI, Kazuyoshi¹; CHIBA, Kouta²; INABA, Kenta²; FUNAZAKI, Ken-ichi²; SATOH, Atsushi²; TANIGUCHI, Hideo²; KATO, Hiromasa²; KIKUCHI, Mamoru²; ARAKI, Hiroshi¹; NODA, Hiroto¹; KASHIMA, Shingo¹

¹ 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, ² 岩手大学工学部

¹RISE Project, National Astronomical Observatory, ²Faculty of Engineering, Iwate University

The lunar rotation is one of the essential and basic target of selenodetic observations for investigation of the interior of the Moon as well as those of gravity fields, and high accuracy of the observations have a potential to detect signals related to the structure of lunar deep interior including the core. We have developed a small telescope like a PZT (Photographic Zenith Tube) for observations of Lunar rotation with the target accuracy of 1 milli-seconds of arc (1 mas)[1]. Theoretical investigation shows that observations by the telescope in the polar area of the Moon will open great possibilities for determining the libration in inclination ρ and node $I\sigma$ with the accuracy much better than before, although the determination of the libration in longitude will not be very well. It also showed that the determination error in the libration angles will not exceed $\sqrt{2\varepsilon}$, where ε is the positioning error of stars and is regarded as 1 milli-seconds of arc [2].

There are several technical problems to be solved in the development of the telescope. Effect of large temperature change is one of the most serious problem for such a precise observation, and we can loosen thermal condition by about ten times by introducing a diffraction lens compared with the case not introducing it. It is possible, on the other hand, that the vibrations of the mercury surface caused by the ground vibrations lead to fluctuations of star positions on CCD as large as 1 second of arc judging from laboratory experiments. The amplitude of the fluctuations depend on the amplitude of the ground vibrations and the depth of mercury pool. We can reduce the effect of the vibrations by making the mercury pool shallow down to the minimum depth. In the case of the mercury pool of 64mm diameter, the depth of 0.5mm is the best according to our experience [3]. It is important to keep the proper period of the mercury pool away from the period of ground vibrations in order to avoid the resonance. It is also effective to lengthen the integration time, and it can improve the reliability of the mean value of the center of a star image by statistical procedure.

We have already made a bread board model (BBM) and we will observe the deflection of the vertical on the ground by using the BBM for the time being in order to evaluate the characteristics of the total system of the telescope.

References

- [1] Hanada, H. et al., Development of a digital zenith telescope for advanced astrometry, *Science China*, 55, 723-732, 2012.
- [2] Petrova, N. and H. Hanada, Computer simulation of observations of stars from the Moon using the polar Zenith Telescope of the Japanese Project ILOM, *Solar Sys. Res.*, 47, 504-517, 2013.
- [3] Tsuruta, S. et al., Stellar imaging experiment using a mercury pool as a ground test of the telescope for In-situ Lunar Orientation Measurements(ILOM), *Proc. 14th Space Science Symposium*, 2014.

キーワード: 回転, 月, 望遠鏡, PZT, 物理ひょう動

Keywords: rotation, moon, telescope, PZT, librations

THE EARTH ORIENTATION PARAMETERS AND THE VARIATION OF THE SECOND ZONAL HARMONIC OF THE GEOPOTENTIAL THE EARTH ORIENTATION PARAMETERS AND THE VARIATION OF THE SECOND ZONAL HARMONIC OF THE GEOPOTENTIAL

BARKIN, Mikhail^{1*} ; FILIPPOVA, Alexandra¹ ; NOVIKOVA, Daria¹ ; PEREPELKIN, Vadim¹
BARKIN, Mikhail^{1*} ; FILIPPOVA, Alexandra¹ ; NOVIKOVA, Daria¹ ; PEREPELKIN, Vadim¹

¹Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

¹Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

The study of the time variations of the geopotential as a result of the rotary-oscillatory processes of the Earth motion is of a significant natural-sciences and practical interest. Oscillations of the Earth's inertia tensor components depend on many factors, among them the mechanical and physical parameters of the planet, the motions of tide-forming bodies, and the observed large-scale phenomena in nature. Time-dependent variations of these and other factors (regular and irregular oscillations, stochastic fluctuations, secular variations) affect the Earth rotary-oscillatory processes and the rotational parameters of the planet. The dynamic processes of the Earth orientation parameters (EOP) in turn have an effect on its figure and lead to the fluctuations of the gravitation field. Observed variations of the EOP, the variations of the Earth's gravitational field and oscillations in the large-scale geophysical events appear to be in a considerable correlation.

An amplitude-frequency analysis of the rotary-oscillatory Earth motion under the action of gravitational-tidal perturbing torques from the Sun and the Moon is carried out using the classical mechanics' methods. The simulation results of the oscillatory process in the motion of the Earth pole and the variations of the second zonal harmonic of the geopotential are studied. Based on the dynamic Euler-Liouville equations expressions for amplitude and phase of the Earth pole oscillations are obtained. A comparison of the spectral power densities of the time series between the Earth pole coordinates and the variations of the geopotential is carried out. A functional dependence of the aforementioned component of the geopotential from the amplitude and phase of the Earth's pole oscillatory process is shown.

キーワード: the rotary-oscillatory processes, secular variations, stochastic fluctuations, geopotential

Keywords: the rotary-oscillatory processes, secular variations, stochastic fluctuations, geopotential

The free and forced librations of the Moon with liquid shell and solid core The free and forced librations of the Moon with liquid shell and solid core

BARKIN, Yury^{1*}; HANADA, Hideo²; MATSUMOTO, Koji²; BARKIN, Mikhail³
BARKIN, Yury^{1*}; HANADA, Hideo²; MATSUMOTO, Koji²; BARKIN, Mikhail³

¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia, ²National Astronomical Observatory of Japan, Mizusawa, Japan, ³Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia, ²National Astronomical Observatory of Japan, Mizusawa, Japan, ³Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

In report we present our results of the study of lunar physical libration of the Moon on the base of its two and three layers models. On the base of analytical solution for two layers model (the Moon with liquid core) and empirical theory of the Moon's rotation (Rambaux, Williams, 2011), we have identified period, amplitude, and the initial phase of the fourth mode of free libration of the Moon, caused by liquid ellipsoidal core. Preliminary results of studies of three-layers model of physical librations of the Moon have been obtained on the base of some simplified approach for the problem of rotation of the Moon with liquid and rigid cores. The plans for future studies of the Moon rotation are discussed.

The modern view of internal structure of the Moon planet takes into account a complex two- or three-layer model. In our work the analytical theory of lunar physical libration based on its two-layer model consisting of a non-spherical solid mantle and of the ellipsoidal liquid core has been developed. The Moon moves on high-accurate perturbed orbit in the gravitational field of the Earth and other celestial bodies. On the base of two layers model of the Moon we have fulfilled systematic studies of the Moon physical librations. And in first we have presented a solution of the problem in components of vector of angular velocity of the Moon. An analytical presentation of LOD of the Moon with high accuracy in form of trigonometric series has here the progressive value. In first we have determined the fourth mode of free libration of the Moon caused by the influence of the liquid core oscillations of pole axis of rotation of the Moon (its mantle), with a long period in 205.7 yr, with an amplitude of $0''$ 0395 and the initial phase of -134° (for the initial epoch 2000.0). This oscillation reflects the so-called phenomenon of free oscillation of the liquid core. The estimates for the dynamic (meridional) oblatenesses of the ellipsoidal liquid core of the Moon: 0.000442 and 0.000283 have been obtained. These fundamental parameters of geodynamics of the Moon could be determined only on the base of data of observations. Earlier the attempts to determine the period of free core nutation undertaken. Our results were obtained by comparing of the developed analytical theory of lunar physical libration with empirical theory libration of the Moon, constructed on the basis of laser observations in last about 40 years (Rambaux, Williams, 2011).

Preliminary results of studies of three-layers model of physical librations of the Moon have been obtained on the base of some simplified approach for the problem of rotation of the Moon with liquid and rigid cores. We have analyzed the Cassini's motion of the decoupled solid core and its librations in longitude to compare with the Moon motions. On the base of Getino, Ferrandiz et al. approach we give estimations of the periods of free librations of this system. We have constructed differential equations of rotational motion of three layers Moon from positions of the Hamiltonian formalism with application of Andoyer's and Poincaré's variables. Now we construct analytical theory of rotation of the Moon system consisting from the non-spherical mantle, ellipsoidal liquid core and solid core.

キーワード: Moon rotation, free libration, liquid core, solid core

Keywords: Moon rotation, free libration, liquid core, solid core

地球の大規模な真の極移動の速度の粘性構造依存性：地球マントル内部の低粘性領域が緩和モードの時定数に及ぼす潜在的影響の評価 Viscosity structure dependence of large-scale polar wander rate of the Earth: A potential impact of a low-viscosity zone

原田 雄司^{1*}; 肖 竜¹
HARADA, Yuji^{1*}; XIAO, Long¹

¹ 中国地質大学地球科学学院行星科学研究所
¹China University of Geosciences

地球の真の極移動の速度に与えるマントル内部の低粘性層の影響に関しては、それ程には多くないが幾つかの研究が行なわれている。種々の地球物理学的制約から、地球マントル、特に最上部や最下部において著しく粘性の低い層が存在する、という可能性が指摘されている。このような極端な粘性の差異は極移動にも或る程度の影響を及ぼす、という事が上述の先行研究で調べられている。

但し、これらの研究で取り扱われていたのは比較的小規模な極移動である。それらのモデル計算は主として後氷期回復による質量再分配に伴う極移動を想定していた。この場合、極移動の典型的な時間スケールは地質学的時間スケールと比べて短く、概ねマントルの粘弾性変形の特徴的時間スケールを反映する。そのような極移動の振幅は大きくても数度程度であり、線形近似された極運動方程式を適用するのが定石である。その一方、今の所、数十度程度の大規模な極移動に対する低粘性層の潜在的影響について議論された研究例は無い。

このような地球内部における粘性の不均質性の影響を検討する事は、観測量から導かれた極移動のシナリオ、特にその時間変化の妥当性を定量的に評価する上で重要であると考えられる。実際の地球の太古の極移動は古地磁気を初めとする地質学的状況証拠から推定されているが、この種の筋書きは上記のようなモデル計算に基づいて初めて物理的に解釈され得る。そのような変遷が起こり得る力学的条件を考察する事によって、当時の粘性構造を制約する観点において有益な情報が得られると期待される。こうした議論をする為には前述のような物理的に特殊な層の効果も重視すべきかもしれない。

そこで本研究では、地球マントル内部における低粘性層の存在が極移動の時間スケールに及ぼす影響について定量的評価を試みた。特に地球内部の力学的応答を特徴付ける粘弾性ラブ数のモデル計算を実施し、ラブ数に含まれる複数の緩和モードの強度と時間スケールの粘性構造に対する依存性について調査した。更にそれらの緩和モードの構造依存性を極移動速度の構造依存性と比較した。尚、数値計算の都合上、緩和モードの算出に際しては地球の層構造を簡略化し、かつ非圧縮性を仮定した。

本計算においては、極運動方程式を非線形のまま積分可能とする準流体近似を適用した。その根拠は、ここで取り扱うような大規模な極移動の場合では線形近似を使えないからである。この準流体近似の適用範囲に従い、ここではアセノスフェアの粘弾性変形の特徴的時間スケールよりも遅い荷重の進化を仮定した。

上述の計算の結果、極移動の時間スケールはほぼ最長期の緩和モードにのみ依存している事が分かった。ここで特筆すべき点は、この極移動において支配的な緩和モードの強度が粘弾性ラブ数全体に占める比率は、実は余り大きくないという事である。それは換言すれば、潮汐変形の振幅がより卓越する他のモードは、極移動の時間スケールに対しては殆んど影響しない事を意味する。これは一見すると奇妙な結果に感じられるかもしれない。

このような依存性を示す理由は、前述した最長期のモードの時間スケールだけが他のモードと比較して桁違いに長いからである。緩和の時定数が長いモードは、たとえ振幅が小さくても長期的に自転軸を安定化する作用を有する。逆に振幅が大きくても時定数が短いモードでは速やかに緩和する為、自転の長期的安定性に対する寄与は小さい。

この結果を踏まえるならば、極移動速度の構造依存性も概ね、この最長期のモードの緩和時間の依存性のみ反映していると言える。実際には、たとえマントル内部の低粘性層を含まない内部構造を仮定しても、このモードの影響は依然として支配的である。そして低粘性層が存在する場合、その粘性が低くなると、それに伴ってこの最長モードの時間スケールも短くなる。最も短い場合では四割にも満たない。但し粘性が或る値よりも低くなると、このモードの時間スケールは一定の値に漸近する。この傾向の理由は、この層の粘性が低過ぎる為、十分に長い時間スケールでは実質的に粘弾性体ではなく流体として振る舞うからである。

以上の計算結果から得られる結論は、一般に地球内部の低粘性層の存在は大規模極移動の時間スケールを短くする事、そしてその影響は主に最長期の緩和モードの時間スケールの変化に起因する事である。確かに地球の大規模極移動の時間スケールの内部構造依存性に関しては既に既存の研究でも議論されている。しかし以前の研究ではマントルの粘性構造が単純化され、その中の低粘性層の影響について検討されていなかった。かつ極移動速度を強く支配している要因も明確には指摘されていなかった。それに対して今回の研究では、この層の影響を明示的に含む極移動の時間スケールを見積もり、不均一な粘性構造が大規模極移動に与える影響が無視出来ない事を示した。

PPS03-P02

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 29 日 18:15-19:30

キーワード: 真の極移動, 地球, マントル, 低粘性層, 緩和モード, 時定数

Keywords: true polar wander, the Earth, mantle, low-viscosity layer, relaxation mode, time constant

Effects of global geodynamics in a series of astrometry observations of latitude at Poltava

KHALYAVINA, Lydmila¹ ; BARKIN, Yury^{2*}
KHALYAVINA, Lydmila¹ ; BARKIN, Yury^{2*}

¹Gravimetry Observatory, Poltava, Ukraine, ²Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

¹Gravimetry Observatory, Poltava, Ukraine, ²Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

Diverse geodynamic phenomena observed in the modern era, received a convincing explanation in the framework of the northern drift of Earth's core. Model proposed and developed by Yuri Barkin relative to the set of ancient geodynamic processes: the secular drift of the Earth's pole, non-tidal acceleration of the Earth's rotation, secular change of gravity, the evolution of the earth's figure, plate tectonics, the formation of specific geological structures, etc.

The North drift of the core generates mass redistribution of the Earth and leads to changes in the gravitational field. Since astrometry instruments have as a reference axis direction of the local plumb line, then this process should be displayed in the slow position changes no polar zenith Observatory. It is shown that for locations in the northern hemisphere, the north drift of the core causes the displacement of local plumb in a southerly direction. Is the picture of long-term changes in the direction of gravity (NST) in the meridian of Poltava for the period 1962 - 2013 based on long-term observations of latitude prismatic astrolabe taking into account: 1) high-precision catalogs (HIPPARCOS, ARIHIP, Tycho-2), 2) improved model of the pole C01 IERS; 3) the theory of the precession-nutation IAU2000; 4) plate tectonics (NUVEL1A-NNR). The resulting long-period changes in NST can be represented as the sum of three components: a linear trend with velocity $\sim -0.0003''$ /yr, the nonlinear part of the trend, consisting of two branches (descending - in 1962 to 1996. And rising - in 1998 and 2010.), which can be regarded as a fragment of a wave with period $T \sim 50$ years and amplitude $A \sim 0.02''$; quasi cyclic part with 11 - year period, close to the main period of index of solar activity period and amplitude $< 0.01''$.

The linear part of the translational displacement means the plumb line to the south of Poltava, which is consistent with the above Barkin's model. The observed velocity of motion of zenith corresponds to moving the center of mass of the Earth in a northerly direction at the velocity in 1.4 cm/yr. Found that the nonlinear part of the trend and the 11-year cyclicity in the shifts of plummet quite clearly reproduce the form of low-frequency polar latitude variations at Poltava derived from model C01 (EOP IERS). Actually observed amplitude of long-period oscillations of latitude caused by pole motion, in 2 times higher than the calculated amplitude. The non-linear part of the trend is the projection on the Poltava meridian of the Markowitz wave.

It is shown that both low-frequency cycles are negatively correlated with the corresponding components of the index of solar activity. The most probable mechanism of solar activity influence on the motion of the pole is the North Atlantic Oscillation. An increase in the amplitude of low-frequency polar displacements of Poltava zenith in astrometric observations requires a special study. One from possible explanations - the influence of the features of the geological structure in the vicinity of Poltava, which is located in the center of the so-called rift Poltava site.

キーワード: plate tectonics, secular change of gravity, Markowitz wave

Keywords: plate tectonics, secular change of gravity, Markowitz wave

Minerals detection on Mars from Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) CRISM data Minerals detection on Mars from Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) CRISM data

Jin Shuanggen¹ ; Barkin Yury^{2*}
JIN, Shuanggen¹ ; BARKIN, Yury^{2*}

¹ 上海天文台, ² モスクワ大学

¹Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, ²Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University

Martian mineral detection and mapping can provide important information and constraints on Martian aqueous history, which can be used to assess the potential habitability of Mars. Degrees of addressing the key question for Martian aqueous alteration are dictated by the depth and extent of grasping the Martian hydrous mineral. Therefore, it is important to know detailed minerals and chemical induction of the existence of water on the Martian surface at past or present. In-situ observations of the Martian rovers, such as Spirit, Opportunity and Curiosity have provided the mineralogical analysis of Martian surface, but restricting in a limited areas. Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) aboard the Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) with enhanced spectral resolution can provide more information at spatial and time scale. In this paper, CRISM near-infrared spectral data are used to identify mineral classes and distribution at Martian Gale region, including kaolinite, chlorites, smectite, jarosite, northupite and salts. The detection of northupite that is indicative of evaporation in Gale region suggests that the Gale region has experienced the climate change from moist condition with mineral dissolution to dryer climate with water evaporation.

キーワード: Martian minerals, Mars Reconnaissance Orbiter, CRISM
Keywords: Martian minerals, Mars Reconnaissance Orbiter, CRISM

小惑星ベスタ形成時のマグマオーシャンの固化過程について The solidification of a magma ocean of Vesta

川畑 佑典^{1*}; 永原 裕子¹
KAWABATA, Yusuke^{1*}; NAGAHARA, Hiroko¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
¹ Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

Asteroid 4 Vesta is the only preserved intact example of a large, differentiated protoplanet. Observations of surface spectra of Vesta provide convincing evidence for a differentiated interior. Vesta is considered as the parent body of HED meteorites.

Whether growing mineral grains remain suspended in the magma ocean or settled out is crucial for the primary interior structure of a planet.

The purpose of this study is to understand the role of grain size of crystals on solidification of a magma ocean under a turbulent flow. We select asteroid 4 Vesta as a subject of this study due to the presence of HED chondrites as a reference. In this study, we consider the solidification before the rheological transition occurs.

We assume that the interior structure of Vesta had already differentiated to form a core. We use the bulk silicate Vesta composition proposed by Righter and Drake (1998), which is a mixture of L and CV chondrites with the ratio of 7 to 3 adjusted for core separation. We calculate liquidus, solidus and solid fractions using the MELTs program (Ghiorso and Sack 1995; Asimow and Ghiorso 1998). In vigorously convective systems such as magma oceans, the temperature distribution is nearly adiabatic and isentropic (Solomatov, 2000).

The heat flux can be calculated with the help of the blackbody radiation. This heat flux must match the heat flux transported to the surface by convection. Convection changes to a regime sometimes called hard turbulence at very high Rayleigh number such as those in the magma ocean, of which heat flux is shown by Siggia (1994).

To describe the rate at which particles settle out of a turbulently convective fluid, we use the model by Martin & Nokes (1989). The particle number is calculated by

$$dN/dt = N(-g\Delta\rho a^2)/(18\nu h)$$

where N is the particle number, g is the acceleration due to gravity, a is the diameter of the particle, $\Delta\rho$ is the density difference between the crystal and the magma, ν is the kinematic viscosity, and h is the depth of the fluid layer (Martin & Nokes, 1989).

The adiabat, liquidus and solidus of the magma ocean of Vesta are very steep, that is, they have negligibly small dependence on pressure.

Thermodynamic calculations with the MELTs program showed that olivine is the first liquidus phase at ~1900K, followed by orthopyroxene and spinel. At the very late stage, clinopyroxene appears consuming orthopyroxene if chemical equilibrium is maintained.

The fluid dynamic evaluation shows that a very small fraction of crystals are separated from the magma ocean until the rheological transition which varied from 100um to 1cm in the current work. The thickness increases with time, which is shown in Figure.

Evaluation of fluid dynamic regime shows that the magma ocean on Vesta was at the hard turbulence regime, suggesting near equilibrium crystallization until the rheological transition takes place at the crystal fraction of 60% at 1649K.

The role of grain size on fluid dynamics is very small, but the amount of crystals settled down to the bottom of the magma ocean has small dependence on the grain size. If the crystal size is 1cm, 1km thickness bottom layer is formed.

The fluid dynamic regime changes into soft turbulence in 100 years in the order in the magma ocean of Vesta.

The summary of our conclusion is as follows.

- (1) The pressure effect in the interior of Vesta is negligibly small.
- (2) The solidification of a magma ocean of Vesta before the rheological transition follows batch solidification.
- (3) The size of crystallizing grains has a minor effect on the evolution of magma ocean until the rheological transition.
- (4) The mantle would be harzburgite if the interstitial melt was effectively extracted at the later soft turbulence stage.

PPS21-01

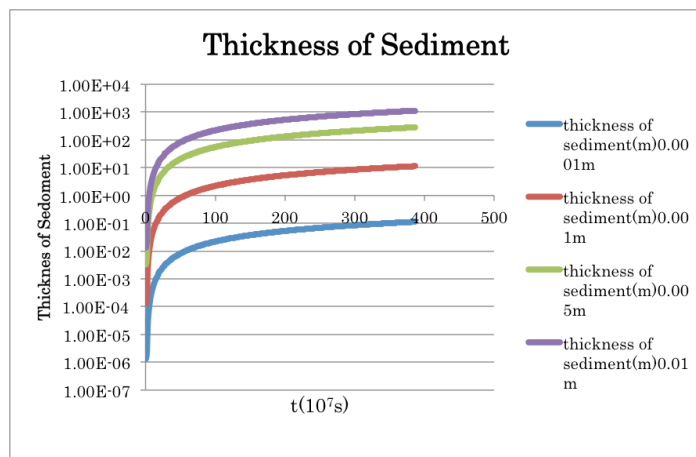
会場:416

時間:4月29日 09:00-09:15

Fig. The thickness of the bottom layer consisting of settled crystals from the main body of a magma ocean.

キーワード: ベスタ, マグマオーシャン

Keywords: Vesta, magma ocean



対流とメルト移動を含むベスタの熱進化数値シミュレーション Thermal evolution simulation of Vesta including convection and melt migration

野上 竜彦^{1*}; 城野 信一²

NOGAMI, Tatsuhiko^{1*}; SIRONO, Sin-iti²

¹名古屋大学 大学院環境学研究科 地球環境科学専攻, ²名古屋大学 大学院環境学研究科 地球環境科学専攻

¹Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Nagoya University, ²Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Nagoya University

小惑星ベスタは、地上で発見される HED 隕石ときわめてよく似た反射スペクトルを持ち、内部が分化していると考えられている。HED とはホルダイト、ユークライト、ダイオジェナイトの頭文字を取ったもので、エコンドライトの一種である。ユークライトは、地表付近において大きい冷却速度で固化したものであり、結晶の粒子の大きさに違いがある。ダイオジェナイトは、ユークライトよりも結晶が成長しており、より地下深くにおいて形成された岩石である。ホルダイトは、ユークライトとダイオジェナイトが砕かれ、角礫化したものを言う。分化したということは、何らかの熱源によりベスタ内部の温度が上昇し、融点に到達した後メルトが生成され表面に移動したと推測される。DAWN の観測によって、ホルダイト層が 50~80km 存在することが分かった。ここから、表面に噴出したメルト量はベスタ全球体積の約 10~20 % に相当する。

ベスタが形成される初期太陽系には、太陽系内にガスや塵が多くあり、それが集積して惑星が形成されたと考えられている。26Al はベスタに含まれる Al のうち 10ppm を占める。しかし、この値はベスタの形成時刻により変化する。26Al は放射性核種であるので、形成時刻が遅ければ遅いほど熱源は失われてしまう。

M. Formisano et al.(2012) ではベスタの形成時刻を計算し、1Ma 以内だと内部が完全溶融することを示した。しかしこの研究では、メルトの対流とメルト移動についての効果を考慮していない。これらの効果を加えると、ベスタが全球的に冷却されるはずなので、より多くの熱源が必要であることが予想される。そこで本研究では、メルトの対流とベスタ表面へのメルト移動の効果を考慮に入れてベスタ熱進化の数値シミュレーションを行った。ベスタ体積の 10 % のメルトが表面に噴出できるように必要な 26Al 量から、ベスタ形成時刻に対して制約を与える。

一次元熱伝導方程式を完全陰解法を用いて数値的に解いた。数値シミュレーションにおいて、全てのメッシュにおいて生成したメルトは一定の割合 $a(0 < a < 1)$ で上方に移動すると仮定した。対流は Kaula(1979) のモデルを使用した。含まれる 26Al の量を変化させることで、ベスタ形成時刻を変化させた。

シミュレーションの結果、対流が内部の熱進化を大きく変化させることが明らかとなった。対流を考慮しない場合は内部の温度が 8000K までも上昇するのに対して、対流を含めると 1700K までしか上昇しない。ベスタ形成時刻はメルト噴出量に左右される。 $a=0.8$ の時は 26Al 崩壊開始後 70 万年以内にベスタが形成される必要があり、 $a=0.5$ の時は 25 万年以内にベスタが形成されなければならないことが明らかになった。一方で、アルミが全く崩壊していない場合では、 a が少なくとも 0.3 以上でなければ 10km のメルト層が実現できないことが分かった。このシミュレーション結果から、以前の見積もりに比べてベスタはかなり早い段階で形成される必要があることが示唆される。

ガラスビーズ焼結体の熱伝導率測定実験と微惑星熱進化への応用 Thermal conductivity measurements of sintered glass beads and application to planetesimal thermal evolution

津田 彰子¹; 坂谷 尚哉^{2*}; 小川 和律³; 田中 智³; 荒川 政彦⁴; 本田 理恵⁵
TSUDA, Shoko¹; SAKATANI, Naoya^{2*}; OGAWA, Kazunori³; TANAKA, Satoshi³; ARAKAWA, Masahiko⁴; HONDA, Rie⁵

¹ 東京大学, ² 総合研究大学院大学, ³ 宇宙科学研究所, ⁴ 神戸大学, ⁵ 高知大学

¹University of Tokyo, ²The Graduate University for Advanced Studies, ³Institute of Space and Astronautical Science, ⁴Kobe University, ⁵Kochi University

微惑星は原始太陽系円盤内においてダストが集積した天体であり、太陽系天体の多様性を生む分岐点となる天体である。その形成過程や内部構造進化などの描像を制約することは惑星形成論における重要な課題である。特に微惑星の熱進化を知ることは微惑星の描像を理解する上で重要であり、その熱進化を解明する上で最も重要なパラメータの一つは微惑星構成物質の熱伝導率である。

微惑星をダストの集積物とした場合、熱進化過程を経て温度が上昇すると焼結と呼ばれる現象が起こり、粒子同士が接着する。焼結が起こる前の粉体の熱伝導率に関しては近年研究が進んでいる。しかし、焼結体の熱伝導率を真空下で測定した例はない。ダストが焼結すると、ダスト間にネックと呼ばれる結合部が形成される。焼結が進むことにより、ネックの成長や空隙率の減少が起こる。これらの変化により、全体の熱伝導率は上昇することが予想される。

粉体の熱伝導率と圧力の関係を測定した先行研究から、空隙率が一定であっても、粒子間の接触サイズにより熱伝導率が大きく変化することが知られている。すなわち、空隙率のみでなく、焼結によるネックサイズの変化にともなう熱伝導率の変化を知ることが重要である。

そこで、本研究では焼結による熱伝導率の変化を微惑星の熱進化計算に取り入れるため、粉体焼結体の熱伝導率を測定し、粉体熱伝導率に対する焼結の効果を定量的に明らかにすることを目的とした。特に、真空化における焼結体の熱伝導率のネックサイズ依存性に着目した。

用いたサンプルは粒径約 250、500、1000 μm の 3 種類のガラスビーズである。各サンプルは一定の加熱温度の下で加熱時間を変えることにより、3 種類の焼結度を持つ焼結体を作成した。焼結ビーズを一粒ずつ分離し、ネックの割れ跡の面積を測定することによって、ネックサイズを推定した。一方、熱伝導率測定には、焼結体内部に埋め込まれたニクロム線加熱時の温度上昇率から熱伝導率を推定する方法である line heat source 法を用いた。測定は常温において行い、熱伝導率測定時の真空度は約 0.01 Pa であった。

ネックの観察によって、平均ネック比(粒子半径に対するネック半径の比)が 0.075 から 0.30 の異なる焼結度を持つサンプルを作成できたことを確認した。これらの熱伝導率は 0.036 から 0.25 W/mK であった。これらの値は、同種の未焼結粉体の真空中での熱伝導率よりも 10 倍以上高い値である。焼結体試料の空隙率は約 40% で一定であり、熱伝導率とネック比の間には比例関係が見られた。すなわち、ネック比 0.3 未満の焼結初期段階では、焼結体の熱伝導率は空隙率の減少ではなくネックの成長による熱伝導率の増加を考慮する方が本質的であることが分かった。

最後に、本実験で得られた熱伝導率とネック比の関係をを用いて、微惑星の熱進化計算を行った。主なパラメータとして、微惑星半径を 1 から 1000 m、形成年代を CAI 形成後 1 から 3 Myr、ダストの粒径を 1 から 1000 μm の範囲で与えた。その結果、焼結による熱伝導率の上昇を考慮したことにより、この効果を考慮しない場合の結果よりも微惑星の内部温度は 1000 K 以上下がるということが分かった。加えて、微惑星内部の温度構造やネックサイズの分布(言い換えると、強度分布)は微惑星のサイズや形成年代、構成する粒子の粒径などに依存し、変化に富むことが分かった。

擬物質の摩擦実験から考察する摩擦挙動に対するメルトの影響と深発月震への考察 The effect of melt on frictional behavior and the implication for deep moonquake

東 真太郎^{1*}; 片山 郁夫¹
AZUMA, Shintaro^{1*}; KATAYAMA, Ikuo¹

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

これまでアポロ計画の月震観測 (Passive Seismic Experiment) によって、12,000 以上の月震イベントが観測されている (e.g., Nakamura 2003)。それらの月震イベントは主に、熱月震、インパクトによる月震、浅発月震、深発月震と4つに分類される (Latham et al., 1969)。この中で最も興味深いのは深発月震である。なぜなら、月の半径が約 1735 km に対して、800-1200 km の深さで深発月震は観測されており、先行研究から考えられている温度圧力から、明らかに塑性変形が支配的と考えられる領域だからである。通常は破壊や滑りが起こらない塑性変形領域で月震が起こるメカニズムを実験的に検証することが本研究の目的である。これまで月の内部はドライな状態だと考えられてきたが、最近になって月には水が存在することがわかってきた。さらに月の比較的深い場所 (~800km) にも、水が存在している可能性が、鉱物の電気伝導度からも議論されている (Karato 2013)。水は岩石の様々な物理パラメーターに大きな影響を及ぼすことが分かっているが、その1つとして岩石の融解温度を大きく下げる働きをすることがわかっており、この効果を考慮すると、深発月震の深さで部分溶融が起こっている可能性がある。Weber et al. (2011) は月震データとモデリングから 1200km の深さ付近に部分溶融層が存在していることを示唆している。そこで、この部分溶融が月震を引き起こす1つの原因であるという仮説を立て、低温で部分溶融を起こすことのできる模擬物質 (Borneol-diphenylamine) (Takei 2000) を用いて、2軸摩擦変形試験機を使用して摩擦実験を行った。この Borneol-diphenylamine を用いることで部分溶融度とメルトの濡れ角を調節することができる。実験結果から摩擦係数とピークストレスを観察した。我々の実験結果から、ぬれ角 30° のときは部分溶融度が大きくなればなるほど、摩擦係数とピークストレスは減少することが分かった。しかし、ぬれ角 0° のときは摩擦係数は大きく減少するが、部分溶融度が増加しても摩擦係数は変化しない。これはメルトが界面を完全に濡らすことで、力学的挙動がメルトによって完全に支配されていることが原因であると考えられる。摩擦係数におけるメルトの効果は3つ期待される。1つは実験で示された摩擦係数を下げる効果、2つ目はメルト自体が間隙圧として働く効果、3つ目はメルトによって周囲の水が抜き取られることで剪断の局所化が誘発される効果である。Byerlee の法則によると、摩擦強度は惑星の深さ (圧力) に比例して増加するため、深発月震の発生深度ではとても大きくなる (月内部の上載岩圧から計算すると 5GPa 以上)。しかし、上述した3つの効果を考慮すると、摩擦強度が劇的に減少することが考えられる。3つ目の効果として挙げた剪断の局所化の効果は定量的に評価するのは困難であるが、このメルトの効果によって摩擦強度が劇的に下がることで塑性変形領域でも摩擦による変形が起こりえるのかもしれない。

キーワード: メルト, 深発月震, 月, 摩擦挙動

Keywords: melt, deep moonquake, moon, frictional behavior

粉体対流の速度スケージングとそのレゴリス移動の時間スケールへの応用 Velocity scaling of granular convection and its application to timescale of regolith migration

山田 智哉^{1*}; 桂木 洋光¹
YAMADA, Tomoya^{1*}; KATSURAGI, Hiroaki¹

¹ 名古屋大学大学院 環境学研究所

¹ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

小惑星のイトカワには、表面のレゴリスが流動化・分級したと考えられる痕跡がある [1]。また、サンプルリターンにより持ち帰られた粒子の分析から、その宇宙線照射年代はおよそ 8Myr と比較的若いことが分かった [2]。これらの観測結果を説明するための仮説の一つとして、“天体衝突起源の地震動でイトカワ表面のレゴリスが流動化、移動することによって表面が更新された可能性”が提唱されている [1]。実際、地上の室内実験ではレゴリスのような粉体に振動を加えると、粉体対流が生じることが知られている (e.g. [3])。しかし、イトカワのような微小重力環境下で生じる粉体対流の対流速度に関する定量的な議論はこれまで十分になされてない。一般に、室内実験で重力を変化させることは難しい。そこで、本研究では室内実験で粉体対流の対流速度と重力加速度 g の満たすスケージング関係を次元解析により求めた。得られたスケージング関係から対流速度の重力依存性を実効的に求めた。また、得られたスケージング関係から粉体対流によるレゴリス粒子の表面移動時間の推定を試みた。

実験では粉体試料として直径 $d=0.4, 0.8, 2$ mm のガラスビーズを用いた。粉体を入れる容器は内半径 $R=16.5, 37.5, 75$ mm の円筒形アクリルセルを用い、ガラスビーズを高さ $H=20\sim 110$ mm の範囲で積層させた。電磁式の振動装置 (EMIC 513-B/A) で容器全体に鉛直振動を加え、最大振動加速度と重力加速度の比を表す Γ ($\Gamma=A(2\pi f)^2/g$; A : 振動振幅, f : 振動数, g : 重力加速度) を 2~6 の間で、 f を 100~300 Hz の間で変化させ、粉体対流を発生させた。円筒容器壁面での粉体の流れ場を高速カメラ (Photoron SA-5) により 1000 fps で撮影し、鉛直方向の対流速度 v_z を PIV (Particle Image Velocimetry) を用いて算出した。 v_z の最大値 v_{zmax} を重力と粒子径が作る特徴速度 $(gd)^{1/2}$ で無次元化し、これと振動と重力のエネルギーバランスを表す無次元パラメーター $S=(2\pi Af)^2/gd$ [4] および無次元システムサイズ $L=(RH)^{1/2}/d$ の 2 つのコントロールパラメーターとのスケージング関係を求めた。

系統的な次元解析の結果、 v_{zmax} は上記の無次元数を用いて $v_{zmax}/(gd)^{1/2} \sim S^{0.47} L^{0.82}$ と表されることが分かった。 S, L にその定義を代入すると、重力依存性は Γ 一定の条件の下で $v_{zmax} \propto g^{0.97}$ と表せることが分かった。これより、微小重力環境では対流速度は g にほぼ比例して遅くなるとが明らかになった。一方、本実験では L は無次元の対流ロールサイズともいえる。得られたスケージングから、 L を無次元対流ロールサイズとみなすことでレゴリス粒子の表面移動時間を見積もると、対流ロールサイズの時間スケールへの影響が少なくなることも分かった。本発表では粉体対流による粒子の移動と宇宙線照射年代 8Myr との整合性の詳細検討の結果についても議論する。

- [1] H. Miyamoto *et al.*, Science **316**, 1011 (2007)
- [2] K. Nagao *et al.*, Science **333**, 1128-1131 (2011)
- [3] A. Garcimartín *et al.*, Physical Review E **65**, 031303 (2002).
- [4] P. Eshuis *et al.*, Physics of Fluids **19**, 123301-1 (2007)

キーワード: 粉体対流, スケージング, 重力加速度, レゴリス移動, イトカワ

Keywords: granular convection, scaling analysis, gravitational acceleration, regolith migration, Itokawa

粉流体を伝播する衝突励起地震に関する実験的研究 Experimental study on impact-induced seismic wave propagating in granular materials

松本 恵里¹; 保井 みなみ^{2*}; 荒川 政彦¹
MATSUMOTO, Eri¹; YASUI, Minami^{2*}; ARAKAWA, Masahiko¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 神戸大学自然科学系先端融合研究環

¹Graduate school of Science, Kobe University, ²Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

はじめに：固体天体の表層及び内部構造を調べる直接的な方法として、地震波（弾性波）の伝播を測定、解析する地震波探査がある。現在まで地震波探査が実際に行われたのは地球と月のみであるが、今後は他の固体表層を持つ惑星や小惑星での探査も検討されている。その上で、限られた期間で地震波探査を行うには人工体を標的天体に衝突させて地震波を発生させる能動的な方法が望ましく、そのためには人工震源が必要不可欠である。しかし、実際に人工震源を用いるには、衝突エネルギーとそれによって励起される地震波の励起・伝播特性の関係を明らかにすることが重要である。この関係は探査に必要な地震計の感度や、地震波が測定可能な震源からの距離（範囲）の推定に用いることができ、さらに将来、地震波形から衝突エネルギーを推測することで、その天体の衝突フラックスの推定にも応用できると期待される。そこで、我々は室内クレーター形成実験を行い、発生する地震波を加速度計で観測し、励起される地震波の励起・伝播特性の弾丸物性依存性を明らかにした。

実験方法：衝突実験は神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を用いて行った。弾丸は、直径10mm、高さ10mmのポリカーボネート円柱と、直径3mmのステンレス球とアルミナ球を用いた。ステンレス球とアルミナ球は、ポリエチレンのサポに入れて衝突させた。衝突速度は約100m/sとした。標的は200ミクロンのガラスビーズを用いた。それを直径300mm、高さ100mmの容器に深さ80mmになるように入れ、標的の表面に3つの加速度計（応答周波数<10kHz）を衝突点から距離を変えて設置した。また観測された地震波は、データロガー（A/D変換効率100kHz）で電圧として記録した。

結果：弾丸が標的に衝突した瞬間から地震波が加速度計に到達する時間と衝突速度を用いて、標的を伝播する地震波の伝播速度を計算した結果、 $105 \pm 15 \text{ m/s}$ となった。また、3種類の弾丸の最高加速度 g_{max} と規格化距離 x/R （ x :衝突点からの距離、 R :クレーター半径）の関係は $g_{max} = 268(x/R)^{-2.8}$ となった。伝播速度と最高加速度の経験式から、標的が同じであれば弾丸種類に依らず地震波は同じような波形をもって減衰することがわかった。また、最高加速度を保つ地震波の継続時間は約0.3msとなり、これはNiimi *et al.* (2011)の弾丸貫入モデルから求めた弾丸貫入時間と桁で一致した。McGarr *et al.* (1969)は、弾丸の貫入時の運動量の力積 I と弾丸の持つ運動エネルギー E_k の比を、衝突エネルギーから地震波エネルギーへのエネルギー変換効率と定義している。本研究でエネルギー変換効率を計算した結果、 $1.6 \times 10^{-2} \pm 1.0 \times 10^{-2}$ となった。一方、レキサン弾丸を2~8kmで砂標的に衝突させたMcGarrの実験では、 $6 \times 10^{-6} \pm 4 \times 10^{-6}$ であった。このことから、エネルギー変換効率に弾丸の速度依存性があることが示唆された。

キーワード: 衝突励起地震, 粉流体, 減衰過程, 惑星探査, クレーター形成, 加速度計

Keywords: impact-induced seismic wave, granular materials, decay process, planetary exploration, crater formation, accelerometer

斜め衝突による Impact jetting の速度計測 Velocity measurements of impact jetting during oblique impacts

黒澤 耕介^{1*}; 長岡 洋一¹; 長谷川 直²; 杉田 精司³; 松井 孝典¹

KUROSAWA, Kosuke^{1*}; NAGAOKA, Yoichi¹; HASEGAWA, Sunao²; SUGITA, Seiji³; MATSUI, Takafumi¹

¹ 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ³ 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻

¹PERC, Chitech, ²ISAS, JAXA, ³Dept. of Complexity Sci. & Eng., The Univ. of Tokyo

平板同士がある臨界角以上の角度で斜めに衝突すると、接触点から衝突速度よりも速く物質が放出される現象は 1950 年代から知られていた。これは Impact jetting と呼ばれている。Impact jetting には (1) 衝突速度よりも高速の物質を生成すること、(2) Jetting で放出される物質は現象の中で最も強い衝撃加熱を受けること、という 2 つの重要な特徴がある。そのため惑星科学においてもコンドリュール、テクタイト、衝撃生成ガラスの起源、巨大衝突で発生する Jet による冥王星、月の起源を説明する過程として検討されてきている。

天体衝突による Impact jetting を検討するためには球が衝突する状況で起こる現象を理解する必要があるが、球形状飛翔体を用いた実験データが非常に限られており、十分に理解されているとは言えない。特に Jet の速度に関しては、非公表データを含む 3 点が報告されているのみである。Jet 速度は Jet の生成を記述する理論モデルを構築する上で重要なアンカーであることは言うまでもない。

我々は千葉工業大学惑星探査研究センターに設置された新型二段式軽ガス銃を用いて球形状飛翔体の高速度斜め衝突実験を行った。100 ns/frame の時間分解能で Jet 生成過程を捉え、世界で初めて Jet 速度を衝突速度と標的ショックインピーダンスの関数として得ることに成功した。その結果衝突速度で規格化した Jet 速度 (Jet 速度比) は衝突速度の増加とともに減少すること、Jet 速度比は標的のショックインピーダンスが大きいほど大きくなることが明らかとなった。

次にこのデータ・セットを用いて Jet 理論の構築を試みた。得られた結果は、(1) 衝突速度を衝突面に垂直な成分と水平成分に分離し、Ang により提唱された現象論的 Jet モデルに当てはめると実験結果をうまく再現できること、(2) Jet 速度は、衝突速度の水平成分、弾丸の変形速度、放出点からの粒子飛び出し速度の和でも表すことができることがわかった。(2) のモデルはまだ preliminary であるがこれまで現象論的な理解にとどまっていた Jet 速度に物理的な説明を与えるものである。

最後に惑星科学的な応用について議論する。我々のモデルは実際の天体衝突時においても衝突速度の 2.5 倍の速度を持つ Jet が発生することを示唆する。空力加熱率は速度の 3 乗に比例するため、大気を持つ惑星/衛星上ではこれまで予測されなかった強い加熱を受け、極めて高温の電離プラズマが発生することが期待される。このような高温プラズマが緩和していく際には周辺に強い EUV 放射を放つであろう。例えばタイタンのような炭化水素を多く含んだ大気中では激しい化学反応が引き起こされると期待できる。これまでタイタンの地表付近での化学反応のエネルギー源は極めて高いエネルギーを持つ銀河宇宙線しかないと考えられてきた。Impact jetting は時間的空間的に局所的ではあるが、タイタン地表付近の化学反応を駆動する重要なエネルギー源であったかもしれない。

キーワード: 天体衝突, 斜め衝突, 高速ビデオカメラ, 撮像計測, ジェットティング, タイタン

Keywords: Hypervelocity impacts, Oblique impacts, High-speed video camera, Ultrafast imaging observation, Impact jetting, Titan

隕石海洋衝突下でのアミノ酸の安定性：生物有機分子の化学進化への応用 The stability of amino acids in early ocean by meteorite impacts: Implication for chemical evolution of biomolecules

梅田 悠平^{1*}; 関根 利守¹; 古川 善博²; 掛川 武²; 小林 敬道³

UMEDA, Yuhei^{1*}; SEKINE, Toshimori¹; FURUKAWA, Yoshihiro²; KAKEGAWA, Takeshi²; KOBAYASHI, Takamichi³

¹ 広島大学理学研究科, ² 東北大学理学研究科, ³ 物質・材料研究機構

¹Graduate School of Science, Hiroshima University, ²Graduate School of Science, Tohoku University, ³National Institute for Materials Science

地球上の生命の誕生過程を知る上で、生命の基本構成物質であるアミノ酸の起源、安定性、化学進化などについて考察することはタンパク質の起源、さらに生命の起源に直結する重要な研究課題である。初期地球における生物有機分子の生成や化学進化には莫大な量のエネルギーが必要であったと推察されており、その候補には隕石の衝突、落雷、紫外線、放射線などがある (Furukawa et al., 2009; Miller, 1953; Groth and Weyssenhoff., 1960; Barnun et al., 1970)。

先行研究により、鉄を主成分とする隕石が原始海洋に衝突することにより引き起こされる化学反応が初期地球上に局所的な還元的環境 (アンモニアが存在する環境) を生みだし、その結果として無機炭素から単純なアミノ酸 (グリシン) やアミン類、カルボン酸類など様々な有機分子を生成しうることが示唆されている (Nakazawa et al., 2005; Furukawa et al., 2009)。しかし、現状ではこのように生成した有機分子の生成メカニズムやその安定性について不明な点が多く、さらに生体高分子への更なる化学進化に関する議論は一切行われていない。そこで本研究では、後期重爆撃期 (38-41 億年前) においての高頻度で激しい隕石の海洋衝突によるアミノ酸の化学反応を再現するべく、アミノ酸 (アラニン) 水溶液に対して衝撃回収実験を行った。実験は隕石物質を模擬したオリビンおよびヘマタイトの固体粉末に初期海洋を模擬したアミノ酸水溶液を浸み込ませたものを試料として使用した。出発試料のアラニンは実験による生成物と汚染物を区別するために、¹³C でラベルされたものを用いている。これらを金属製の試料容器に封入し、試料の背後には空気の層が存在する条件で実験を行った。また、周囲の化学種や、酸素分圧が実験生成物の量や種類に及ぼす影響について検討するために、先行研究により生成が確認されたアンモニアとベンゼンを出発試料に加えた実験や、固体粉末試料についてオリビンとヘマタイトを使い分ける実験を行った。実験後、抽出した水溶液を東北大学にて、液体クロマトグラフ質量分析計 (LC/MS) を使用し、四種類のアミノ酸 (グリシン、アラニン、バリン、フェニルアラニン) と四種類のアミン (メチルアミン、エチルアミン、プロピルアミン、ブチルアミン) について定量分析を行った。回収した固体試料については、X 線回折分析により鉱物種を同定するとともに、熱力学的計算により、実験における酸素分圧を推定した。LC/MS 分析の結果、出発試料のアラニンは全ての回収試料から検出され、高温・高圧下においても一部は生存しうることが分かった。また、衝撃圧力が高くなるにつれて、アラニンの残存率は低くなるという傾向が見られた。また、実験による新たな生成物として ¹³C からなる多種のアミンも検出された。特にオリビン粉末を隕石物質として用い、アンモニアとベンゼンを系内に加えた試料から、出発試料のアラニンよりも炭素数が一つ多いブチルアミンの生成が確認された。回収試料の XRD 分析の結果は、ヘマタイト (Hm) および出発試料には無いマグネタイト (Mgt) のピークを示し、酸素分圧が Hm-Mgt バッファー近傍であったことが明らかになった。そのような酸素分圧の高い環境ではアラニンの分解がより進み、アミンの生成が支配的になる事が分かった。

本研究結果から、後期重爆撃期の隕石海洋衝突において、アミノ酸は生き残る事が可能であるとともに、隕石の衝突エネルギーはアミノ酸の化学進化に重要な役割を果たすということが分かった。また、その化学進化は隕石衝突により発生する温度・圧力だけでなく、周囲に存在する化学種や酸素分圧にも影響を受けるという事が明らかになった。

CH₄/CO₂ 大気中での遠紫外線による有機物エアロゾル生成 Organic aerosol experiments for CH₄/CO₂ atmospheres using a hydrogen/helium UV lamp

洪 鵬^{1*}; 関根 康人¹; 杉田 精司¹
HONG, Peng^{1*}; SEKINE, Yasuhito¹; SUGITA, Seiji¹

¹ 東京大学 複雑理工学専攻
¹Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo

有機物エアロゾルはメタンに富む還元的な惑星大気中で光化学反応によって生成されるが、その生成経路は実験的にあまり制約されていない。酸素濃度が増大する以前の原始地球においては、有機物エアロゾル層が反温室効果 (Pavlov et al., 2001) または間接的温室効果 (Wolf and Toon, 2010) によって地表温度に大きな影響を与えていたことが推測されているが、エアロゾル生成経路の不定性のため、これまで見積もられてきたエアロゾルの生成率や光学的厚みには大きな不定性が内在しているのが現状であった (Trainer et al., 2006)。そこで我々は、有機物エアロゾルの生成経路を制約するため、室内実験を行い、CH₄/CO₂ 大気中での遠紫外線 (FUV) によるエアロゾル生成率の (1)FUV フラックス依存性、および (2) CH₄/CO₂ ガス比依存性を調べた。波長 110nm より長波長における模擬太陽紫外光として、ライマンアルファ線の発光強度が卓越することが知られている、水素・ヘリウム混合ガスを用いた紫外線光源を用い、FUV フラックスは N₂O ガスおよび CO₂ ガスを用いたアクチノメトリー法によって計測した。また反応容器内の基板の上に堆積する有機薄膜の膜厚の時間変化を分光エリプソメトリーによって計測することで、エアロゾル生成率を得た。その結果、エアロゾル生成率は FUV フラックスに対して 1 次関数的に増加することがわかった。このことは、タイタン大気中で観測されているエアロゾル生成率を、原始地球や系外惑星などの他の還元的な惑星大気に外挿した場合、生成率は低く見積もられることを意味する。またエアロゾル生成率の CH₄/CO₂ ガス比依存性を調べた結果、CH₄/CO₂ 比が 1 を下回ると生成率は急速に低下することがわかった。この実験結果を解釈するため、我々はさらに 1 ボックス光化学モデルを構築し、実験条件における反応経路を解析した。光化学モデルは 791 反応、134 分子種 (C₈ 分子まで) を含む。モデルの妥当性は、幾つかの主要な中間生成ガス (CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, CO, CO₂) の濃度の計算結果と、質量分析によって計測されたそれらのガスの濃度を比較することで確認した。高次の炭化水素の計算結果から、実験で得られた CH₄/CO₂ ガス比に対するエアロゾル生成率の依存性とベンゼンを介する重合反応の反応率の相関が良いことがわかった。このことはベンゼンがエアロゾルの生成を律速していることを示唆している。一方で、過去の光化学モデルでエアロゾル生成反応に寄与すると仮定されていた C₄H₂ などのポリンの重合反応は、エアロゾル生成率とあまり相関が良くないことがわかった。そのかわりポリンはベンゼンを生成する上での前駆体として重要であることがわかった。以上の結果と紫外線光量に対する結果ともあわせて、タイタンでのエアロゾル生成率を元に、原始地球でのエアロゾル生成率を見積もると、過去の研究による見積もりより 2 桁程度小さくなることがわかった。この理由は、先行研究ではエアロゾルの生成に直接関与しない分子も含めての生成率を計算していたため、遠紫外線によるエアロゾル生成量を過大評価していたことが原因である。これらの結果から、原始地球においては遠紫外線で生成されるエアロゾル層は光学的に薄く、反温室効果も間接的温室効果も聞かないことが推測される。一方で原始地球においてはメタン・二酸化炭素・水・エタンなどの他の赤外活性気体による温室効果ガスが卓越していたであろうことが示唆される。本発表ではさらに、タイタン大気中で高い生成率を持つと見積もられている、高エネルギー粒子の入射によって駆動されるニトリル反応による有機物エアロゾル生成の可能性についても議論する。

キーワード: 有機物エアロゾル, 光化学, 室内実験, 還元的な大気

Keywords: organic aerosol, photochemistry, laboratory experiment, reducing atmosphere

周惑星ガス円盤中で形成する巨大氷衛星の原始大気 Proto-atmosphere on giant icy satellites forming within gaseous circum-planetary disks

三上 峻^{1*}; 倉本 圭¹
MIKAMI, Takashi^{1*}; KURAMOTO, Kiyoshi¹

¹ 北海道大学理学院宇宙理学専攻

¹Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

巨大氷衛星ガニメデ、カリスト、タイタンはサイズと平均密度が似るにも関わらず、表層環境が顕著に異なる。特にタイタンは太陽系の衛星として唯一厚い大気を持ち、その地表面気圧は地球の1.5倍にも上る。その主成分であるN₂は、近年の探査機カッシーニのデータから、NH₃のような他の窒素分子種に由来する可能性が高いことが示唆された。しかし、N₂がいつどのように生成されたのかは未解決の問題であり、これは、集積期の巨大氷衛星の物理状態について不明な点が多いことに起因する。

最近有力視される衛星形成理論によると、巨大氷衛星をはじめとする規則衛星は低温・低圧な周惑星円盤において比較的長い時間をかけて集積成長する。そのような形成条件では、集積期の巨大氷衛星は非常に寒冷な環境にあったとする主張があるが、そこでは原始大気の保温効果が無視されている。しかし低温の円盤環境下では巨大氷衛星は大量の円盤ガスを捕獲し、蒸発した氷成分とともに厚い原始大気を形成する可能性がある。

そこで本研究では、このような混合型大気の構造と保温効果について数値モデルを構築して検討した。原始大気は衛星ヒル半径において薄い周惑星円盤に静力学的に接続する。大気成分として円盤ガス成分であるH₂、Heと材料物質中の氷に含まれるH₂OとNH₃を考慮し、衛星の地表面温度の関数として放射対流平衡構造を求め、大気上端の熱放射フラックスを算出した。また、それぞれの衛星形成場領域の円盤条件はCanup and Ward (2002)をもとに、ガニメデ軌道では150 K、カリスト軌道では120 K、タイタン軌道では50 Kとして計算を行った。

どの円盤条件においても、地表面温度が273 K以上の場合には、H₂Oの寄与により大気が光学的に厚くなり、大気上端からの熱放射フラックスは大気無しの場合より顕著に小さい。一方、地表面温度がより低い場合、ガニメデ・カリストの条件下では熱放射フラックスは黒体放射に漸近する。これは背景温度が比較的高いために大気のスケールハイトが大きく、低圧で光学的に薄い大気となるからである。一方、タイタンの条件下では、同じ地表面温度に対し、黒体放射に近い熱放射フラックスを持つ解に加え著しく熱放射フラックスの小さな解も出現する。後者の解は、背景温度が低いために重力的に強く束縛された光学的に厚い大気が形成されることに対応している。

ここから、タイタンでは、集積エネルギーの解放が完了したのちも、比較的高温(～200 K)の原始大気が保持されると考えられる。安定性の解析から、ガニメデやカリストの原始大気は円盤ガスの散逸に追従して失われるのに対し、タイタンのそれは残存すると考えられる。この場合、氷成分から揮発したNH₃が高分圧で維持されると期待される。現在のタイタン大気のN₂はこのNH₃が光化学反応プロセスを経ることで生成されたのかもしれない。

キーワード: 巨大氷衛星, 大気, 周惑星円盤

Keywords: Giant icy satellite, Atmosphere, Circum-planetary disk

原始太陽系星雲中で集積する火星の大気形成と熱進化 Atmospheric formation and thermal evolution of a proto-Mars growing in the solar nebula

齊藤 大晶^{1*}; 倉本 圭¹
SAITO, Hiroaki^{1*}; KURAMOTO, Kiyoshi¹

¹ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻
¹ Cosmo Sci., Hokkaido Univ

火星は寡占成長により形成した原始惑星の唯一の生き残りと考えられている。多数の微惑星が原始火星へ衝突することで、衝撃加熱による融解が引き起こされ、コアが形成される。これは火星由来隕石の年代学からの示唆と調和的である。これらの衝突はまた、微惑星から H₂O 等の揮発性成分の脱ガスも引き起こし、大気形成に貢献したと考えられる。寡占成長は原始太陽系星雲ガス中で進行するため、集積成長中の原始火星は星雲ガスおよび、脱ガス成分の双方からなる原始大気を獲得していた可能性が高い。このようなハイブリッド型原始大気は惑星表面の熱収支や惑星表面-内部間での揮発性成分の分配に重要な役割を果たした可能性がある。

そこで、本研究では、星雲ガス、脱ガス成分の2層からなるハイブリッド型原始大気を想定した1次元放射対流平衡モデルを構築した。ここで、上層は星雲ガス成分由来の H₂-He 大気層、一方下層は微惑星脱ガス成分由来の H₂O に富んだ大気層を仮定する。また、輻射輸送には、H₂, He および H₂O による吸収を考慮する。放射対流平衡構造は、集積エネルギーフラックスと均衡する熱的光度および、脱ガス成分大気量の関数として得られる。H₂, He から成る脱ガス大気成分のモル比を、金属-シリケートとの化学平衡状態にある 1:5 とした。また、火星の集積時間は、惑星形成論および年代学的に矛盾のない 10⁶-10⁷ 年と置いた。

H₂-He のみで構成される大気の場合、地表面温度は 700 K 以上になることはない。一方、脱ガス成分の大気量が火星質量の 1% より多ければ、地表面温度は岩石の融点の目安である 1500 K を超える。もし微惑星が H₂O をはじめとする揮発性成分を十分に含有していたとすると、集積中の火星には、原始大気の保温効果によって、惑星全体を覆うマグマオーシャンが形成した可能性がある。このような全球的マグマオーシャンは、コアの形成やマグマや金属鉄に溶解した揮発性成分の内部輸送を促進させた可能性がある。

Line-by-line 放射計算による水蒸気大気の放射特性 Line-by-line calculations of radiation properties for exoplanets with steam atmosphere

大西 将徳^{1*}; はしもと じょーじ²; 倉本 圭³; 高橋 芳幸¹; 高橋 康人³; 石渡 正樹³; 林 祥介¹
ONISHI, Masanori^{1*}; HASHIMOTO, George²; KURAMOTO, Kiyoshi³; TAKAHASHI, Yoshiyuki O.¹; TAKAHASHI, Yasuto³; ISHIWATARI, Masaki³; HAYASHI, Yoshi-yuki¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 岡山大学大学院自然科学研究科, ³ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻
¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, ²Department of Earth Sciences, Okayama University, ³Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

水蒸気を多く含む大気では、地表面温度と無関係に大気上端からの放射フラックスが一定になってしまう射出限界を持つことが知られており (Simpson 1927, Nakajima et al., 1992)、惑星大気の進化と深い関わりを持っている。Hamano et al., 2013 では中心星からの放射が射出限界よりも大きい場合と小さい場合で、地球型惑星の進化形態が異なることが報告された。一方、最近では系外惑星の直接撮像観測の例も報告されており、地球型惑星の放射スペクトルの観測も期待されている。水蒸気を多く含む地球型惑星の放射スペクトルを得ることができれば、そのスペクトルから惑星の大気や表層環境、また進化の段階を推定できる可能性がある。そのためには、水蒸気大気を持つ惑星の放射スペクトルがどのようなものになるのかを数値シミュレーションにより計算する必要がある。放射スペクトルを正しく計算するためには line-by-line 計算が有効であり、水蒸気大気を line-by-line 法で計算した研究として Goldblatt et al., 2013 がある。しかしこの研究は地表の水の量を地球の海洋質量 (270bar) 分与えて計算しており、異なる地表水量を持つ惑星の計算例はない。そこで本研究では、水蒸気大気を持つ多様な系外惑星の放射特性を計算するために、地表水量と地表温度をパラメタとして水蒸気大気を持つ惑星からの放射を line-by-line 法で計算した。

H₂O の吸収断面積は HITEMP2010 (Rothman et al., 2010) と MT_CKD 連続吸収モデル (Mlawer et al., 2012) を用いた。大気は水蒸気のみ対流平衡の温度分布を与え、地表面温度は 250~2000[K]、地表面の H₂O 量は 0.01~5 地球海洋質量まで変化させた。H₂O の吸収断面積の計算を効率的に行うために、温度と圧力ごとの吸収断面積をあらかじめ計算し、そのテーブルをもとに cubic spline 補間をして必要な吸収断面積を計算した。放射伝達計算は 2 方向近似を用い、波数分解能は 0.01[cm⁻¹] で line-by-line 法により計算を行った。

本研究で計算された射出限界は 282[W/m²] であった。射出限界の値は Goldblatt et al., 2013 とよく一致しているが、1 海洋質量を与えた場合、放射の立ち上がりは Goldblatt et al., 2013 よりも高温で立ち上がるという結果を得た。地表水量が少なくなるほど、低い地表面温度で放射は立ち上がり、0.01 海洋質量の場合には、1000[K] 以下で放射が増大する。この時 10 μm、4 μm 付近の大気の窓領域から多くの放射が出ている。また 1500[K] 以上では、大気がとても厚くなるため、0.01 海洋質量をもつ惑星の場合でも地表面からの赤外放射は直接観測できないことが明らかとなった。

キーワード: 水蒸気大気, 放射過程, 射出限界

Keywords: steam atmosphere, radiative property, radiation limit

地球型惑星の地表水分布と暴走温室限界 Dependence of the runaway threshold on water distributions on the surface of Earth-like planets

新田 光^{1*}; 阿部 豊¹; 大石 龍太²; 阿部 彩子²
NITTA, Akira^{1*}; ABE, Yutaka¹; O'ISHI, Ryouta²; ABE-OUCHI, Ayako²

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 東京大学大気海洋研究所
¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, ²Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo

液体の水は惑星気候に大きく影響を与える物質であることに加えて、生命の生存可能性を議論する上でも重要な物質である [e.g. Kasting et al., 1993]。この液体の水が地表に存在する惑星、すなわち水惑星は大きく3つのタイプに分類され、[1] 海惑星 (地表が全て海で覆われた、水量の十分多い惑星)、[2] 部分海惑星 (海と陸が存在するが、海はほぼ全て1つに繋がっている現在の地球のような惑星)、[3] 陸惑星 (水が南北両極域に局在化している、水量の少ない惑星)、と呼ばれている [Abe et al., 2013, Hawaii, Kona]。どのタイプに分類されるかは水の量、地形によって決まる地表水輸送と、大気循環による水蒸気輸送のバランスによって決定される。

この地表の水は、ある閾値をこえる中心星放射を惑星が受け取った時、存在できなくなることが知られている。これは強い温室効果気体である水の正のフィードバックが原因で、このような状態を暴走温室状態と呼び、暴走状態に達する閾値については現在に至るまで数多く議論がなされている [e.g. Abe and Matsui, 1988; Nakajima et al., 1992; Leconte et al., 2013]。ただし、陸惑星と海惑星との違いなど、地表水分布に依存した閾値の議論についてはあまり多くない。

Abe et al. [2011] では、3次元モデルを用いて初めて陸惑星が再現され、暴走温室状態に陥る条件が計算された。その結果、地球サイズの惑星では、海惑星が相対太陽放射で130%程度の中心星放射を受け取ると暴走状態に陥るのに対し、赤道域の良く乾燥した陸惑星は170%の強度の放射を受け取っても地表の水分布は維持された。但し、ここでは限定的な陸惑星状態についての議論に留まっており、水分布の多様性とその影響については言及されていない。

Takao [2013] では、南北1次元のエネルギーバランスモデルと鉛直1次元放射対流平衡モデルを組み合わせ、地表水の緯度分布と暴走温室限界の関係について計算が行われた。これによって、緯度方向の水の局在化の程度で暴走温室限界が異なることが明らかになった。しかし、この南北1次元モデルでは、経度方向の水分布についての議論はできない。また、力学的な大気循環による影響が考慮されていないという課題があった。

そこで我々は、3次元モデルにより地球型惑星の地表水分布が暴走温室限界に与える影響を系統的に知ることを目的とし、3次元モデルとしてGCMを用いたモデル実験を行った。

今回我々はCCSR/NIES AGCM 5.4g [Numaguchi, 1999] を用い、大気中の水蒸気循環を計算した。このGCMでは力学的な大気循環に加え、放射過程、雲形成過程などが計算されており、地球の大気循環、気候をよく再現している [Numaguchi, 1999]。但し、このGCMでは水の量や地形による地表水輸送を計算することが出来ない。そこで我々は地表水分布を境界条件として与えることで様々なタイプの水惑星を想定し、太陽放射を徐々に上げていき、暴走温室状態に陥らず地表の水が維持できる上限を求めた。

緯度方向に水分布を与えて実験を行った結果、Takao[2013]と同様に、局在化の程度によって暴走温室限界に達する中心星放射の強度変化することが分かった。水が十分局在化した状況では180%の相対太陽放射でも地表の水が維持される一方、水分布が低緯度まで広がると、ハドレー循環による水蒸気輸送の効果により130%程度の放射でも暴走状態に突入した。また、経度方向に水分布を与えた結果、全球積分した水面積が等しくても、水分布が異なる場合は相対太陽放射で最大10%程度の違いが暴走温室限界に現れることが分かった。

キーワード: 暴走温室限界, GCM, 地球型惑星
Keywords: runaway greenhouse, GCM, Earth-like planet

原始惑星系円盤における電場加熱によるデッドゾーン Dead zones by electric heating in protoplanetary disks

森 昇志^{1*}; 奥住 聡¹
MORI, Shoji^{1*}; OKUZUMI, Satoshi¹

¹ 東京工業大学

¹Tokyo Institute of Technology

現在, 原始惑星系円盤の形成初期の角運動量は, 磁気回転不安定性 (MRI) に起因する磁気乱流によって円盤の外側へ輸送されると考えられている. 一方で, 原始惑星系円盤は電離度が低いため, 磁気乱流を維持するほど電流が流れられず, 磁気回転的に安定な領域 (デッドゾーン) が存在する (Sano et al., 2000). 原始惑星系円盤における乱流は, サブミクロンサイズのダストからキロメートルサイズの微惑星まで, その成長に影響を及ぼす. そのため, いつ, どこに, どの程度の乱流が存在するかを知ることは惑星形成を考える上で無くてはならない.

本研究では電子の電場加熱による電離度の変化に着目する. これまで原始惑星系円盤での磁気乱流に関する研究は, 常に電子の温度は中性ガスの温度に等しいとしている. しかし, 磁気乱流の成長による電場の上昇は非常に強い電場を形成し, 電場による電子の加熱が無視できない可能性がある (Inutsuka & Sano, 2005). 高温な電子はダストに吸着されやすいため, 気相の電子の数密度は減少する. これらの結果として, ある電場強度の範囲では, 電場の上昇に伴い電離度が減少する (Okuzumi & Inutsuka, in prep). 電離度の値は乱流の強さに影響を及ぼす. そのため原始惑星系円盤における電子の電場加熱の重要性を検討する必要がある.

本研究では原始惑星系円盤で電子の電場加熱による電離度の減少が起こる領域を求めた. 従来のデッドゾーンの外側では, 磁気乱流と共に電場が発達するとして, 電場に対する電離度の値を計算した. その結果, ダストサイズ $0.1 \mu\text{m}$, 縦磁場の強さ 0.05G , ダストガス質量比 0.01 の最小質量円盤では, 70AU まで電場加熱によって電離度が減少する領域が広がることを明らかにした. また簡単な見積もりによって, この領域では従来考えられていたような激しい乱流は起きないことが示唆された.

キーワード: 原始惑星系円盤, 電離度, ダスト, 磁気乱流, 電場加熱

Keywords: protoplanetary disk, ionization degree, dust grains, MHD turbulence, electric heating

焼結ダストアグリゲイトの衝突破壊 Collisional disruption of sintered dust aggregates

城野 信一^{1*}; 上野 春太¹
SIRONO, Sin-iti^{1*}; UENO, Haruta¹

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹ Graduate School of Environmental Sciences, Nagoya University

原始惑星系円盤と呼ばれる、ガスとダストからなる円盤の中で惑星系が形成される。その第一段階はダスト微粒子の付着成長である。付着成長により、ダスト微粒子が集合したダストアグリゲイトが形成される。このダストアグリゲイトがさらに衝突を繰り返すことにより成長してゆくと考えられている。周囲のガスと運動が分離するようになるとダストアグリゲイトは中心星方向に落下を始める。このまま中心星に落下してしまうと惑星形成につながらないため、落下するダストアグリゲイトを捕獲し、微惑星を形成するメカニズムが多く提案されている (Kretke & Lin 2007, Lyla et al. 2009, Sandor et al. 2011 等)。また、落下途中で引き続き衝突合体が進行することにより直接合体成長で微惑星を形成するシナリオも存在する (Okuzumi et al. 2012)。これらの研究ではいずれにしてもダストアグリゲイトの運動がガスと分離することが前提とされている。ダストアグリゲイトとガスの運動が分離するとき、ダストアグリゲイトの中心星方向への落下速度は 1m/s 程度である。したがって、この程度の落下速度になる大きさまでダストアグリゲイトは成長する必要がある。ここまでの成長は可能であろうか？

実験的には、ミクロンサイズの SiO₂ ダストアグリゲイトの衝突破壊速度は m/s のオーダーである (Blum 2010)。H₂O 氷を用いた実験においても、同程度の衝突破壊速度が得られている (Shimaki & Arakawa 2012)。ただし、室内実験では地球重力のため、原始惑星系円盤で形成されるような空隙率の非常に高いアグリゲイトを用いることは困難である。そこで本研究では高空隙率ダストアグリゲイトの衝突の二次元数値シミュレーションを行った。H₂O が主体である氷ダストアグリゲイトの焼結に着目した。原始惑星系円盤の広い範囲で焼結が進行する可能性が指摘されている (Sirono 2013)。焼結が進行すると、ダスト微粒子間の結合部が成長し、力学的性質が大きく変化する。ダスト微粒子間の結合力を変化させることで焼結の効果を取り入れた。新たに生成したダスト微粒子間の接触については、従来用いられているモデル (Dominik & Tielens 1997) を用いた。

焼結が十分進行したアグリゲイトでは、低速度 (~10cm/s) においてもカタストロフィックな破壊が観察された。これは、ダスト微粒子の転がり運動によって結合が容易に破壊されるためである。一方で、焼結がそれほど進行していないアグリゲイトではこのような破壊は観察されず、焼結していない場合と大きな違いは無かった。これは転がり運動によって破壊された結合がすぐに再接触によって焼結していない結合に変化するためである。また、これらの結果は仮定する H₂O の破壊強度に依存しており、強度の増加とともに破壊速度は上昇した。本研究の結果から、原始惑星系円盤における氷ダストアグリゲイトの進化はその形成場所によって多様であることが予想される。

キーワード: ダストアグリゲイト, 原始惑星系円盤, 衝突破壊, 焼結

Keywords: dust aggregate, protoplanetary nebula, collisional disruption, sintering

微惑星の大きさと原始惑星系円盤の乱流との関係について Planetesimal size and protoplanetary disk turbulence

小林 浩^{1*}; 田中 秀和²; 奥住 聡³

KOBAYASHI, Hiroshi^{1*}; TANAKA, Hidekazu²; OKUZUMI, Satoshi³

¹名古屋大学大学院理学研究科, ²北海道大学低温科学研究所, ³東京工業大学

¹Nagoya University, ²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, ³Tokyo Institute of Technology

原始惑星系円盤の中で、1km よりもずっと大きな天体は重力フォーカシングが効くため、暴走成長を起こし固体惑星やガス惑星の中心核を形成する。暴走成長を起こすと、系の大半の質量は暴走成長が始まったサイズのまま止まり、大きな天体(原始惑星)は円盤各領域に1つだけ形成される。このような成長が止まり原始惑星のその後の成長の材料となる天体が微惑星と考えられている。一方で、固体微粒子が集まってできた大きな天体も微惑星と呼ばれており、この2つが必ずしも一致する物ではない。近年の研究で、微惑星が衝突合体で形成されることが示唆されており、この場合、連続的に成長するため微惑星の定義はより曖昧になる。そのため、暴走成長が始まるサイズを微惑星と呼ぶのが妥当であろう。実際、小惑星帯では天体のサイズ分布から暴走成長が始まったサイズが分かり、その大きさは100km程度である。暴走成長開始は、微惑星のランダム速度がその表面脱出速度よりも小さくなり重力による衝突断面積増大効果が働き始める時点で決まる。ガス円盤の乱流は、この微惑星ランダム速度を増大させ、暴走成長開始時期を遅らせられる効果がある。つまり、乱流の強さにより、微惑星のサイズが決まり、形成される惑星の大きさもそれにより決められる。以上をシミュレーションにより確認し、太陽系の惑星の形成や、小惑星帯の天体のサイズ分布を決めるために必要な乱流の強さの動径方向の分布について議論する。

キーワード: 微惑星, 原始惑星系円盤, 小惑星, サイズ分布, 惑星形成

Keywords: Planetesimal, Protoplanetary disk, Asteroids, The size distribution of bodies, Planet formation

タイプ I 軌道移動するコアからのガス惑星形成 The formation of gas planets from cores in type I migration

前島 直彦^{1*}; 渡邊 誠一郎¹
MAESHIMA, Naohiko^{1*}; WATANABE, Sei-ichiro¹

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻

¹Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Nagoya University

観測により、ガスをまとっていると考えられる巨大惑星が多数発見されている。そのようなガス惑星の原始惑星系円盤中の形成のためには、円盤ガスが完全に散逸する前に固体惑星（ガス惑星のコア部分に相当）は臨界コア質量 M_{crit} まで成長する必要がある。ただし、コアは円盤ガスとの相互作用により、トルクを受けて動径方向に移動する（タイプ I 軌道移動）。従来の研究では、コアは M_{crit} に達する前に負のトルクにより短時間で中心星に落下するとされていた（Ward 1997, Tanaka et al. 2002）。しかし最近の研究によれば、ガスについて非等温過程を考慮すると共回転トルクと呼ばれるトルクにより、コアが外向きに動ける領域が円盤中に形成される（Baruteau & Masset 2008, Paardekooper & Papaloizou 2008）。結果としてトルクが 0 になる「平衡半径」ができ、もしコアがその場所に捕らえられれば軌道移動速度は円盤進化速度程度に低下するため、内側へ落下せずガスを捕獲できる可能性が示唆される。ただし正のトルクは限られた質量（ $M_{p,min} < M_p < M_{p,max}$ ）のコアにしか働かない（Kretz & Lin 2012）。そのため $M_p = M_{p,min}$ となるまでに時間がかかると、その間に負のトルクによって大きく内側へ移動してしまうということも起こりうる。本研究では円盤物理量に依存してどのようにコアが軌道移動・質量成長を行うのかを調べ、ガス惑星形成のために円盤が持つべき条件を求めた。

円盤のガス面密度分布は粘性拡散・photoevaporationによって進化し、温度は粘性加熱・中心星放射で与える。そのような円盤では加熱主機構が粘性加熱から中心星放射へ遷移する領域に平衡半径ができる。本研究ではその平衡半径でのガス惑星形成可能性について調べる。惑星コアは自身の重力圏にある微惑星を集積しながら成長し、 M_{crit} に達したら周囲のガスを捕獲する。

結果、円盤物理量に依存して、ガス惑星形成条件は以下のように決まることが分かった。進化の速い円盤（乱流粘性の α パラメータ = 0.005）では、円盤質量が大きい段階（初期ガス質量降着率 $\sim 10^{-7} M_{\odot} yr^{-1}$ ）で、しかもコア成長の材料が豊富にある状況（固体物質/ガス比 > 0.03 ）でコア成長が始まれば、円盤の中間領域（ ~ 10 AU）で形成されたコアは成長途中で平衡半径に捕らえられ、そこで M_{crit} に達した結果、ガス惑星が形成される。それに対し、進化の遅い円盤（ $\alpha = 0.001$ ）あれば、円盤質量が小さくなった段階（初期ガス質量降着率 $\sim 10^{-8} M_{\odot} yr^{-1}$ ）でコア成長が始まってもガス惑星は形成される。この場合、固体/ガス比に対する依存性は弱い。

キーワード: タイプ I 軌道移動

Keywords: type I migration

微惑星集積による原始惑星の自転の研究 Protoplanet Spin by Planetesimal Accretion

柴田 雄^{1*}; 小久保 英一郎²

SHIBATA, Takashi^{1*}; KOKUBO, Eiichiro²

¹ 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻, ² 国立天文台

¹University of Tokyo, ²National Astronomical Observatory of Japan

惑星系形成において微惑星の寡占的成長を経て形成される原始惑星の自転について調べた。現在の標準的な惑星系形成シナリオでは、惑星系は原始惑星系円盤とよばれるガスとダストから構成される星周円盤から形成される。まずダストが集積して数キロメートルほどの微惑星が形成される。微惑星は公転をしながら衝突合体を繰り返し成長していく。成長は初期は暴走的、すなわち大きな微惑星ほど速く成長する。原始惑星(暴走成長微惑星)の質量が臨界値を超えると、暴走的成長は減速し、成長モードは寡占的成長となる。ここでは原始惑星は軌道反発によって一定の軌道間隔を保ちながら、秩序的に成長していく。本研究では、この原始惑星の形成過程において微惑星集積によってもたらされる自転角運動量を多体シミュレーションによって調べた。多体シミュレーションでは微惑星系の軌道進化、集積進化、自転進化を矛盾なく調べることができる。原始惑星の自転は、その合体条件に影響するため、原始惑星の巨大衝突による地球型惑星形成を考える上で重要である。また、原始惑星の自転角運動量は、巨大衝突によって形成される地球型惑星に継承されるため、地球型惑星の自転にも影響する。さらに、現在の火星は原始惑星の生き残りであると考えられているため、原始惑星の自転を調べることは火星の自転の起源を調べることにつながる。計算の結果、原始惑星の自転角速度は、質量の増加とともに小さくなる傾向がみられ、原始惑星の典型的な自転角速度は回転不安定の臨界角速度の1/10ほどの小さい値となった。質量が小さい微惑星が原始惑星にランダムな方向から多数衝突合体すると、微惑星のもたらす角運動量は、ほぼ相殺して正味の角運動量が非常に小さくなり、原始惑星の自転角運動量はあまり変化しない。しかし、微惑星の集積で質量は増加するため、それに伴い自転角速度は減少する。よって質量が大きいものほど自転角速度は小さくなる。原始惑星の自転軸傾斜角は等方的に分布し、天王星のような横倒しの軸をもつものが多いことがわかった。これは微惑星円盤の厚みが微惑星のサイズよりはるかに大きく、さらに微惑星の速度分散が大きいために衝突が等方的に起こることによる。原始惑星の自転の微惑星固体密度、微惑星初期質量に対する依存性も調べた。原始惑星の自転角速度は、固体密度の増加とともに大きくなり、 $\omega \propto \rho^{1/2}$ の関係が得られた。また、微惑星初期質量が大きいほど自転角速度の質量依存性が弱くなることがわかった。しかし、自転軸傾斜角の分布が等方であることは変わらない。今回の計算は、合体条件に完全合体を仮定し、円盤ガスによる抵抗を考慮していないので、得られた自転角速度は原始惑星形成で得られる自転角速度の上限であると考えられる。

土星リング中の小衛星へのリング粒子の重力集積 Gravitational accretion of particles onto moonlets embedded in Saturn's rings

安井 佑貴^{1*}; 大槻 圭史¹; 台坂 博²
YASUI, Yuki^{1*}; OHTSUKI, Keiji¹; DAISAKA, Hiroshi²

¹ 神戸大学理学研究科, ² 一橋大学商学部

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, ²Graduate School of Commerce and Management, Hitotsubashi University

Collision and gravitational accretion of particles is an important issue related to the origin of ring-satellite systems of giant planets in the solar system. The Hill radii of Pan, Daphnis, Atlas, and Prometheus are found to be within 15 % of the observed long axes of these satellites given by the best-fit model ellipsoids. Also, the densities of these satellites (0.4 - 0.6 g cm⁻³) are very low compared to the density of water ice and all approximately equal to the critical density at that distance, which is defined as the density of a body that entirely fills its Hill sphere. From these results, the small satellites within the orbit of Pandora are thought to be formed by accretion of small porous ring particles onto large dense cores, and further accretion seems to have been suppressed when the density of the satellite reaches the critical density at that distance. Local N-body simulations also demonstrated that a Hill sphere-filling body is produced by accretion of small porous particles onto a large dense core. However, it has not been studied how the degree of particle accretion onto moonlets in the inner parts of Saturn's rings depends on the distance from Saturn.

The shapes of these small ringmoons would also provide clues to the dynamical evolution of Saturn's rings. The fact that the shapes of these ringmoons approximately match those of their associated Hill sphere suggests that the moonlet cores were surrounded by a number of particles when they were formed. On the other hand, Pan and Atlas have the characteristic shapes with equatorial ridges, and are thought to be formed by two stages. First, their precursors whose shapes are similar to their Hill sphere without equatorial ridges were formed when the rings were thick. Then, equatorial ridges were formed through particle accretion onto the equatorial planes of the above formed objects after the rings became sufficiently thin and also before ring particles diffused. However, effects of dynamical properties of the rings on the shaping of moonlets formed by particle accretion have not been examined in detail.

Propeller-shaped structures have also been found in Cassini images of Saturn's rings. These propeller-shaped features are explained by gravitational interaction between ring particles and unseen embedded moonlets. From these observations, the sizes and orbital distributions of these unseen embedded moonlets are obtained, and such information provide us with clues to the evolution of the ring-satellite system. The propeller-shaped structures are mainly observed in the A ring. Recently, observations of similar structures have also been reported for the Cassini Division, and the B and C rings. Although some of these moonlets either may be collisional shards resulting from the breakup of a bigger icy progenitor ring body or may have formed by accretion of small low-density ring particles onto larger dense fragments, the origin of these moonlets is not clear.

Using local N-body simulation, we examine gravitational accretion of ring particles onto moonlets in Saturn's rings. We find that gravitational accretion of ring particles onto moonlets is unlikely to occur at radial locations interior to the outer edge of the C ring, unless the density of the moonlets is much larger than that of water ice or non-gravitational cohesive forces play a major role. Detailed analysis of accretion process of individual particles onto moonlets shows that particle accretion onto high-latitude regions of the moonlet surface occurs even if the rings' vertical thickness is much smaller than the moonlet's radius. The degree of particle accretion in outer rings is found to depend significantly on rings' vertical thickness and optical depth. Our results suggest that large boulders recently inferred from observations of transparent holes in the C ring are likely to be collisional shards, while propeller moonlets in the A ring would be gravitational aggregates formed by particle accretion.

キーワード: 重力集積, 小衛星, 土星リング

Keywords: gravitational accretion, moonlet, Saturn's rings

Super-Earthの大气散逸進化：惑星組成と起源への制約 Mass-Loss Evolution of Super-Earths: Constraints on Their Compositions and Origins

黒川 宏之^{1*}; カルテネッガー リサ²; 中本 泰史³
KUROKAWA, Hiroyuki^{1*}; KALTENEGGER, Lisa²; NAKAMOTO, Taishi³

¹名古屋大学, ²マックスプランク天文研究所, ³東京工業大学
¹Nagoya University, ²Max Planck Institute for Astronomy, ³Tokyo Institute of Technology

ケプラー宇宙望遠鏡によるトランジット観測を始めとする近年の観測の進展により、低質量の系外惑星が次々に検出されてきている。その中で多数発見されている地球サイズから海王星サイズの惑星は総称して Super-Earth と呼ばれている。太陽型星の3割ほどがこの Super-Earth を持つと見積もられており (Howard et al., 2012)、Super-Earth は宇宙に数多く存在する惑星である。従って、Super-Earth の組成、ひいては起源を理解することは、惑星の形成と進化を理解する上で極めて重要である。

本研究では特に、質量・半径がともに測定されている Super-Earth を用いて、理論計算との比較をもとに Super-Earth の組成を決定する要素について議論する。Super-Earth の組成の特徴として、水素ヘリウムエンベロープの有無が挙げられる。岩石を主体とすると考えられる高密度の Super-Earth が存在する一方、低密度で形成時に獲得したエンベロープを保持していると考えられる Super-Earth も存在する。このような特徴は惑星質量・軌道半径などの違いが原始惑星系円盤ガス捕獲量の違いが生まれたか、もしくは形成後の中心星 XUV(X-ray と EUV) 放射駆動の大气散逸によって一部の Super-Earth からエンベロープが失われたこと (Lopez et al., 2012 など) に起因すると考えられる。また、Super-Earth の組成については、質量・半径が測定されていても、岩石・氷・水素ヘリウムの存在比が一意に決定できないという、組成の縮退の問題がある。大气透過光の多波長観測が最も直接的に組成を制約する方法であるが、最近のハッブル宇宙望遠鏡を用いた高精度観測では極めて平坦なスペクトルが観測され、大气上層に雲が存在している可能性が示唆された (Kreidberg et al., 2014; Knutson et al., 2014)。Super-Earth の大气において一般的に雲が存在する場合、観測的に大气組成を制約することが困難となる。

本研究では、この 1.Super-Earth のエンベロープの有無の起源, 2.Super-Earth の組成の縮退という問題について、大气散逸進化計算から制約を行う。特に今回の発表では中心星のスペクトル型に着目する。恒星はスペクトル型によって全波長積分した光度と XUV 光度の比が異なるため、同じ平衡温度となる軌道半径で比較すると XUV 照射量が異なる。この性質を用いて、Super-Earth のエンベロープの有無の起源における形成過程の影響と大气散逸過程の影響を分離して理解することを試みる。本研究の大气散逸進化計算の結果得られたエンベロープを失う閾値となる軌道半径・平衡温度は中心星スペクトル型ごとに異なるが、質量・半径の測定されている Super-Earth が発見されている G 型星、K 型星、M 型星のそれぞれについて、Super-Earth のエンベロープの有無の傾向と整合的である。このことから、Super-Earth のエンベロープの有無の起源は、大气散逸によるエンベロープの剥ぎ取りであることが示唆される。この場合、Super-Earth の組成の縮退の問題についても、やや低密度の Super-Earth の中で中心星に十分近いものはエンベロープをもたず、氷組成であることが示唆される。そのような中心星近傍の氷惑星はスノーライン以遠で形成し、惑星移動を経験したと考えられる。

本研究ではさらに大气散逸モデルの不定性や恒星の XUV 光度進化の不定性の影響を評価し、結果の妥当性について議論を行う。

キーワード: 系外惑星, 大气散逸, 組成, スーパーアース
Keywords: exoplanet, atmospheric escape, composition, super-Earth

赤外アストロメトリ法による褐色矮星周りの惑星探査 Exoplanet exploration for brown dwarfs with infrared astrometry

山口 正輝^{1*}; 矢野 太平¹; 郷田 直輝¹
YAMAGUCHI, Masaki^{1*}; YANO, Taihei¹; GOUDA, Naoteru¹

¹ 国立天文台

¹National Astronomical Observatory of Japan

アストロメトリによる系外惑星探査は最も古くから行われている惑星探査法である。にもかかわらず現在アストロメトリ法によって発見された惑星の数はわずか1つにとどまる。これは惑星の質量が中心星の質量に比べて十分小さく、惑星重力による中心星のふらつきが観測しにくいためである。そこで我々は太陽の10分の1以下の質量を持つ褐色矮星をターゲットとして、将来のアストロメトリ衛星を用いて発見できる惑星の公転周期、惑星質量を調べた。

褐色矮星周りの惑星については現在5つ見付かっており、そのすべてで質量比10分の1を超える。距離10pc、公転周期1年、質量比10分の1の褐色矮星惑星系に対しては、中心星の軌道運動の見込角は3ミリ秒角に達する。これは将来のアストロメトリ衛星である小型JASMINE、Gaiaで十分検出可能である。これらの検出機器の位置決定精度である約10マイクロ秒角を用いると、距離、周期が上記の場合にはスーパーアース探査も可能であることがわかった。

我々はさらに、個別の褐色矮星に対して小型JASMINE、Gaiaを用いた場合、周期・惑星質量平面のどの領域を探索できるかを調べた。その結果、周期5年以内、惑星質量3地球質量以上のかかなり広い領域を探索できることがわかった。また、これまでどの中心星に対しても惑星が発見されていない周期0.1日、惑星質量10木星質量付近の領域を探索できることもわかった。この領域は、ほとんどの対象天体に対して小型JASMINEのみで探査できる。

キーワード: アストロメトリ, 褐色矮星, 惑星探査, 赤外線, 小型JASMINE, ガイア

Keywords: astrometry, brown dwarf, exoplanet exploration, infrared, Small-JASMINE, Gaia

スーパーアース大気中の有機物エアロゾル生成に関する実験的研究：トランジット観測への示唆
Experimental study on organic aerosol formation in super-Earths' atmosphere: Implications for transit observations

小林 潤平^{1*}; 関根 康人²; 洪 鵬²
KOBAYASHI, Jumpei^{1*}; SEKINE, Yasuhito²; HONG, Peng²

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 東京大学新領域創成科学研究科複雑理工学専攻
¹Dept. Earth & Planet. Sci., Univ. Tokyo, ²Dept. Complexity Sci. & Engr., Univ. Tokyo

A super-Earth is an extrasolar planet with a mass greater than Earth and below Neptune. Although there is no super-Earth in our solar system, astronomical observations demonstrate that it is one of the major categories of planets beyond the solar system. Recent transit observations of super-Earths, including GJ 1214b, indicate that their atmospheres contain opaque clouds or haze at high altitudes. One candidate for the opaque materials is metallic or salt dusts, such as KCl and ZnS, which would condense in the upper atmospheres of super-Earths. Another candidate is organic haze, such as those observed in the atmosphere of Saturn's moon Titan, which would be composed of high-molecular-weight hydrocarbon aerosols produced through photochemical reactions involving CH₄. Given the proposed formation mechanisms of nearby super-Earths, e.g., planetary migration, they would have a wide variety in chemical composition of atmosphere. However, previous laboratory experiments have mainly focused on organic aerosol formation in Titan's and early Earth's atmospheres. Thus, both the formation rate and optical property of organic haze for various atmospheric compositions have been poorly constrained by laboratory experiments.

In this study, we investigate the formation rate and optical property of organic aerosols formed by laboratory experiments simulating super-Earths' atmospheres with a wide variety in chemical composition. We used initial gas mixtures of H₂ and CH₄ or CO₂ and CH₄, and varied the H₂/CH₄ or CO₂/CH₄ ratios. The experiments were conducted at a total pressure of 1 Torr in a flow system. Cold plasma irradiation was used to initiate aerosol formation. We measured the aerosol formation rate, chemical compositions of intermediate gas molecules, and optical property of aerosol using a spectroscopic ellipsometer, a quadrupole mass spectrometer, and a UV/VIS spectrometer, respectively.

Our experimental results show that the aerosol formation rate decreases with increasing the H₂/CH₄ ratio, suggesting that recycling of high-molecular-weight hydrocarbons to CH₄ occurs through reactions with H and H₂ under H₂-rich conditions. We also show that organic aerosols are produced less efficiently at higher CO₂/CH₄ ratios. The results of gas analyses also show that formation of high-molecular-weight hydrocarbons are inhibited at higher CO₂/CH₄ ratios. These results indicate that oxygen-bearing molecules and radicals formed by CO₂ dissociation oxidizes hydrocarbons produced from CH₄, which results in a lower aerosol formation rate at higher CO₂/CH₄ ratios. Optical constant of the aerosols formed under the conditions simulating super-Earths' atmospheres is significantly lower than those of Titan aerosol analogs.

Based on the experimental results, we discuss the chemical composition and formation process of transiting super-Earths, such as GJ 1214b, by comparing the observed transmittance spectra with the model spectrum. We suggest that organic aerosol production in a H₂-rich or CO₂-rich atmosphere is inefficient so that organic haze would not be capable of explaining the observed transit spectra of super-Earths, even if they contains gaseous CH₄ in the atmospheres.

キーワード: 系外惑星, スーパーアース, 有機物エアロゾル, ヘイズ, 大気組成
Keywords: exoplanet, super-Earth, organic aerosol, haze, atmospheric composition

ヘイズを持つ低質量系外惑星の大気透過スペクトルモデル: GJ 3470b への応用 Transmission spectrum models of low-mass exoplanet atmospheres with haze: Application to GJ 3470b

川島 由依^{1*}; 生駒 大洋¹; 福井 暁彦²; 成田 憲保²
KAWASHIMA, Yui^{1*}; IKOMA, Masahiro¹; FUKUI, Akihiko²; NARITA, Norio²

¹ 東京大学, ² 国立天文台
¹The University of Tokyo, ²National Astronomical Observatory of Japan

1995年に最初の系外惑星が発見されて以来、現在までに1000個以上の系外惑星の発見が報告されている。最近では、ひとつの惑星に対して、多波長でトランジット観測が行われるようになった。惑星のトランジット時に起きる恒星光度の見かけの減少から、その惑星の半径が分かる。また、測定された半径の波長依存性（これを大気透過スペクトルという）には、惑星大気中の分子やヘイズ、雲による吸収・散乱の情報が含まれる。従って、観測データと理論的な透過スペクトルモデルとを比較することにより、惑星大気の組成を制約できる。大気組成は、惑星の熱進化や形成過程などを考える上で重要である。

これまでに、我々の観測グループは2つの低質量系外惑星（GJ 3470b と GJ 1214b）に対して多波長でのトランジット観測を行った。この2つの惑星とも、近赤外域に比べると、可視域で大きなトランジット半径が観測されており、このことから、ヘイズの存在が示唆されている。GJ 1214bについては、ヘイズを考慮した理論スペクトルモデルの系統的な議論がなされているが、GJ 3470bについては、まだなされていない。そこで、本研究では、トランジット観測がされるような中心星近くに存在する低質量惑星を想定し、その惑星が大気中にヘイズをもつ場合の理論的な透過スペクトルモデルを作成した。その上で、GJ 3470b と GJ 1214b にスペクトルモデルを適用し、その大気組成について議論する。

理論スペクトルモデルの作成においては、惑星大気分子およびヘイズによる主星光の吸収・散乱と、化学平衡計算によって鉛直組成分布を考慮した。大気組成は、太陽組成、太陽組成からその重元素量やC/O比を変えたもの、水蒸気に富んだ大気などを考え、大気組成によるスペクトルモデルの違いを調べた。また、ヘイズの高度、粒径、数密度による違いについても調べた。実際の透過スペクトルの観測点とモデルとを比較し、惑星の大気組成について議論する際、カイ2乗検定を行ない、各大気モデルの妥当性を定量的に評価した。

キーワード: 系外惑星, トランジット, 透過スペクトルモデル, 大気組成, ヘイズ
Keywords: exoplanets, transits, transmission spectrum models, atmospheric composition, haze

SEEDS 計画による太陽系外惑星や星周円盤の直接撮像探査 The SEEDS Exoplanet and Circumstellar Disks Survey

葛原 昌幸^{1*}; 田村 元秀²; 工藤 智幸³; 橋本 淳⁴; 日下部 展彦⁵; 松尾 太郎⁶; マクエルウィン マイケル⁷; ジャンソン マーカス⁸; 高橋 安大²

KUZUHARA, Masayuki^{1*}; TAMURA, Motohide²; KUDO, Tomoyuki³; HASHIMOTO, Jun⁴; KUSAKABE, Nobuhiko⁵; MATSUO, Taro⁶; MCELWAIN, Michael⁷; JANSON, Markus⁸; TAKAHASI, Yasuhiro²

¹ 東京工業大学理工学研究所地球惑星科学専攻, ² 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻, ³ ハワイ観測所, ⁴ オクラホマ大学物理・天文学専攻, ⁵ 国立天文台, ⁶ 京都大学理学研究科宇宙物理学教室, ⁷ ナサ・ゴダード宇宙飛行センター, ⁸ クイーンズ大学ベルファスト 宇宙物理学研究センター

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ²Department of Astronomy, The University of Tokyo, ³Subaru Telescope, ⁴H. L. Dodge Department of Physics and Astronomy, University of Oklahoma, ⁵National Astronomical Observatory of Japan, ⁶Department of Astronomy, Kyoto University, ⁷NASA Goddard Space Flight Center, ⁸Astrophysics Research Centre, Queen's University Belfast

太陽系外惑星(系外惑星)の発見数は現在 1,000 に及ぶまでになった。さらに、Kepler 衛星による探査によって、3,000 を超える系外惑星候補天体が報告されている (Huber et al. 2013)。このように惑星系は我々の銀河系において普遍的に存在するものであるが、これまでの系外惑星の観測研究の成果として、その特徴は非常に多様であることもわかってきた。一方、それらの惑星を形成する母体である星周円盤の観測的研究も進んでいる。特に、近年運用が開始された電波望遠鏡 ALMA によって原始惑星系円盤の構造に対して興味深いデータが得られるようになってきたが (e.g., van der Marel et al. 2013; Casassus 2013), 星周円盤に対する理解は ALMA によって今後ますます進むことが期待できる。

直接撮像法は数十 AU 程度の大きさの軌道を持つ系外惑星(広軌道惑星)の探査や研究を可能にするが、そのような惑星の探査はドップラー法やトランジットの法などの間接的手法では極めて難しい。また、直接撮像法は星周円盤の探査やその特徴の研究に対しても有効な手法である。実際に直接撮像法による原始惑星系円盤や残骸円盤からの散乱光の高解像度観測によって、円盤と惑星の物理的な結びつきを示唆する重要な証拠がこれまで得られてきた。我々は、すばる望遠鏡と最新の補償光学装置 AO188, さらに新たに開発した高感度近赤外カメラ HiCIAO を用いて系外惑星と星周円盤を直接撮像探査するプロジェクトである SEEDS をこれまで進めてきた。SEEDS はおよそ 500 のターゲットを最終的に観測することを目指しており、主に年齢が百万年から 10 億年の太陽型星をターゲットにしているが、中質量星や低質量星も一部ターゲットに含まれている。SEEDS 計画はその開始から 5 年目の探査を現在行なっているが、10 以上の遷移円盤や残骸円盤において溝や渦巻き構造などの興味深い円盤構造を検出するのに成功している (e.g., Hashimoto et al. 2012; Grady et al. 2013)。さらに、アンドロメダ座 Kappa 星という B 型星を公転する大質量巨大惑星の候補天体 (Carson et al. 2013) や、G0 型の太陽型星である GJ 504 から約 44AU 離れた軌道を公転する巨大ガス惑星 (GJ 504b) の検出に成功している (Kuzuhara et al. 2013)。GJ 504b の質量は木星の 4 倍程度と推定され、さらに有効温度は 500K と推定される。これまで検出された広軌道惑星の中でも、この質量推定値は最低の値の一つであり、さらにその有効温度はこれまでで最低の推定値である。追加で行った観測からは、GJ 504b の大気にメタンが存在することも示唆されたが (Janson et al. 2013), 直接撮像惑星においてメタンを検出するのは初のことである。このように、SEEDS はこれまで知られていない様な特徴をもつ系外惑星の検出やその特徴を調べることに成功している。全探査完了後、SEEDS 探査結果の総合的・統計的な分析を行なう予定であるが、それは系外惑星や星周円盤に対する理解をよりいっそう前進させると期待される。また、それらの成果は地球型惑星の探査などの将来の系外惑星探査においても重要な試金石になることも期待される。

本講演では、主に GJ 504b の検出など最新の SEEDS 探査の成果について報告する。さらに、SEEDS 計画の全体的状況や進捗、今後の予定についても報告する。

キーワード: 太陽系外惑星, 残骸円盤, 原始惑星系円盤, 巨大惑星, 直接撮像観測

Keywords: extrasolar planet, debris disk, protoplanetary disk, giant planet, direct imaging observation

地球大気を考慮した極超音速飛行隕石のソニックブーム解析 Sonic Boom Analysis of Meteorite at Hypersonic Speeds in Earth Atmosphere

山下 礼^{1*}; 鈴木 宏二郎¹
YAMASHITA, Rei^{1*}; SUZUKI, Kojiro¹

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

¹ Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

隕石落下時の問題点として、高速飛行することにより発生する衝撃波、すなわちソニックブームがあげられる。2013年2月にロシアのチェリャビンスクで観測された事象では、隕石から発生したソニックブームにより窓ガラスや建物が損壊し、多くの人的被害を被った。このことから、隕石がもたらすソニックブームの影響を検証する事は重要と考えられる。本研究では、航空宇宙工学で培われたソニックブーム予測手法を適用することで、極超音速飛行する隕石から発生したソニックブーム強度を予測する。具体的には、数値流体力学 (CFD) に基づいた予測手法 (R. Yamashita and K. Suzuki, APISAT2013, No. 02-05-3) を適用することで、衝撃波が地球大気内を地上まで伝播する様子を明らかにする。解析対象は、高度 10 km をマッハ 10 (約 3 km/s) で水平定常飛行する隕石を想定し、直径 20 m の球体まわりの流れ場とした。地球大気モデルは国際標準大気 (ISO 2533:1975) を用いた。国際標準大気では、温度が高度の関数で与えられ、圧力、密度は理想気体の状態方程式及び静水圧平衡の式から導出される。支配方程式は、重力項を付加した 3 次元 Navier-Stokes 方程式である。計算格子は、2 次元格子を物体軸周りに 180 度回転させた格子であり、格子数は約 554 万点である。地球大気の場合、高度に応じて大気の状態が変化するため、衝撃波角も変化する。そのため、予備計算を行った後、物体前方から発生する bow shock wave に沿った適合格子を形成し、再度計算を行った。なお、計算負荷を軽減するため、計算領域をセクターに分割し、物体近傍のみ 2 次元軸対称解析を実施した。対流項の離散化は AUSM 系のスキームである SHUS (E. Shima and T. Jounouchi, 第 14 回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, pp.7-12, 1997) を 3 次精度 MUSCL 法により高次精度化したものを用いた。粘性項は 2 次精度中心差分で評価し、重力項は生成項として扱った。また、時間積分は MFGS 陰解法 (嶋英志, 第 29 回流体力学講演会論文集, pp.325-328, 1997) で行った。

数値解析結果より、球体から発生する衝撃波は、物体前方の bow shock wave と物体後流の trailing shock wave である事が分かる。そして、bow shock wave と trailing shock wave は地上にかけて近づき、高度 8 km までに統合する。そのため、極超音速飛行する隕石の場合、急峻な圧力上昇 (爆発音) が生じるのは 1 回のみとなり、bow shock wave より弱い trailing shock wave の寄与は小さくなる (超音速機の場合、N 型の波形を形成し、爆発音の回数は 2 回となる)。チェリャビンスクの事象では、隕石が爆発により 3 個に分裂し、地上で 3 度の爆発音が発生したと報告されている (NHK COSMIC FRONT: ロシア隕石の全貌)。つまり、隕石の破片の数と爆発音の回数が一致し、本解析結果から得られる特徴とも一致する。一様大気を伝播する衝撃波は、遠方にかけて円錐状に広がるため、地上にかけて常に減衰し続ける。一方、地球大気の場合、地上にかけて大気圧及び大気温度が上昇するため、圧力上昇値を増幅させる効果も働く。特に、国際標準大気では高度 11 km から地上にかけて、温度が 6.5 K/km の割合で上昇し、増幅効果の影響が顕著に表れる。その結果、物体近傍では最大圧力上昇値が急激に減少するが、高度 5 km から地上にかけてはほとんど変化が見られない。また、地球大気では衝撃波の伝播方向によって圧力上昇値の減衰傾向が異なり、ソニックブーム強度は鉛直下方で最も強くなる。本解析結果では、地上での反射係数が 1.9 の場合、隕石直下で圧力上昇値が約 1.5 kPa となり、次世代超音速機の開発で求められている基準値 (24Pa) の約 63 倍に相当する。チェリャビンスクの隕石では、窓ガラスの損傷から圧力上昇値を導出した結果、 3.2 ± 0.6 kPa であったと報告されている (NATURE 12741)。従って、計算条件と実際の飛行条件は異なるが、圧力上昇値は共に 1 kPa のオーダーであり、ソニックブームの伝播傾向を検証する上では有用な結果と考えられる。そして、1 kPa オーダーの圧力上昇がもたらす影響は甚大であり、チェリャビンスクで起きた事象はその影響を顕著に表した事例である。

本研究では、航空宇宙工学で培ったソニックブーム予測手法を適用することで、隕石から発生したソニックブーム強度を評価した。今後はパラメトリックスタディを行うことにより、実際の隕石のサイズや飛行条件を推算できると考えられる。

キーワード: ソニックブーム, 隕石, 極超音速流, CFD, 衝撃波

Keywords: Sonic Boom, Meteorite, Hypersonic Flow, CFD, Shock Wave

チェリャビンスク火球の明るさと色の時間変化 The brightness and the color temperature of the Chelyabinsk bolide

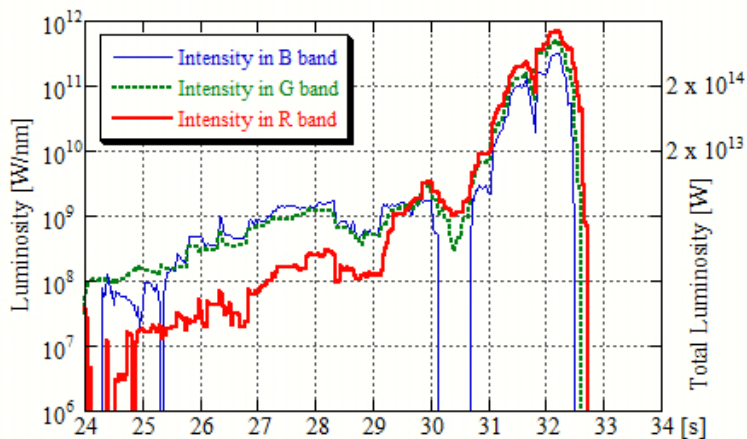
柳澤 正久^{1*}
YANAGISAWA, Masahisa^{1*}

¹ 電気通信大学
¹ Univ. Electro-Communications

2013 年 2 月 15 日 3 時 20 分 (世界時) のロシア・チェリャビンスク市近郊で起きた火球は、車載カメラを含む多くのモニターカメラによって撮影され、その画像がインターネット上に公開されている。我々はその中の一つを解析し、明るさと色の時間変化を調べた (明るさの時間変化を図に示す)。結果は次の通りである。(1) 光エネルギーのほとんどは 1-2 秒間のフレア (光度が急激に増大する現象) で放射された;(2) フレア以前の放射は黒体放射ではない;(3) フレア時のスペクトルは 3500 K の黒体放射と矛盾しない;(4) 3500 K の黒体放射を仮定すると全波長にわたって単位時間に放射されるエネルギーは最大で 1.0×10^{15} W であった;(5) 全放射エネルギーから推定される衝突エネルギーは 1.9×10^{15} J (TNT 爆薬 450 kton のエネルギーに相当) であった。また、3500 K の黒体放射をする黒体の面積は 120 km^2 であり、火球の軌跡に沿った半径 1 km、長さ 20 km の円柱の表面からの放射が考えられる。

図の説明：単位波長当たりの光度 (左側の目盛: RGB 各バンドについて太線, 破線, 細線で示す)。光度は単位時間当たり全方向に放射されるエネルギーと定義する。右側の目盛は 3500 K の黒体放射を仮定した場合の G バンドの値 (破線) から算出される全波長での光度である。横軸の時刻は 2013 年 2 月 15 日 3 時 20 分の秒 (世界時)。

キーワード: 火球, 天体衝突, 太陽系小天体, チェリャビンスク, スペースガード, 隕石
Keywords: bolide, meteoroid impact, small solar system objects, Chelyabinsk, Space guard, meteorites



大型レーダー流星ヘッドエコー観測による太陽系ダスト軌道の統計的分布 Statistical distribution of the solar system dusts by meteor head echo observations with the large-aperture radar

阿部 新助^{1*}; Kero Johan²; 中村 卓司³; 藤原 康徳⁴; 渡部 潤一⁵
ABE, Shinsuke^{1*}; KERO, Johan²; NAKAMURA, Takuji³; FUJIWARA, Yasunori⁴; WATANABE, Jun-ichi⁵

¹ 日本大学理工学部航空宇宙工学科, ² スウェーデン宇宙物理研究所, ³ 国立極地研究所, ⁴ 日本流星研究会, ⁵ 国立天文台
¹Department of Aerospace Engineering, College of Science and Technology, Nihon University, ²Swedish Institute of Space
Physics (IRF), ³National Institute of Polar Research (NIPR), ⁴Nippon Meteor Society, ⁵National Astronomical Observatory of
Japan

メテオロイド(流星)が超高速で大気突入すると、高度約 70-130km において流星物質のアブレーションによりプラズマが形成さる。特に、流星ヘッドプラズマから反射される電波を流星ヘッドエコーという。我々は、京都大学生存圏研究所・信楽 MU レーダー(東経 136.10 度、北緯 34.85 度)を用いた、流星ヘッドエコー観測を実施した。MU レーダーにより、2009 年以降、流星の経路と惑星間軌道が継続的に導出されてきた。2014 年 1 月現在、約 12 万個の流星軌道が高精度で求まっている。典型的な軌道決定誤差は、速度で 0.3 km/s、軌道長半径で 0.1 AU と非常に小さな誤差である。これまで、このような高精度で膨大な数の流星軌道が通年を通して観測されたことはない。我々は、このデータベースの統計解析から得られた軌道分布、母天体彗星・小惑星との関連などについて報告する。

キーワード: 流星, ダスト, メテオロイド, 彗星, 小惑星, MU レーダー
Keywords: meteors, dusts, meteoroids, comets, asteroids, MU radar

火星表面のサブミリ波偏波放射観測の室内実験による検討 Laboratory experiment simulating Martian surface observation with submillimeter-wave polarimetric radiometry

有村 健斗^{1*}; 落合 啓²; 菊池 健一²; 北 和之³; 笠井 康子²

ARIMURA, Taketo^{1*}; OCHIAI, Satoshi²; KIKUCHI, Kenichi²; KITA, Kazuyuki³; KASAI, Yasuko²

¹ 茨城大学大学院理工学研究科, ² 情報通信研究機構, ³ 茨城大学理学部

¹Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, ²National Institute of Information and Communications Technology, ³Faculty of Science, Ibaraki University

背景・目的:

海洋の存在しない火星大気の大循環において、大気と地表面下の間で昇華・凝結過程を通して生じる物質、エネルギー交換サイクルが大きな影響を持つと考えられ、その理解のために火星の地表面状態の広域な変動を捉えることが重要となる。このような変動を捉える上で周回衛星を用いた地表面観測が重要であるが、火星大気中に存在するダストが観測の妨げとなっているため継続的な光学観測が困難とされている。そこで、波長がダスト粒径よりも大きいサブミリ波偏波を利用した放射観測を行うことで火星ダストの影響を受けず、地表面の継続観測が可能となり、ごく浅い火星表面下の温度や物質組成などの情報を得ることができる。しかし、今までの惑星探査において周回衛星を用いた惑星表面のサブミリ波偏波放射観測が行われた例はなく、観測を提案するためには表面観測におけるこの観測手法の有効性を十分に検討する必要がある。本研究では火星周回衛星による観測を模擬した室内実験を行うことによって観測の有効性を議論することを目的とする。

測定原理:

地表面をある入射角で観測する衛星で受信される放射強度は、地中の温度に応じた放射が地表面へ伝搬し大気中へ射出した成分と、大気からの放射が地表面で散乱された成分の和がさらに大気中を伝搬してきたものとなる。地表面の射出率および反射率は衛星の入射角、地表物質の誘電率や表面粗度、偏波によって決定する。複数の入射角、偏波、周波数で火星表面を観測することで火星表面の温度、誘電率、表面粗度を推定することが可能となる。

室内実験:

衛星によって観測される放射強度から地表面の温度や誘電率、表面粗度などの地表面状態を知るためには衛星の入射角および偏波方向ごとに得られる射出率、反射率と地表面状態を表すパラメータとの関係性を理解しておく必要がある。そこで、衛星観測を模擬した測定を行うことが出来る実験システムを構築した。実験システムは散乱測定部、光学系部、送受信機から構成される。散乱測定部は火星平均気圧と表面温度を再現できるように真空容器で作られ、冷却装置で測定資料を火星表面温度に冷却することが可能になっている。また、光学系部で測定する入射角と偏波を制御することができ、送受信機を併用することで測定試料の反射率が、受信機のみを用いることで放射強度および射出率が測定可能となっている。本研究ではサブミリ波放射強度測定から火星表層を模擬した測定試料から温度、誘電率、表面粗度などを導出できるか検討することを目的としているが、そのためには地表面状態のパラメータひとつひとつが放射強度と放射率、反射率に与える影響について調べる必要がある。今回は比較的組成や粒径が単一であると考えられるアクリル平板、アルミナボールのサブミリ波偏波反射率を測定し、単一組成の誘電体をもつ誘電率や表面粗度が反射率に与える影響について調べた結果を報告する。この結果を踏まえることで、火星表面のような混合した物質組成をもつ誘電体とその反射率の関係性の検討を行うことができ、さらに放射強度、放射率との関係性について検討を行うことが期待される。

キーワード: 火星, 表面観測, サブミリ波

Keywords: Mars, surface observation, submillimeter-wave

ALMA 望遠鏡によるエンセラダス・プルーム内の HCN 観測可能性とその科学的意義

Scientific importance and possibility of HCN detection in Enceladus plumes by ALMA

兒玉 賢哉^{1*}; 関根 康人¹; 飯野 孝浩²; 西合 一矢⁶; 笠井 康子³; 佐川 英夫⁴; 前澤 裕之⁵

KODAMA, Kenya^{1*}; SEKINE, Yasuhito¹; IINO, Takahiro²; SAIGO, Kazuya⁶; KASAI, Yasuko³; SAGAWA, Hideo⁴; MAEZAWA, Hiroyuki⁵

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科, ² 名古屋大学理学研究科太陽地球環境研究所, ³ 独立行政法人通信総合研究所電磁波計測研究センター, ⁴ 情報通信研究機構, ⁵ 大阪府立大学大学院理学系研究科物理科学科, ⁶ 自然科学研究機構国立天文台
¹Dept. Complexity Sci. and Engr. Univ. of Tokyo, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Graduate school of science, Nagoya University, ³Senior Researcher Global Environment Division National Institute of Information and Communications, ⁴National Institute of Information and Communications Technology, ⁵Department of Physical Science Osaka Prefecture University, ⁶National Astronomical Observatory of Japan

Saturn's icy moon, Enceladus, exhibits ongoing geological activities, including eruption of water-rich plumes from warm fractures near the south-pole region. These geological activities together with the findings of Na-rich salts in the plumes suggest the presence of an interior liquid ocean beneath the icy crust. This demonstrates that Enceladus' plumes provide a unique opportunity to investigate the chemical composition of oceanic water, possible geochemical reactions, and habitability of the icy moon. However, due to limitations of in-situ measurements of the plumes by the Cassini spacecraft, it is not able to identify or quantify some key molecules, which could probe physical and chemical conditions of the ocean.

Here we discuss scientific importance and possibility of detection of HCN in the plumes by large ground-based, sub-millimeter telescope, ALMA. Because HCN is one of the fundamental materials contained in icy planetesimals in the outer solar system, and because it readily hydrolyzes in warm water (>50 °C), a lack of HCN suggests that Enceladus' interior would have experienced relatively high temperatures, i.e., a presence of hydrothermal activity. On the other hand, if HCN were present in the plumes, this in turn means that Enceladus would have been cold throughout its history. Given the results of thermal evolution model, the latter case suggests late formation of the Saturnian system (>5Myr) after CAI formation, which would result in a depletion of short-lived radiogenic heat source in Enceladus.

To evaluate the possibility to detect HCN in the plumes by ALMA, we first estimate a special distribution of H₂O gas density based on results from Cassini's observations and plume eruption modeling. Then, we calculate radiative temperatures of HCN in the field of view of ALMA as a function of HCN concentration. Finally, the upper limit of HCN as a function of observation time will be obtained. For instance, if HCN were not detected within 4-6 hours of observation time, an upper limit of the HCN concentration in the plumes becomes 0.2% relative to water, which is comparable to a typical concentration of HCN in comets. Thus, the ALMA telescope is capable of detecting HCN in Enceladus' plumes within a reasonable observation time, if it were present in an amount comparable to that of comets. In either case whether HCN were present or not, we would be able to constrain geochemical reactions and thermal history of Enceladus as well as the timing of formation of Saturnian system.

円盤内縁近傍の惑星が円盤に与える影響の解析に向けて Development of SPH: Toward Understanding of Disk-planet Interaction Near the Disk Inner Edge

藤井 悠里^{1*}; 岩崎 一成¹; 塚本 祐介¹; 犬塚 修一郎¹
FUJII, Yuri^{1*}; IWASAKI, Kazunari¹; TSUKAMOTO, Yusuke¹; INUTSUKA, Shu-ichiro¹

¹ 名古屋大学
¹ Nagoya University

系外惑星の多数発見に伴い、中心星のごく近傍を回転する惑星が数多く存在することが明らかにされてきた。これらの惑星の多くは円盤の外側で形成され、円盤と惑星との相互作用で角運動量を失い、内側へと移動してきたと考えられている。惑星が円盤内縁まで移動してくると、円盤ガスとの相互作用がなくなるのでそれ以上落下せずに、円盤近傍にとどまることができる。この惑星は円盤の進化に大きな影響を与える。よって、本研究では円盤内縁の近傍の惑星が円盤に与える影響を解明するためのコード開発を行う。中心に空隙がある場合や、惑星が楕円率の大きい軌道を持っている場合には従来用いられてきた格子法を用いた手法では計算が困難である。しかし、SPH法を用いることでこれらを取り扱うことができると期待される。この問題の解決には、SPH法の精度を上げることが本質的である。本講演では、コード開発の詳細と性能評価について発表する。

キーワード: 系外惑星, 原始惑星系円盤, SPH 法
Keywords: exoplanet, protoplanetary disk, smoothed particle hydrodynamics

原始惑星系円盤進化にともなう微惑星組成進化 Evolution of a protoplanetary disk and chemical composition of planetesimals

永原 裕子^{1*}; 小澤 一仁¹
NAGAHARA, Hiroko^{1*}; OZAWA, Kazuhito¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科

¹Dept. Earth Planet. Sci., The Univ. Tokyo

We investigate physico-chemical evolution of the proto-solar disk at the early stage by developing a new model that combines physics and chemistry with special interest to temporal and spatial evolution of the disk. Then, we discuss how the composition of planetesimals varies depending on the time and space for their formation including refractory or volatile rich ones.

The basic of the model is a radial advection-diffusion equation, which includes drift and dispersion by turbulence with stochastic diffusion term calculated by the Monte Carlo method and which shows the diffusivity by the viscosity of the disk. The difference from conventional disk models is that the present method stands on the Lagrangean differentiation, and it is able to trace the movement of individual particles.

A considerable amount of materials in the inner regions are transported outward at the early stage ($t < 10^5$ yrs), which is because the surface density is much larger in the inner region at the early stage of the disk evolution. Although the outward flux is large at the early stage, there comes a larger amount of materials from the outer region even within $\sim 10^5$ yrs. The mixing ratio of materials from the inner regions to outer regions is almost unity within several AU all through the disk evolution, suggesting that thermally processed materials and unprocessed materials were mixed in the inner region of the disk. It is important that the relative abundance of materials from outer regions becomes larger with time, which implies that planetesimals formed within several AU at the early stage of the disk evolution consists partly of materials initially located at the inner regions and partly from outer regions, but those formed at the later stage contain more abundant low materials transported from the outer regions.

The mixing ratio of materials from the inner and outer regions is almost unity at the early stage but the fraction of materials from the outer regions increases with time. Combining the information about the maximum temperature that the particles experienced, we can constrain that early differentiated planetesimals such as the parent body of angrites and planetesimals with refractory-rich compositions such as CV chondrites were formed at the inner region of the disk in $\sim 10^5$ yrs. On the other hand, planetesimals for other carbonaceous chondrites or ordinary chondrites that are depleted in sulfur were formed later, possibly at $\sim 10^6$ yrs.

キーワード: 原始惑星系円盤, 化学進化, ダスト移動

Keywords: protoplanetary disk, chemical evolution, dust movement

静電反発を考慮したダスト合体成長の大局的数値計算法 Simulating global dust coagulation with grain charging

奥住 聡^{1*}; 田中 秀和²
OKUZUMI, Satoshi^{1*}; TANAKA, Hidekazu²

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科, ² 北海道大学低温科学研究所

¹Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, ²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Growth of dust particles by collisions is the initial step of planet formation. Conventionally, the theory of dust coagulation in protoplanetary disks assumed electrically neutral dust particles, but in reality dust in the disks is likely to be charged given that the disks are ionized by cosmic rays and stellar X-rays. In our previous work (Okuzumi 2009; Okuzumi et al. 2011a,b), we extensively studied the role of grain charging in protoplanetary dust growth, and concluded that dust growth stalls at its early stage because of the excessively large (negative) charges carried by small dust aggregates. We also predicted that this "charge barrier" could be overcome (albeit on a very long timescale) if dust in the disks is globally transported by radial drift and turbulent diffusion.

The purpose of the present work is to demonstrate the breakthrough of the charge barrier in a global setup. In order to do this, we have developed a new simulation code for global dust coagulation including the effect of grain charging. The new code is based on a previous code for planetesimal formation (Brauer et al. 2008; Okuzumi et al. 2012) but now calculates charging and Coulomb repulsion of dust particles at each location in a disk consistently with the particle size distribution at the same location. To verify the code, we perform some test simulations and compare them with the prediction from our previous theory.

キーワード: ダスト, 帯電, 惑星形成, 原始惑星系円盤

Keywords: dust, charging, planet formation, protoplanetary disk

潮汐場におけるラブルパイル天体の衝突 N 体シミュレーション N-body simulations of Rubble pile Collisions in Tidal fields

兵頭 龍樹^{1*}; 大槻 圭史¹

HYODO, Ryuki^{1*}; OHTSUKI, Keiji¹

¹ 神戸大学理学研究科

¹Kobe University, Graduate School of Science

土星の F リングなどは中心惑星のロッシュ半径の外側ではあるが、中心惑星に比較的近い領域であるため中心惑星の潮汐力の効果が無視できない領域に位置している。一方、カッシーニによる観測結果から F リングにはリング粒子が自己重力で集積したアグリゲイトが多数存在していると示唆されている。さらに形成されたアグリゲイトは潮汐力で中心惑星方向に引き延ばされて、球体ではなく楕円体として存在していると考えられる。潮汐場を無視した自由空間における天体同士の衝突については小惑星や微惑星の破壊プロセスとして多くの先行研究で扱われてきた。一般的にこれらの衝突では head-on 衝突において破壊は衝突エネルギーによって構成物質が重力的に散乱されることでおこる。つまり、衝突エネルギーの増加に伴って最大破片サイズは小さくなる傾向にある。しかし、中心惑星に近く潮汐力が強く効いてくる領域ではアグリゲイト自身の体積と重力ポテンシャルの大きさが同等のものとなってくる。このような状況におけるアグリゲイト同士の衝突は自由空間のものとは異なったものとなりうると予想される。

本研究では粒子間の相互重力と衝突を考慮して潮汐場を再現する系における局所 N 体計算を用いて楕円体アグリゲイト同士の衝突シミュレーションを行ない、破壊条件が中心惑星からの距離にどのように依存するかを調べた。衝突方向としては動径方向と軌道運動方向の二通りを考慮し、衝突速度をパラメーターとした。

本研究によってロッシュ半径のすぐ外側の潮汐力が強く作用する領域では、動径方向の衝突よりも軌道運動方向の衝突の方がはるかに壊れやすいことが分かった。さらに動径方向の衝突においては自由空間の場合のように衝突エネルギーの増加によって最大破片サイズが律せられる結果にはならず、より複雑な速度依存性がみられた。そして、これらの領域では、自由空間において従来合体するだろうと考えられていた脱出速度よりもはるかに小さい速度で衝突した場合でも破壊につながるということが分かった。このことから潮汐力が卓越する領域におけるアグリゲイト同士の衝突において、その破壊プロセスを議論する際に衝突エネルギーだけでなく、衝突直後のアグリゲイトの形状も重要となることが分かった。また、中心惑星からより遠ざかるにつれて潮汐場の効果は小さくなることで、衝突結果は自由空間で得られるものに近づいていくことを確認した。

以上の結果は、the Astrophysical Journal に投稿済みである。

キーワード: リング, 衛星, アグリゲイト

Keywords: rings, satellites, aggregates

微惑星衝突における衝突破壊モデルの再検討 An improved fragmentation model on outcome of planetesimal collisions

藤田 智明¹; 玄田 英典^{2*}; 小林 浩³; 田中 秀和⁴; 阿部 豊¹

FUJITA, Tomoaki¹; GENDA, Hidenori^{2*}; KOBAYASHI, Hiroshi³; TANAKA, Hidekazu⁴; ABE, Yutaka¹

¹ 東京大学 理学系研究科, ² 東京工業大学 地球生命研究所, ³ 名古屋大学 理学研究科, ⁴ 北海道大学 低温科学研究所

¹Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, ²Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology,

³Department of Physics, Nagoya University, ⁴Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

惑星形成過程において、微惑星同士または微惑星と原始惑星の衝突は頻繁に起こり、そのような衝突を経て天体は成長する。ところが、そのような衝突には破壊的な衝突も含まれており、それらは成長を促すどころか天体を粉々にしてしまう。すなわち、そのような衝突がどの程度破壊的であったかを知ることは、微惑星の成長過程を正しく理解する上で重要である。

これまでに、衝突前の質量の半が飛び散ってしまうような破壊的な衝突を引き起こす衝突エネルギー Q_D^* は様々な条件で調べられており (Holsapple et al., 2002; Benz & Asphaug, 1999; Leinhardt & Stewart, 2009)、惑星形成を論じる際にはそのような破壊的な衝突のみが重要視されてきた。 Q_D^* の値で現在広く引用されているのが、Benz & Asphaug 1999 によって計算されたものである。彼らは非常に多くの衝突シミュレーションにより Q_D^* を決定しているが、彼らの数値シミュレーションにおける解像度は極めて低く、 Q_D^* の値が収束する解像度も調べていない。また、最近の研究によると、衝突エネルギーが Q_D^* よりも小さいような小規模な衝突も、そのような衝突は頻度が多いため、惑星の成長を考える上で重要であることが示唆された。ところが、そのような小規模な衝突から大規模衝突をつなぐ信頼できるモデルも存在していない。

惑星の成長をより正確に議論するためには、正しい Q_D^* の値と、小規模衝突における、衝突エネルギーとその際に飛び散るイジェクタ質量との関係が必要となる。本研究では、衝突シミュレーションにより、 Q_D^* の解像度依存性を調べ、微惑星衝突における Q_D^* の値を再調査した。また、小規模衝突における衝突エネルギーとイジェクタ質量の関係性を定式化した。本研究では、SPH法(自己重力入り、物質強度抜き)と呼ばれる流体計算コードにより、岩石微惑星同士の衝突シミュレーションを系統的に行った。衝突条件としては、100km、10kmサイズのターゲット天体と様々なサイズの天体の衝突を考え、衝突速度、衝突角度、解像度を様々に変えて計算した。

その結果、 Q_D^* の値は解像度に依存することがわかった。これは衝突後の衝撃波、希薄波伝播及び破片放出過程で発生するシア一流により、初期エネルギーの、ターゲット天体の運動エネルギーと内部エネルギーへのエネルギー分配率が解像度依存性を持つことに由来する。このエネルギー分配率は 7.5×10^7 粒子数を費やしたところで収束する。Benz & Asphaug 1999 で使われていた粒子数は 5×10^4 であり、正しい Q_D^* の値を求めるには不十分であることがわかった。本研究では、可能な限り高解像度で Q_D^* を求めたのだが、その値は彼らの値よりも半桁ほど小さくなった。これは微惑星同士の衝突がこれまで考えられてきたよりも破壊的であったことを意味する。実際に本研究と彼らの Q_D^* の値を使って、Kobayashi et al. 2010 で提案された解析解により原始惑星の成長を見積もったところ、最終的に形成される原始惑星質量は、先行研究の値を用いた場合よりも半分ほど小さくなった。

また、小規模な衝突を含めた様々な規模の衝突に対する衝突エネルギーと破片質量の関係性をスケーリング則として定式化した。このスケーリング則は、ターゲットサイズ、 Q_D^* で規格化した衝突エネルギー、衝突速度でスケーリングできることもわかった。しかし、衝突角度には依存し、異なる式が得られた。今回得られた Q_D^* とスケーリング則を Kobayashi et al. 2010 で提案された解析解に与えたところ、最終原始惑星質量は 1 AU で 0.058 地球質量、5 AU で 0.17 地球質量、という結果が得られた。

iSALE shock physics code を用いた衝突計算 Numerical modeling of impact phenomena using iSALE shock physics code

黒澤 耕介^{1*}; 千秋 博紀¹; 和田 浩二¹; 三上 峻²; 平田 成³; 鎌田 俊一²; 石原 吉明⁴; 玄田 英典⁵; 中村 昭子⁶; 高田 淑子⁷

KUROSAWA, Kosuke^{1*}; SENSHU, Hiroki¹; WADA, Koji¹; MIKAMI, Takashi²; HIRATA, Naru³; KAMATA, Shunichi²; ISHIHARA, Yoshiaki⁴; GENDA, Hidenori⁵; NAKAMURA, Akiko⁶; TAKATA, Toshiko⁷

¹千葉工業大学 惑星探査研究センター, ²北海道大学 大学院 理学院 宇宙理学専攻, ³会津大学 コンピュータ理工学部, ⁴宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ⁵東京工業大学 地球生命研究所, ⁶神戸大学 大学院理学研究科, ⁷宮城教育大学 理科教育講座

¹PERC, Chitech, ²Dept. of CosmoSciences, Hokkaido Univ., ³Dept. of Computer Sci. & Eng., The University of Aizu, ⁴ISAS, JAXA, ⁵ELSI, Titech, ⁶Dept. of Earth and Planetary Sciences, Kobe University, ⁷Division of Science Education, Miyagi University of Education

iSALE [impact-SALE (Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)] は惑星科学研究者に対して公開されている衝突流体計算コードである。特に惑星科学研究用に特化したオプション、初心者でも解析が可能な描画ソフトがパッケージとして配布されており、すでに多くの欧米の研究者が使いはじめている。これまで日本の惑星科学衝突コミュニティでは扱えるものが皆無であった ANEOS や物質強度の効果を取り入れた衝突計算を手軽に走らせることができることは大きな利点である。我々は日本の惑星科学コミュニティでも iSALE を自由に扱える環境を作るために「iSALE users group in Japan」という活動を開始した。まだまだ整備途中であるが、情報をまとめた wiki ページとメーリングリストを立ち上げている。発表では様々なテスト計算の例を紹介する。

iSALE users group in Japan のウィキページ
<https://www.wakusei.jp/~impact/wiki/iSALE/>

Mailing list
isale-users-jp@perc.it-chiba.ac.jp

謝辞

iSALE の開発者である Gareth Collins 博士, Kai Wünnemann 博士, Boris Ivanov 博士, Jay Melosh 博士, Dirk Elbeshausen 博士に感謝致します。

キーワード: 高速衝突, 数値流体計算, 状態方程式, 強度モデル, iSALE

Keywords: Hypervelocity impacts, Shock physics code, Hydrocode calculation, Equations of state, strength model, iSALE

氷天体用ペネトレータ貫入ダイナミクスの基礎特性に関する研究 Study on fundamental characteristics of penetration dynamics into icy target

難波 和也^{1*}; 鈴木 宏二郎²

NAMBA, Kazuya^{1*}; SUZUKI, Kojiro²

¹ 東京大学大学院工学系研究科, ² 東京大学大学院新領域創成科学研究科

¹ Grad. Sch. Eng., The University of Tokyo, ² GSFS, The University of Tokyo

天体の固体表面に高速でハードランディングし、天体の内部を直接観測することを目的としたペネトレータと呼ばれる探査機は、将来の惑星探査において重要な役割を果たすと考えられる。通常のランダーに比べて着陸用燃料が少なく、低質量ゆえに一度に複数の機体の打ち上げが可能である点などで優位性を持つが、機体にかかる衝撃が大きく、現在までミッションを達成した例は存在しない。一方、彗星核やエウロパに代表される氷天体には、生命の前駆物質となる有機物が存在する可能性が高く、将来的な探査対象として重要である。ここで、氷天体に貫入し、宇宙線による汚染を受けていない地下のサンプルを直接観測する「氷ペネトレータ」の有用性は非常に高いといえる。ペネトレータの先行例としては、実機が製作された LUNAR-A などがあるが、氷ペネトレータに限ると NASA の CRAF 構想 (Adams et al., NASA CR-177393, 1986) のみに限られ、貫入のダイナミクスに関する工学的研究は少ない。そのため、本研究ではバリスティックレンジを用いた針状物体の H₂O 氷への貫入実験を行い、基礎特性に関する研究を行った。

実験には、本研究室が所有するバリスティックレンジを使用した。飛翔体は加速用サボと共に圧縮空気により重力方向に水平に加速され、測定室内でサボから分離し、速度方向に垂直になるよう設置されたターゲットに衝突する。衝突速度は 100-300[m/s] の間で変化させた。飛翔体として、針状飛翔体 (鉄製、寸法 $\phi 2.45 \times 45$ [mm], 重量 1.71[g]) と鈍頭円錐状飛翔体 (真鍮製、寸法 $\phi 8.4 \times 15$ [mm], 重量 2.33[g]) を使用した。ターゲットには、純氷 (寸法 270x175x130[mm], 質量 5.5[kg], 密度 0.90[g/cm³], 空隙率 3[%]) と水道水を凍らせて作った低純度氷 (寸法 155x120x100[mm], 質量 1.5[kg], 密度 0.75[g/cm³], 空隙率 19[%])、また比較のために油粘土 (寸法 155x120x70[mm], 質量 2.2[kg], 密度 1.7[g/cm³]) を使用した。衝突の様子はハイスピードカメラ (フレームレート 2200-8800[fps], 露光時間 15[μ s]) を用いて記録し、飛翔体の姿勢と衝突時の貫入・クレータ形成の様子を観測した。

H₂O 氷に飛翔体が衝突したとき、衝突直後においてコーン状のイジェクタ噴出が発生した後、ターゲットからほぼ垂直方向に集中したジェット状イジェクタ噴出が発生することがわかった。この噴出は 100[ms] 以上にわたる長期間のもので、粘土への貫入における数ミリ秒程度の短いコーン状の噴出とは対照的な結果となった。また、貫入により破壊された氷の大部分が噴出されるため、粘土への貫入の際に発生するような、飛翔体が周りの物質に締め付けられて固定される現象が起らず、イジェクタと一緒に押し出されてしまう傾向があることが確認できた。飛翔体がターゲットから完全に離脱した後も衝撃波のもたらす破壊によるイジェクタ噴出は続いていた。この傾向は体積に対する衝突断面積が大きい機体において強く見られた。迎角がついた場合での貫入においても、細長形状の方が貫入を保つケースが多く見られた。そのため、貫入ミッション達成には細長形状の方が有利に働く可能性が高いことが考えられる。貫入後のクレータ形状は、中央の貫入部近傍のピット領域、その周辺の浅くなだらかなスポール領域、ターゲットの広範囲に延びるクラックからなり、氷への弾丸形状の衝突における先行研究 (e.g. Kato et al., Icarus 113(2) 423-441, 1995., Arakawa, Low Temperature Science 66 113-121, 2008) と定性的に一致している。衝突点で発生する圧力を一次元的近似である平板衝突近似 (Wada, JSIAM 16(4) 19-31, 2006) により見積もった結果、H₂O 氷のユゴニオ弾性限界圧力を大きく超えており、衝突点近傍で氷は剪断強度を喪失し、流体として振る舞うことが推測できる。

本研究は、科学研究費補助金 (基盤研究 (B)No.25289301) の支援を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

キーワード: 氷天体, ペネトレータ, クレータ, バリスティックレンジ

Keywords: icy object, penetrator, crater, ballistic range

遠心加速装置を用いた粉体層圧密過程の実験的研究 Experimental study of compaction process of powder bed by centrifuge experiment

大村 知美^{1*}; 木内 真人¹; Guettler Carsten²; 中村 昭子¹
OMURA, Tomomi^{1*}; KIUCHI, Masato¹; GUETTLER, Carsten²; NAKAMURA, Akiko¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ²Max-Planck-Institute for Solar System Research

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Max-Planck-Institute for Solar System Research

微惑星の集積においては、衝突時の圧力、周辺のガスによる圧力、自己重力によって空隙率が変化する (Kataoka et al., 2013)。小惑星などの再集積過程においても、衝突時の圧力や自己重力によってラブルパイル天体やレゴリス層の空隙率が支配されると考えられる。

地上で粉粒体を降り積もらせたときの空隙率と粒子半径の関係は、次のように書かれる (Yu et al., 2003; Kiuchi and Nakamura, 2014)。

$$p = p_0 + (1 - p_0) \exp\{-mR_F^{-n}\} \quad (1)$$

ここで R_F は粒子間に働く固着力と粒子にかかる重力の比で、粒子半径の関数である。 p_0 、 m 、 n は定数で、 p_0 は粒子間力が存在しない場合の空隙率である。

(1) 式が異なる重力下でも成り立つかどうかは確かめられていない。また、(1) 式は表面粒子の空隙率についてのもので、天体内部にどの程度適用可能かはわかっていない。すなわち、すでに積もっている粒子の空隙率が新しく粒子が降り積もることによりどのように変化するかはわかっていない。仮に (1) 式がすでに積もっている粒子にも適用できるとすれば、かける重力を大きくしていくことで R_F を小さくしたときの空隙率も (1) 式から得られる値に一致すると考えられる。そこで本研究では、重力加速度を変化させる実験を行い、その結果と (1) 式の比較を行う。

実験試料には全体の 60% が粒子直径 7.5-80 μm の粒子からなる海砂と、全体の 60% が 1-8 μm の粒子からなるフライアッシュを用いた。これらを直径 5.8 cm、深さ 3 cm のプラスチック製円筒形容器にふり入れ、カップからはみでた表面を水平にすり切り、それぞれ空隙率およそ 60%、70% にしたものを用いた。これに遠心加速装置を用いて 1-18 G の模擬重力をかけ、その時の圧縮の様子を装置に取り付けたカメラで観察した。一方向からピストンで圧縮する場合はかかる圧力に偏りが出ってしまうが、遠心加速器を用いた場合、容器内にかかる圧力を一様にするという利点がある (Mizuno et al., 1991)。模擬重力を印加した後に表面高さ変化を測定し、実験前後での空隙率の変化を調べた。表面高さの測定にはレーザー測距計を用いた。

実験の結果空隙率は、粉体の粒子直径がそれぞれ累積分布の中央値である 24 μm (海砂)、4.5 μm (フライアッシュ) であると仮定した場合の (1) 式とは、それぞれ空隙率 6% 以内、5% 以内で一致し、経験式と大きな矛盾はないことが分かった。海砂に注目すると、この粒子直径 24 μm というのは、海砂の大きな粒の周りに付着している小さな粒の大きさに近い。

キーワード: 微惑星, 小惑星, 空隙率, 高重力, 粉粒体

Keywords: planetesimal, asteroid, porosity, high gravity, powder and granular material

氷衛星表面を模擬した氷・砂混合物に対するクレーター形成実験 High velocity impact cratering experiments on ice-sand mixture simulating the surface of icy satellites

高野 翔太^{1*}; 荒川 政彦¹; 保井 みなみ²
TAKANO, Shota^{1*}; ARAKAWA, Masahiko¹; YASUI, Minami²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学自然科学系先端融合研究環

¹ Graduate School of Science, Kobe University, ² Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

はじめに：氷衛星、火星凍土、小惑星ケレスの地殻などは氷と岩石粒子の混合物からなると言われており、特に小惑星ケレスは、NASAの小惑星探査機 Dawn が 2015 年に到着して観測が行われる予定である。このケレスは、小惑星帯のメインベルトにあるので、その氷地殻には、様々なタイプの小惑星が衝突してクレーターを作る。衝突クレーターのサイズや形状は、衝突物質や地殻の種類、さらに衝突速度や地殻の内部構造により大きく変化する。そこで、ケレス表面のクレーターを調査することにより、衝突した小惑星の種類やその頻度、または、ケレス地殻の岩石含有率や内部構造などに関する情報を得ることができる。このような調査を実現するには、室内実験での十分な準備が必要である。すなわち、氷や氷・岩石粒子混合物、さらには内部構造を持つ表面に形成されるクレーターの特徴を明らかにする必要がある。加えて、それらの特徴が衝突物質の種類によりどのような影響を受けるかを詳細に調べる必要がある。

これまでクレーター形成効率に関する系統的な実験は主に純氷標的でのみ行われてきた。純氷に関しては 0.1km/s から 7km/s までの広い範囲で、数種類の弾丸を用いたクレーター形成実験が行われている。しかしながら、氷・岩石粒子混合物試料に対しては限られた条件でしか実験は行われてきていない。特に小惑星帯におけるケレスの氷地殻への衝突を考えると衝突速度 4km/s 以上での高速衝突実験を実現する必要があるが、その例は少ない。そこで本研究では 1km/s を超える高速度領域で、広い密度と強度範囲を持つ数種類の弾丸を用いて氷・岩石粒子混合物試料へのクレーター形成実験を行った。そして、クレーター形状やクレーター形成効率が純氷と比べてどのように変化するかを調べることにした。

実験方法：実験は 2013 年度から新しく稼働し始めた神戸大学の二段式水素ガス銃を用いて行った。ケレス地殻を模擬した氷・岩石粒子標的試料は、粒径 500 μ m の石英砂と水を質量比 80~83wt% になるように混ぜて準備した。その混合物を直径 15cm・高さ 5~10cm の円筒金属容器に入れ、-23 から -15 $^{\circ}$ C の冷凍庫で凍らせて作製した。弾丸には、直径 2mm のアルミ球、ジルコニア球、チタン球を用いた。それぞれの密度は、2.7g/cm³, 5g/cm³, 5.7g/cm³ である。これらの弾丸をナイロン製のサポに装填して速度 1.6~5.1km/s で発射した。標的試料は、衝突直前に衝突チャンバー内に設置し、真空引きを行い周囲と断熱する。実験時のチャンバー内の圧力は 200~230Pa の範囲内である。クレーター形成過程はイメージコンバーターカメラにより 5 μ s 毎に 18 回撮影した。この撮影画像から、衝突時のイジェクタ形状やその成長速度を調べて純氷との比較を行った。実験後は、試料に残されたクレーターの形状をノギスにより計測した。

実験結果：今回の実験から氷・岩石粒子混合試料では純氷試料と比べて Spallation が、どの弾丸、速度においても起きにくいことがわかった。この Spall に関する特徴から、深さ直径比の速度依存性・弾丸密度依存性も純氷試料とは異なる。クレーター直径は衝突エネルギーが同じ場合、氷・岩石粒子混合試料では純氷試料の約半分となることがわかった。Hiraoka et al (2004) では、氷・岩石混合物の岩石含有率を変えながら、ほぼ一定の弾丸エネルギーでクレーター形成実験を行った。この衝突実験と我々の実験結果と比較し、クレーター直径に関する特徴を調べることにする。結果、Hiraoka たちが行っていない高い含有率 80wt% のデータは、彼らの含有率 50% のデータとほぼ一致し、50% までの直径減少傾向が、80wt% までには続かないことを明らかにした。その結果、80~100wt% の間で急激にクレーターが小さくなることが予想される。これは、0~80wt% においては氷が強度を支配しているのに対して 80~100wt% では岩石自身が強度を支配するようになるからだと考えられる。また、Housen and Holsapple (2012) で提案されたクレータースケール則を用いて氷・岩石粒子混合試料に対する無次元パラメーター π_R と π_Y の関係を求めた。80wt% 岩石粒子試料の動的引張り強度は測定されていないので、30wt% の混合物試料の強度の値を用いた。この場合、 π_R と π_Y の関係は氷の場合と大きく異なった。そこで 80wt% 岩石粒子混合試料の強度を、例えば 100MPa にして、再度関係を求めてみると純氷の関係とほぼ一致するようになった。もしこれが正しいとすると 80wt% の岩石粒子混合試料の動的引張り強度は純氷の強度の 6 倍近くになることがわかった。

キーワード: 氷衛星, 氷・砂混合物, 衝突クレーター, 高速度衝突実験

Keywords: icy satellites, ice-sand mixture, impact crater, high velocity impact experiments

砂を伝播する衝突励起応力の減衰過程に関する実験的研究 Experimental study on the decay process of impact-induced stress propagating through granular materials

松榮 一真^{1*}; 荒川 政彦¹; 保井 みなみ²
MATSUE, Kazuma^{1*}; ARAKAWA, Masahiko¹; YASUI, Minami²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学自然科学系先端融合研究環

¹ Graduate School of Science, Kobe University, ² Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

はじめに: 衝突現象は惑星形成において最も重要な物理過程の一つであり, 太陽系内の固体天体にはその証拠として衝突クレーターが数多く存在する. 衝突クレーターのサイズは, 衝突天体のサイズ・物性・衝突条件, それに天体表面の構造や物性により変化する. 従って, クレーターの調査から衝突天体の物性や衝突条件に関する情報が得られる. km サイズを超えるクレーターでは, その形成過程は重力により支配されていると言われており, そのため粉粒体へのクレーター形成実験が今までに多く行われている. その結果, 重力支配域でも粉粒体の種類によってクレーターサイズが異なることが知られている. 一方, 最近の惑星探査では微小惑星の表面もレゴリス層で覆われていることがわかってきた. はやぶさ2の小型搭載型衝突装置(SCI)による衝突のような重力の小さな微小惑星のレゴリス層へのクレーター形成過程を予測するには, 粉粒体の物性がクレーター形成過程にどのように影響を与えているのかを解明する必要がある. 特に重力支配域においてはクレーターの掘削流がクレーターサイズを決める物理過程と考えられているので, 粉粒体の物性と掘削流の関係を明らかにする必要がある. そこで本研究では, 衝突時の掘削流の特徴を定量化するため, 粉粒体中を伝播する応力波を計測することにした. そして, この応力波の伝播・減衰が, クレーターサイズや粉粒体の物性とのような関係にあるかを調べることにした.

実験方法: クレーター形成時の応力波を測定できるように試料容器を準備した. 容器は, 大きさが10cm×10cm×10cmのアルミ製で, 粉粒体の厚みを1-10cmと変化させた. 計測に用いた圧力計は, 定格容量20kPa, 固有振動数約2kHzの歪ゲージ式センサーで, このセンサーを衝突点直下の底面に取り付けた. 実験は自由落下・神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を用いて行った. それぞれ実験では, 応力波形状とクレーターサイズの弾丸サイズ依存性・衝突速度依存性を調べた. 縦型銃の実験は大気圧下で行ったが, 加速用のガスが試料に直接当たらないようにサボと風除けを用いた. 標的試料には形状や表面荒さが異なる4種類の試料を準備した. それらは, ガラスビーズと石英砂であり, それぞれ粒径100,500 μ mを実験に用いた. 弾丸は自由落下の実験ではガラス球(直径7.75,10,15mm), ガス銃の実験はナイロン・アルミナ(直径3mm)を用いた. 衝突速度は自由落下では2-5.5m/s, ガス銃では60-70m/sと変化させた. それぞれの衝突実験において, クレーターサイズと圧力波形を観測した.

結果: クレーターサイズと弾丸運動エネルギーの関係は標的の種類により異なることがわかった. 特に, 100 μ mの石英砂では, 相対的に小さなクレーターしかできなかった. この理由を調べるため圧力波形の特徴を調べた. 自由落下実験による圧力波形は, 急激に圧力が増加し, 最大圧力に達した後に減少するが, ガラスビーズでは緩やかに減少し, 石英砂の場合は急激に減少した. 特に, 100 μ m石英砂では圧力計の固有振動が見られ, その圧力波形の持続時間が0.5ms以下であることを示唆している.

縦型銃の実験による圧力波形は, 石英砂の場合は自由落下の場合とほぼ同じ波形であったが, ガラスビーズの場合は砂の深さによって波形が異なった. 深さが深い場合は(5-10cm), 自由落下の場合と同じ形状だが, 浅くなると(-5cm)石英砂の波形の様に固有振動を示す波形となった. また, 速度が大きくなるとすべての波形に圧力計の固有振動が見られた. これらの圧力波形を最大圧力に達して以降 $P(t)-P(\infty)=A \exp(-t/\tau)$ (τ :緩和時間, A :定数)と指数関数的に減衰すると仮定して緩和時間を求めた. その結果, τ はガラスビーズでは 10^{-3} s, 石英砂では 10^{-4} sとなり, τ は砂の種類毎に変化する値であることがわかった. また, 圧力 P と伝播距離 r の関係は次のような式で表すことができる: $P(r)=P_0(r/L)^{-b}$ (P_0 :初期発生圧力, L :弾丸半径, b :減衰パラメータ). 減衰率 b は, 自由落下の実験では, -0.79(ガラスビーズ), -0.94(石英砂), ガス銃の実験では, -1.61(ガラスビーズ), -1.71(石英砂)となり衝突速度によって距離の減衰率が異なる結果となった.

自由落下の実験におけるクレーターサイズと深さ4cmで計測した最大圧力 P の関係を調べると砂の種類毎に大きく関係が異なることがわかった. 一方, この圧力とその緩和時間 τ の積から算出した力積 I との関係を調べると, 砂の種類によらず一つの直線でフィッティングすることができた. これは, 緩和時間 τ がクレーター形成効率の物性依存性を表す物理量であることを示唆している. 今後, この緩和時間が砂のどのような物性値と関係し, 物理状態により変化するか調べたい.

キーワード: 掘削流, 粉粒体, クレーター形成過程

PPS21-P15

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 29 日 18:15-19:30

Keywords: Excavation flow, Granular material, Cratering process

氷・岩石微惑星の衝突破壊に関する実験的研究：同サイズ天体の衝突破壊に対する衝突角度の影響 Effects of impact angles on the impact strength of icy and rocky planetesimals for the collision among equal size bodies

河本 泰成¹; 荒川 政彦¹; 保井 みなみ^{2*}
KOMOTO, Yasunari¹; ARAKAWA, Masahiko¹; YASUI, Minami^{2*}

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University

はじめに：これまで数多く微惑星に関する衝突破壊実験が行われてきたが、そのほとんどは弾丸と標的の質量差が大きなものばかりであった。天体の衝突破壊強度は、おおまかに言えばエネルギー密度（弾丸の運動エネルギー/弾丸と標的の質量）で表すことができるので、弾丸が標的に比べて小さい場合、一般には非常に早い速度でなくては衝突破壊は生じない。一方、微惑星の初期集積過程では、その相対衝突速度は数10 m程度であったと考えられているので、そのような低速では衝突破壊はほとんど起こらないことになる。しかしながら、初期集積過程では、微惑星間に大きなサイズ差がない状態で成長が起きたと考えられているので、同サイズ衝突での衝突破壊強度が重要となる。特に同サイズ衝突では、衝突破壊に必要な最低衝突速度を求めることができる。逆に言えば、この最低速度以下での衝突では、弾丸・質量比によらず微惑星の破壊は絶対に起こらないため、集積過程を議論する上で非常に重要な速度といえる。これまでは数10倍以上の質量差を持った弾丸・標的系での実験結果を同サイズ標的に外挿して用いてきたが、同サイズ衝突では衝突破壊のスケール則で良く用いられる衝撃波伝播の点源近似や終段階等価性が成り立つのは難しい。従って、同サイズ試料を用いた衝突実験により、実際の衝突破壊強度を求める必要がある。本研究では、氷、石膏、ガラスビーズ混合石膏を用いて同サイズ試料を用いた衝突実験を行った。これらの試料は、氷微惑星、コンドライト隕石母天体の微惑星を模擬している。さらに、正面衝突だけでなく衝突破壊に対する衝突角度依存性も調べた。

実験方法：氷、ガラスビーズ混合石膏、そして石膏を用いて直径25mmと30mmの球形試料を作成した。それぞれの試料は型に溶液を流し込むことにより作成した。衝突実験には、その速度に応じて3種類の装置を用いた。それらは、バネ銃（低速度用）、縦型ガス銃（氷用）、横型ガス銃（石膏用）である。なお、衝突速度は4~160m/sとした。また、衝突点を試料の中心からずらすことにより斜め衝突実験も行った。この時の角度は0（正面衝突）から80°（ほぼすれ違い衝突）とした。実験の様子は高速ビデオカメラで観測し、実験後の衝突破片はすべて回収して質量分布を計測した。さらに、回収破片とビデオ上で確認できる破片をできるだけ同定することにより、速度・破片質量分布も調べた。

結果：同サイズ試料衝突の場合のエネルギー密度は、換算質量を用いた系の運動エネルギーにより定義することにした。この重心系での運動エネルギーを用いたエネルギー密度を用いて衝突破壊強度 Q^* を求めると氷、石膏試料では、質量比が10倍以上異なる衝突実験で得られた値とほぼ同じ値を示した。一方、ビーズ入り石膏試料では質量差10倍以上の衝突実験より小さい値となった。これは、破壊様式が同サイズ試料衝突では点源近似が成り立つ衝突とは大きく異なるからだと思われる。斜め衝突では、角度が大きくなるにつれて最大破片は小さくなっていった。そこで、衝突速度の法線方向の速度成分だけを使ったエネルギー密度を用いてデータを整理するとほぼすべてのデータは、それぞれの試料で一つの直線に乗ることがわかった。また、計測した破片速度から再集積条件を見積もった。その結果、氷微惑星は直径20kmより大きな天体ならば破片は再集積し、普通コンドライト母天体を形成した微惑星は直径5.2kmより大きな天体ならば再集積することがわかった。そして、コンドリュールを含まない多孔質岩石微惑星は直径6.7kmより大きければ再集積することがわかった。

キーワード: 微惑星, 斜め衝突, 衝突破壊強度, エネルギー分配, 再集積

Keywords: Planetesimals, Oblique impact, Impact strength, Energy partition, Re-accretion

多孔質物質の動的圧密実験：微惑星前駆天体の衝突圧密への応用 Dynamic compaction experiments of porous materials: Implications for impact compaction of pre-planetesimals

保井 みなみ^{1*}; 横田 みずき²; 坂本 花菜²; 荒川 政彦³

YASUI, Minami^{1*}; YOKOTA, Mizuki²; SAKAMOTO, Kana²; ARAKAWA, Masahiko³

¹ 神戸大学自然科学系先端融合研究環, ² 神戸大学理学部地球惑星科学科, ³ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
¹Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, ²Faculty of Science, Kobe University, ³Graduate School of Science, Kobe University

はじめに：微惑星形成過程において、cm サイズから km サイズ（微惑星前駆天体と呼ぶ）への成長メカニズムは、2つの説が提唱されている。1つは、赤道面に沈殿、濃縮したダストアグリゲイトが自己重力によって分裂・収縮し、微惑星を形成すると唱えた重力不安定説、もう1つは、衝突合体を繰り返してダストアグリゲイトから微惑星へと成長すると唱えた直接合体成長説である。本研究では、直接合体成長説に着目する。この説では、微惑星前駆天体同士が衝突を繰り返すことで内部密度が上昇し、その後の衝突で反発や衝突破壊が起こり、合体成長が妨害されるという問題点がある。そこで、衝突によって変化する微惑星前駆天体の最終密度分布を調べたのが坂本（2013、卒論）である。坂本は高空隙の雪にステンレス円柱を自由落下させる衝突圧密実験を行い、衝突時の衝突応力と圧密分布、圧密領域の大きさの関係を明らかにした。しかし、坂本の研究では衝突速度が0.7~3.5m/sと微惑星前駆天体の比較的小さい平均衝突速度範囲で実験を行っている。そこで本研究では、微惑星前駆天体の圧密メカニズム、衝突応力、圧密分布を調べるため、5m/s以上の速度範囲での多孔質物質の衝突圧密実験を行った。

実験方法：標的には、岩石および氷微惑星前駆天体を模擬したパーライトと雪を用いた。雪の初期空隙率は70、80%、パーライトの初期密度は85kg/m³である。雪の衝突実験は北大低温研の低温室(-10℃)、パーライトの実験は神戸大で行い、横型一段式軽ガス銃及び縦型一段式軽ガス銃を使用した。雪の実験は縦型銃のみを使用した。アクリル筒内に液体窒素内に噴霧して作成した氷粒子(40~200μm)、または市販のパーライト粒子(2.2~3.4mm)を深さ12cmになるように入れ、2cm間隔で染色した氷粒子またはパーライトで境界を5層作り、深さに伴う密度変化を観察出来るようにした。このアクリル筒内の標的の上にピストンを設置し、弾丸でピストンを加速させて標的を圧密した。弾丸は、横型銃では直径25mmの弾性ボールを用い、縦型銃では直径30mmの円筒サボを取り付けた弾性ボールを用いた。ピストンは、直径30mm、高さ10~30mmのポリカーボネイト、アルミ、ポリアセタール円盤を用いて、ピストンによる圧密の違いを調べた。弾丸の衝突速度は2~118m/sである。衝突の様子は高速度ビデオカメラで撮影し、撮影速度は6000~10000fps、露出時間は20~100μsとした。

実験結果：まず、ピストンの加速度から求める衝突応力 σ_p と、エネルギーの保存式から求める木下式高度 Y を比較した。その結果、 σ_p と Y はパーライト、雪、共に1対1の関係にあることがわかった。

次に、標的の平均最終密度 ρ_f を決める物理量を求め、 ρ_f を求めるモデル式を決定した。パーライトは粒子の破碎による圧縮によって圧密が進行する。衝突により破壊された破片質量 Δm を運動量と運動エネルギー E_k と比較した結果、運動エネルギーと相関があり $\Delta m = 10^{-3} E_k^{0.4}$ という経験式が得られた。また、破碎した破片が未破壊のパーライト粒子間の隙間を埋めると仮定して圧密前後の標的質量保存式を用いると、モデル式 $\rho_f = \rho_i / (1 - \Delta m / m_t)$ (ρ_i : 標的の平均初期密度、 m_t : 標的質量) が得られた。またこのモデル式は実験値とよく一致した。

一方、雪の場合、氷粒子間の隙間が小さくなることによって圧密が進行する。このことから、パーライト同様圧密前後の標的質量保存式を用いて、モデル式 $\rho_f = m_t / (L_0 - \Delta L) S$ (L_0 : 標的の初期深さ、 S : 標的の底面積、 ΔL : 標的の圧密前後の長さ変化量) が得られた。ここで、 ΔL は衝突応力と歪速度の関係から得られた圧縮粘性係数 η を用いて $\Delta L = E_k / A \eta v_p S$ (v_p はピストン速度、 A は定数) となる。このことから、雪の平均最終密度は運動量によって決まり、実験値ともよく一致した。

最後に、標的最上層の最終密度 ρ_{f1} と衝突応力 σ_p の関係を調べた。その結果、パーライトでは $\rho_{f1} = 3.0 \sigma_p^{0.8}$ (kPa)、雪では $\rho_{f1} = 127 \sigma_p^{0.3}$ (kPa) という関係が得られた。しかし雪は、 $\sigma_p > 100$ kPa になると ρ_{f1} にばらつきが見られる。これは、圧密メカニズムの違いが原因と考えられる。100kPa以下では雪の初期空隙率で圧密メカニズムは変化しないが、100kPa以上の場合、初期空隙率70%では衝撃波の伝搬による圧密が起こり、初期空隙率80%では衝突直後に上層部が最終密度まで圧密し、その後下層部が時間と共に同時に圧密されることがわかった。一方、パーライトは全ての応力範囲で破碎圧密が起こっているため、データのばらつきはほとんどみられなかった。

キーワード: 微惑星前駆天体, 動的圧密, 衝突実験, 最終密度, 木下式硬度, 圧縮粘性係数

Keywords: pre-planetesimal, dynamic compaction, impact experiment, final density, Kinoshita strength, compression viscosity

粒径分布が粉体の熱伝導率に与える影響の実験的調査 Effect of particle size distribution on thermal conductivity of powdered materials

坂谷 尚哉^{1*}; 小川 和律²; 本田 理恵³; 荒川 政彦⁴; 田中 智²
SAKATANI, Naoya^{1*}; OGAWA, Kazunori²; HONDA, Rie³; ARAKAWA, Masahiko⁴; TANAKA, Satoshi²

¹ 総合研究大学院大学, ² 宇宙科学研究所, ³ 高知大学, ⁴ 神戸大学

¹The Graduate University for Advanced Studies, ²Institute of Space and Astronautical Science, ³Kochi University, ⁴Kobe University

月表層レゴリスのような粉体の熱輸送メカニズムを理解することは、惑星の熱進化と現在の熱的状態を推定する上で重要である。粉体物質の熱伝導率は粒径やその分布、温度、圧縮応力など様々なパラメータに依存し、その程度によっては 1 桁以上変化するものである。実験的な研究が少ないため、熱輸送メカニズムの理解は不十分であり、実際の天体上の粉体熱伝導率を制約することは困難である。

本研究の目的は、熱伝導率のパラメータ依存性の系統的な調査によって、熱輸送メカニズムを理解することである。それによって熱伝導率をモデル化し、天体上の熱伝導率推定に応用する。これまでの粉体の熱伝導率に関する実験的研究の多くは、粒径が揃った粉体サンプルを用いたものであった。しかし、月レゴリスは μm サイズから mm サイズまでの粒子の混合物である。また、コンドライト隕石の母天体の構成粒子は、マトリックスサイズとコンドリュールサイズの粒子の混合物だと考えられる。このような粒径分布を持った粉体の熱伝導率に関する研究は、これまでに二例のみしか行われていない (Woodside and Messmer, 1961; Huetter et al., 2008)。本発表では、真空下において粉体の熱伝導率測定実験を行い、粒径分布の影響を調査した結果を報告する。

用いたサンプルはガラスビーズであり、粒径 $100 \mu\text{m}$ と $200 \mu\text{m}$ の混合物である。調製したサンプルは全 5 種類であり、それぞれの粒径の質量混合比は 1:0, 2:1, 1:1, 1:2, 0:1 である。それぞれのサンプルの空隙率は 0.38, 0.35, 0.32, 0.35, 0.38 であった。これらのサンプルの熱伝導率は line heat source 法で測定した。

実験の結果、単一粒径サンプルの場合、 $100 \mu\text{m}$ と $200 \mu\text{m}$ のガラスビーズの熱伝導率はそれぞれ 0.0023 W/mK と 0.0035 W/mK であった。この熱伝導率の増加は、主に熱輻射の寄与の増加が原因である。一方、粒径混合物については、混合比 2:1, 1:1, 1:2 のサンプルの熱伝導率はそれぞれ $0.0039, 0.0029, 0.0039 \text{ W/mK}$ であり、粒径混合物の熱伝導率は空隙率と良い相関を持っていた。また、測定された熱伝導率と混合率の間には直線関係は見られず、M 字型の変化を示すことが明らかになった。

測定した熱伝導率は、粒子間の接触面を通った熱伝導の寄与である固体伝導率と粒子表面間の熱輻射の寄与である輻射伝導率の和で表される。本実験で得られた結果は、固体伝導率と輻射伝導率の粒径分布変化による増減の程度によって説明されると考えられる。したがって、実験結果の解釈のためには、測定された値を固体伝導率と輻射伝導率に分離する必要がある。これは、輻射伝導率の強い温度依存性を利用し、熱伝導率の温度依存性を調査することによって可能となる (坂谷 他, 2013)。本発表では、各調製サンプルに対して熱伝導率の温度依存性の測定結果を合わせて、固体伝導率と輻射伝導率の粒径分布依存性についての結果を報告する。

焼結ガラスビーズの熱伝導率と音速の測定実験 Measurement experiments of thermal conductivity and sound velocity in sintered glass beads

津田 彰子¹; 小川 和律^{1*}; 坂谷 尚哉²; 荒川 政彦³; 保井 みなみ³
TSUDA, Shoko¹; OGAWA, Kazunori^{1*}; SAKATANI, Naoya²; ARAKAWA, Masahiko³; YASUI, Minami³

¹ 東京大学, ² 総合研究大学院大学, ³ 神戸大学

¹The University of Tokyo, ²The Graduate University for Advanced Studies, ³Kobe University

The thermal conductivity and sound velocity of sintered particle materials (glass beads) were experimentally measured, and a correlation between them was investigated. Particles have often played important roles in the solar system history. Especially dust particles condensed in the early solar nebula formed planetesimals, and they remained as the main structure material of the bodies. The particles were then gradually sintered as temperature increased by disintegrations of radioactive isotopes. Finally, a part of planetesimals might be completely sintered and began to melt. Currently the sintered materials may also exist on the lunar and asteroid subsurface for example. Mechanical and thermal properties of such sintered materials are essential information for investigating the history of these bodies.

In the thermal issues, particles are known as a strong thermal insulator in vacuum. Although the thermal conductivity of sintered materials has never been measured, it is considered to be a value between the unsintered and a continuous rock, depending on degree of the sintering process. Concerning the sound velocity, characteristic feature depending on the sintering degree is expected to be similar to the thermal conductivity, because basically the phonon conduction is a common mechanism for both the thermal and sound phenomena in electrical insulation materials.

In this presentation, we report results of the first experiments of the thermal conductivity and sound velocity measurements in sintered particle materials. For measurement samples, 9 different blocks of sintered soda-lime glass beads were prepared: three bead diameters of 180-255, 355-500, and 710-1000 μm , and three degrees of sintering that have nearly the same porosity 40%. The cross section of sintering contact sites (neck) was evaluated for each sample. The thermal conductivity was measured by the line heat source method by a line heater and temperature sensors given in the sample in advance. The sound velocity was directly measured by a transmitter and receiver put at both ends of the block samples.

As results of the experiments, both the thermal conductivity and the sound velocity had an apparent correlation with each other, and with degree of sintering. They appeared almost in proportion to the neck diameter, which feature obviously indicates that the neck or contact size controls the bulk thermal and sound conductions, in weakly-sintered particle systems at least. These results can be directly applied to estimation of thermal and mechanical property of the ancient planetesimals. These results also suggest that the thermal conductivity of sintered materials, and also of unsintered particles probably, can be evaluated by measurements of the sound velocity.

キーワード: 粉体, レゴリス, 熱伝導率, 音速, ガラスビーズ

Keywords: Particle material, Regolith, Thermal Conductivity, Sound velocity, Glass beads

土星を模した磁場中で磁軸対称の石が相互に干渉しあうことを証明するための実験 ～土星の環を生成し維持する力～ Experiment to know the power to pull mutually between things that are axisymmetric for the Saturn's-like magnetic axis

間瀬 博文^{1*}
MASE, Hirofumi^{1*}

¹ 所属なし

¹ none

土星の磁場は巨大な双極子磁場と言えるほど整っており、さらにこの磁軸は自転軸と一致している(1)。この観測事実は奇跡的である。さらに土星の環は土星の赤道面を公転している(2)。これが自明であるとの説明はいまだなされていないと思われる。故にこの観測事実も奇跡的である。

美しい環の奇跡的な存在理由を、これまでに確認されている上述の奇跡的な特徴に結び付けて考えたい。双極子磁場の中心を通り磁軸に垂直に交差する面(磁場赤道面という)上では磁軸対称にあるもの間で相互に引き合う力(割増引力)が発生する。つまり環を構成する物質は割増引力によって180度反対側の物質と繋がれるために土星の環は生成され維持されている。この理論を証明する実験に取り組んでいるので成果を紹介する。

理論を簡単に説明したい。磁石では電子のスピンが一方(磁軸に平行)に揃うとされる。電子には周囲から常時エネルギーが流入する(私は電子はエネルギー補給なしで万年運動できるほど目出度いものとは考えない)。磁場赤道面に沿う方向ではスピンのためのエネルギー消費が多いからそれを補給するため流入量も多い状態(逆に磁軸方向は少ない状態)になる。磁石の磁場赤道面上に磁軸対称になるよう2個の普通の石を配置する。「衛星(石)A - 天体(磁石)B - 衛星(石)C」の並びで、A,B,C(の電子1個あたり)に流入する磁場赤道面上のエネルギーの大きさでは「A普通 - B多い - C普通」の並びである。これは私が提唱してきた2温度回転円盤そのものなのでAとCが割増引力で引き合う(3)。

****実験の構成(図面を参照)**

A,C:天然砥石(砂岩)を切断したもの(34L×25W×25H)

B:永久磁石(異方性フェライト,40L×40W×10H,表面磁束密度B=79mT,吸引力F=2.746kgf)を4~8個を重ねたもの(40L×40W×40~80H)

装置箱:市販の二段ボックス(木質)を横に寝かせた状態(280L×580W×410H)で利用する。中板を境に左室、右室と呼ぶ。中板に150×150程度の穴を、左室の天板に50×50程度の穴を開ける(中板に近い位置)。天板の穴の上にはφ65×1,000Lの塩ビパイプを取り付ける。左室の前面はベニヤ板を枠としたガラスを張る。右室は前面がそのまま開放である。150×150×3tのベニヤ板に穴を開けBをはめ込んだ状態で穴とBの間隙をコーキングする。そのベニヤ板を中板に中板の穴を塞ぐように貼り付ける。左室は塩ビパイプ上端以外は気密状態となる。

Aは天井から2本の糸(1,700L)で吊り下げられ左室内で自由揺動できるが静止点ではBとの間隙が20mm程度であるとする。Cは右室内天板から糸で吊るされ、Cの右側面には別の糸の端が接着されている。装置箱の右側から糸を引けばBからCを離す(状態C1)ことができ、緩めればCをBに間隙が20mm程度に接近させる(状態C2)ことができる。

****変化させる条件** Bの構成と向きを変化させ次の3通りとした。条件1:縦8個重ね(磁軸鉛直)、条件2:縦4個重ね(磁軸鉛直)、条件3:横4個重ね(磁軸左右水平)

****毎回の手順** 1.Aを極力静止させる(状態C1)。2.ビデオカメラでAの撮影を開始する(状態C1)。3.開始2分後C1からC2へ(状態C2)。4.開始4分後C2からC1へ(状態C1)。5.開始6分後C1からC2へ(状態C2)。6.開始8分後撮影を終了する。

****結果** 完全静止は困難で撮影開始時、Aは微小に揺動していた。1.条件1及び条件2の場合、最初の(状態C2)の時間帯に揺動が抑制され、2回目の(状態C2)の時間帯に揺動が増幅された。2.条件3の場合、全時間中にAの特別な変化は認められなかった。

****考察** 条件2と条件3の比較により静電気や磁気の悪影響はないと考えてよさそうである。予想した力が検出されている可能性がある。

参考文献

(1)堀安範(2013)/「第13回森羅万象学校」/国立天文台

http://th.nao.ac.jp/MEMBER/hori/pdf/HORI_2013Mar26_part1.pdf P23

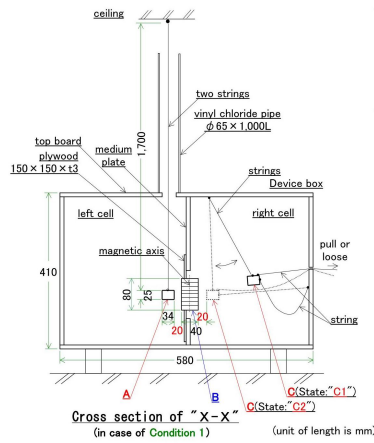
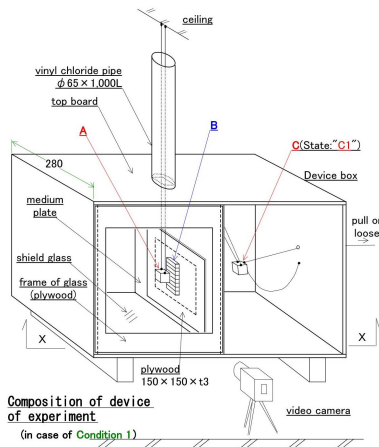
(2)平塚市博物館/「土星の耳 リングの消失」http://www.hirahaku.jp/hakubutsukan_archive/tenmon/00000050/59.html

(3)間瀬博文(2008)/『ひので』(SOLAR-B)の観測成果により得られた、巨大フレアの典型事例の解法/地球惑星科学連合2008年合同大会/E108-P007

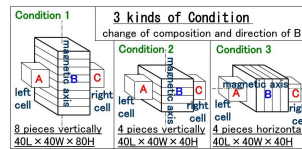
PPS21-P20

会場:3階ポスター会場

時間:4月29日 18:15-19:30



A, C: natural whetstone(sandstone)
 34L x 23W x 23H
 B: permanent magnet(anisotropic ferrite, 40L x 40W x 10H,
 B=79mT, F=2.746kgf) piled up 4~8 pieces
 40L x 40W x 40~80H



チェリャビンスク隕石の組成・組織の不均質性 Compositional and textural inhomogeneity of Chelyabinsk meteorites

荒井 朋子^{1*}; 阿部 新助²; 大塚 勝仁³; 廣井 孝弘⁴; 小松 睦美⁵; フェイガン ティム⁵
ARAI, Tomoko^{1*}; ABE, Shinsuke²; OHTSUKA, Katsuhito³; HIROI, Takahiro⁴; KOMATSU, Mutsumi⁵; FAGAN, Tim⁵

¹ 千葉工業大学 惑星探査研究センター, ² 日本大学 理工学部, ³ 東京流星観測網, ⁴ ブラウン大学, ⁵ 早稲田大学
¹Chiba Inst. of Technology, Planetary Exploration Research Center, ²Nihon University, ³Tokyo Meteor Network, ⁴Brown University, ⁵Waseda University

Meteorites are important sources of information on composition and age of the solar system materials. However, collected meteorites are likely biased and unrepresentative of the near-Earth meteoroid population. Mineralogy and reflectance spectra of meteorites are used to link specific classes of meteorites and asteroids, but are not definitive enough. Meteorites of which fall were witnessed are rare and substantial case when meteorites and their parent bodies are directly linked, and both orbital and material data of the near-Earth bodies are known. The fireball was eye-witnessed near Chelyabinsk city of Russia in 15 February 2013, and associated meteorites of total mass of 4-6 ton, were subsequently recovered. Survey of physical and chemical nature of small bodies with an Earth-crossing orbit is crucial in understanding the origin and evolution of the near-Earth materials and in planetary defense. While near-Earth objects (NEO) >1 km dia. have been largely identified by NEO survey programs, most NEOs <?100 m dia. remain unknown. Thus, it is important to study the Chelyabinsk-sized objects. We present mineralogy and reflectance spectra of several chips of Chelyabinsk meteorites, which indicate chemical and spectral inhomogeneity, suggesting the complex history of the parent body.

キーワード: チェリャビンスク隕石, 隕石衝突, 不均質性
Keywords: Chelyabinsk meteorites, Meteoroid impacts, Inhomogeneity

岩石学的タイプ7コンドライトの特徴と分類 Classification and petrologic features of chondrites of petrologic type 7

木村 眞^{1*}; 山口 亮²; フリードリック ジョン³
KIMURA, Makoto^{1*}; YAMAGUCHI, Akira²; FRIEDRICH, Jon³

¹茨城大学 / 極地研究所, ²極地研究所, ³フォーダム大学 / アメリカ自然史博物館

¹Ibaraki University / National Institute of Polar Research, ²National Institute of Polar Research, ³Fordham University / American Museum of Natural History

Chondrites are classified into petrologic types 1-6, which distinguish the degrees of aqueous alteration (types 1-2), and thermal metamorphism (types 4-6). In addition, a petrographic type 7 has also been proposed to indicate an even higher degree of thermal metamorphism [1]. Such chondrites contain only relict chondrules, and plagioclase is commonly coarse-grained. Low-Ca pyroxene contains >1% CaO. However, most of these chondrites may actually be melt rocks or melt breccias [2], and the occurrence of a type 7 is controversial problem. However, LEW 88663 seems to be a genuine type 7 chondrite [3], not a melt rock.

Here we report the preliminary results of our petrographic study on ordinary chondrites classified as type 7, to explore their thermal history, classification, and genetic relationships to melt breccia and others.

Many chondrites are classified as type 7 in NIPR and other collections (77 chondrites at present). However, the detailed petrography has been rarely reported for these chondrites. Here we studied 4 H7, 4 L7, and 4 LL7 in NIPR collections. We also examined Uden (LL7).

All of the chondrites studied here show a well recrystallized texture. Triple junctions among olivine and pyroxene is commonly observed. However, Y-790124 and -790446 include many chondrules, indicative of type 6. A-880844 and -880993 contain clasts of various petrologic types, and are genomict breccias (H5-6 and LL4-6, respectively). Although Y-790144 does not seem to contain any chondrules, it is shock-darkened chondrite, and has lost its original texture.

Y-74160 has been extensively studied [e.g., 4]. This chondrite, Y-791067, and Uden consist of clasts among fine-grained matrix. The clasts comprise coarse-grained olivine, low-Ca pyroxene, and plagioclase. Olivine is typically included as chadacryst in pyroxene. The matrix is also highly recrystallized. Friedrich et al. [5] suggested that Y-74160 and Uden were subjected to Fe-FeS mobilization. These chondrites experienced partial melting, recrystallization, and brecciation, and may be classified as recrystallized breccias.

On the other hand, five chondrites, Y-75008, -790120, and -790960 (H7s), Y-82088 (L7), and Y-82067 (LL7), contain no or only a few relic chondrule in each section. They show highly recrystallized texture, and are not subjected to brecciation and melting. Y-82067 has composition identical to equilibrated LL chondrites [5]. These five chondrites are temporarily classified as type 7, if type 7 chondrite is defined to have experienced only a high degree of thermal metamorphism.

We are now examining modal mineral abundances and conducting mineral analyses, which will shed light on the classification criteria for type 7 chondrites.

References: [1] Dodd et al. (1975) GCA, 39, 1585-1594. [2] Huss et al. (2006) in Meteorites and the Early Solar System II. [3] Mittlefehldt and Lindstrom (2001) MAPS, 36, 439-457. [4] Takeda et al. (1984) EPSL, 71, 329-339. [5] Friedrich et al. (2014) submitted to GCA.

キーワード: 普通コンドライト, タイプ7, 熱変成作用

Keywords: ordinary chondrite, type 7, thermal metamorphism

CR2 コンドライト中に見つかったエクロジヤイト的クラストの起源：巨大な微惑星の頻繁な衝突破壊の証拠？ Origin of eclogitic clasts in a CR2 chondrite: Evidence of frequent collisions and disruptions of large planetesimals?

比屋根 肇^{1*}; 杉浦 直治¹; 木多 紀子²; 木村 眞³; 森下 祐一⁴; 竹鼻 祥恵¹
HIYAGON, Hajime^{1*}; SUGIURA, Naoji¹; KITA, Noriko T.²; KIMURA, Makoto³; MORISHITA, Yuichi⁴; TAKEHANA, Yoshie¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² 米、ウィスコンシン大学マディソン校、地球科学教室, ³ 茨城大学理学部, ⁴ 静岡大学大学院理学研究科

¹Graduate School of Science, The University of Tokyo, ²Department of Geoscience, University of Wisconsin -Madison, USA, ³Faculty of Science, Ibaraki University, ⁴Department of Geosciences, Shizuoka University

NWA801 (CR2) コンドライト中に見つかったエコンドライト的クラストは、惑星科学において次のような重要性を持つ (Sugiura et al., 2008; Kimura et al., 2010, 2013): (i) エコンドライトがコンドライトより早く形成された強い証拠である、(ii) クラストにはエクロジヤイト的な鉱物相 (ザクロ石とオンファス輝石) が含まれており、高压で生成されたことが示唆される (~3 GPa, ~1000 C; Kimura et al., 2013)、(iii) クラストにはグラファイトを含む岩相 (GBL) と含まない岩相 (GFL) が含まれており、GBL におけるグラファイトの存在はユレイライトとの関連性を示唆する。

我々はクラスト中のいくつかの鉱物に対してイオンマイクロプローブによる酸素同位体分析、希土類元素分析をおこなった (Hiyagon et al., 2014)。本講演では、新しく得られたデータおよび拡散計算をもとに、クラストが巨大微惑星内部での高压により作られたのか、衝撃圧によりつくられたのかについて議論する。

鍵となる観測事実は次のとおりである。(1) オリビン粒子 (~20 ミクロン) は化学的にほぼ均一で Mg# 66-68 を示す。(2) ほとんどの opx (~20 ミクロン) は均一で Mg# 70-75 であるが、大きな opx 粒子 (50-80 ミクロン) には Mg に富むコア (Mg# 78-87) がある。(3) 異なる地質温度圧力計 (opx-cpx, garnet-cpx, garnet-opx, garnet-ol の鉱物ペアに対する 7 つの式) が整合的な温度圧力 (940-1080 C, 2.8-4.2 GPa) を示す。(4) すべての酸素同位体データ (ol + opx) は傾き ~0.6 の相関線上に乗る。GFL のデータ (ol) は均一で CCAM line の近くにプロットされ (delta18O ~+5 パーミル) るが、GBL のデータ (ol + opx) は delta18O が +2.4 から +4.4 パーミルまでばらついている。(5) 希土類元素を含む主要な鉱物はクロルアパタイト (軽希土類、重希土類とも) およびザクロ石 (重希土類) である。GBL および GFL の希土類元素バルク組成の推定値は、それぞれ ~1.2 x CI, ~1.8 x CI の存在度でほとんどフラットなパターンである (分別を示さない)。

二つの岩相のグラファイトの有無は、smelting と呼ばれる反応、FeO (silicate) + C (graphite) = Fe (metal) + CO (gas)、の有無が関与していると考えられる。すなわち、GBL は微惑星の深い場所で、GFL は微惑星の浅い場所で生成された可能性がある。

我々は、衝撃圧縮モデルおよび静水圧モデルの二つのモデルについて考察する。拡散の計算に基づいて、次のような議論をおこなった。(1) オリビンおよび opx のほとんど均一な Fe/Mg 比 (一部の opx には Mg に富むコアが見られる) を説明するためには、~1000 C で 120-800 年間の加熱が必要である。(2) GBL に見られる酸素同位体不均一は、オリビンの Fe/Mg 比が均一化する前につくられている必要がある。(3) 異なる地質温度圧力が整合的な温度圧力を示すためには、異なる鉱物ペア間の異なる元素の分配が平衡に達している必要がある。このことは、静水圧的な高压モデルを強く示唆する。(5) 異なる地質温度圧力計の示す値の整合性はまた、数百年間の加熱の後に急冷されたことを示唆するが、このことは微惑星の破壊を示唆しているかもしれない。

本研究の結果は、太陽系の進化過程のある段階での、巨大微惑星の頻繁な衝突と破壊を示唆しているのかもしれない。

参考文献: Kimura M. et al. (2010) (abstract) *Meteoritics and Planetary Science* 45, A105; Kimura M. et al. (2013) *American Mineralogist*, 98, 387-393; Sugiura N. et al. (2008) (abstract) *Meteoritics and Planetary Science* 43, A149. Hiyagon H. et al. (2014) in preparation.

キーワード: エクロジヤイト, CR コンドライト, 酸素同位体, 希土類元素, 微惑星衝突, 拡散

Keywords: eclogite, CR chondrite, oxygen isotopes, rare earth elements, collisions of planetesimals, diffusion

アングライト母天体の半径の推定 Estimation of the size of the angrite parent body

鈴木 博子^{1*}; 小澤 一仁¹; 永原 裕子¹; 三河内 岳¹
SUZUKI, Hiroko^{1*}; OZAWA, Kazuhito¹; NAGAHARA, Hiroko¹; MIKOUCHI, Takashi¹

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

¹ Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

アングライト隕石は非常に古い結晶化年代 (4557 - 4564Ma) を持つ隕石であり (Brennecke and Wadhwa, 2012; Kleine et al., 2012)、分化した原始惑星のマグマ固結物 (e.g. Prinz and Weisberg 1995; Baker et al., 2005; Weiss et al., 2008; Suzuki, et al., 2012) と考えられている。このため、アングライト隕石は太陽系最初期の分化した微惑星?原始惑星の情報を持つと考えられ、惑星の形成や分化を明らかにする上で重要である。しかし、その母天体は見つかっておらず、その形成進化過程を知る上できわめて重要な情報である天体サイズは不明である。アングライト母天体の半径の下限値は、ダイナモの存在から示唆される核形成のためには、²⁶Al の壊変による発熱で充分長期間にわたって天体内部が高温に保たれている必要があることから半径 100~200km 以上とされている (Weiss et al., 2008; Elkins-Tanton et al., 2011)。一方、半径の上限値は、揮発性成分に乏しいこと (Papike et al., 2003) や、スピネルの反応組織を高圧条件での反応であると考え (Kuehner et al., 2006) から、水星サイズ (半径 2440km) という主張もあるが、まったく制約されていないと言って良い。このため、アングライト母天体半径により強い制約を課す必要がある。

本研究では、アングライト隕石の一つである D'Orbigny に含まれる真球状気泡 (Varela et al., 2005; McCoy et al., 2006) に着目して、アングライト母天体の半径の推定を行った。真球状の気泡サイズは 0.3 ? 25 mm (McCoy et al., 2006; Kurat et al., 2004) で、周囲は細粒の初期晶出相である olivine と plagioclase にのみ囲まれており、これらの結晶化開始時に気泡の形が凍結されたことがわかる。冷却速度を計算すると数度/時という速い速度が推定され、D'Orbigny は母天体表層で固化したと考えると良い。また、気泡の濃集層が存在することから気泡がメルト中を運動していたと考えられる。上昇する気泡の形を支配する無次元数には、慣性力と粘性力の比を代表するレイノルズ数、浮力と表面張力の比を代表するエトベス数、気液密度比、気液粘性率比があり、中でもレイノルズ数とエトベス数は天体の重力に依存するため、母天体の半径の制約に用いる事が出来る。上昇している気泡が球状になるか非球状になるかを分けるレイノルズ数とエトベス数の関係は、Bhaga and Weber (1981) の実験や Hua and Lou (2007) の数値計算結果により推定されている。D'Orbigny マグマのレイノルズ数とエトベス数を計算するにはメルトの密度や粘性を推定する必要がある。特に重要なのは、これらに大きな影響を与える気泡凍結時の温度である。これは、最初に結晶化した olivine の準安定リキダス温度とし、MELTS (Ghiorso and Sack, 1995) を用いて推定した。この他、最大気泡直径 25mm、表面張力を 0.35N/m (Walker and Mullins, 1981)、凍結時の気泡表面の結晶被覆率を 0.5、金属核を持つ天体である 4 Vesta 程度の母天体密度 4000kg/m³ (Zuber et al., 2011) を用いて、D'Orbigny マグマのアングライト母天体表層でのレイノルズ数とエトベス数の関係を求めた。これらと、球状・非球状領域の境界線との交点から、母天体の半径の上限を 700 ± 100km と推定した。これは、先行研究で主張されていた水星の半径よりかなり小さな値である。

キーワード: アングライト, 微惑星, 母天体半径, 微惑星内部構造, ドビグニー, 原始惑星

Keywords: angrite, planetesimal, parent body radius, parent body internal structure, D'Orbigny, protoplanet

Almahata Sitta および南極産ユレイライトに見られる α 鉄、 γ 鉄、鉄化合物の結晶化実験

Crystallization experiment of alpha-Fe, gamma-Fe and iron compounds found in the Almahata Sitta and Antarctic ureilites

青柳 雄也^{1*}; 三河内 岳¹; 杉山 和正²; 横山 嘉彦²; Goodrich Cyrena A.³; Zolensky michael E.⁴

AOYAGI, Yuya^{1*}; MIKOUCHI, Takashi¹; SUGIYAMA, Kazumasa²; YOKOYAMA, Yoshihiko²; GOODRICH, Cyrena A.³; ZOLENSKY, Michael E.⁴

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 東北大学金属材料研究所, ³ 惑星科学研究所, ⁴ NASA ジョンソン宇宙センター
¹Dept. of Earth & Planet. Sci., Univ. of Tokyo, ²Inst. for Materials Research, Tohoku Univ., ³Planet. Sci. Inst., ⁴NASA-JSC

Ureilites are ultramafic achondrites whose origin and petrogenesis are still controversial. The cooling rate of ureilites estimated from silicates is approximately a few degrees per hour, and it was considered to reflect catastrophic disruption of the ureilite parent body. Ureilites were broken into meter-sized fragments and then formed daughter body(ies) by re-accumulation.

Fe-Ni metal is one of the major components of all types of ureilites. Almahata Sitta, having fallen on the earth in October 2008, was classified as a polymict ureilite and ureilitic fragments from the Almahata Sitta contain abundant Fe-Ni metal. In previous studies, some grain boundary metals in Almahata Sitta ureilites show unique textures, not found in main group ureilites. These textures show characteristic assemblages with various combinations of α -iron (bcc), γ -iron (fcc), cohenite ($[\text{Fe}, \text{Ni}]_3\text{C}$) and schreibersite ($[\text{Fe}, \text{Ni}]_3\text{P}$).

Those metal textures resemble the product by steelmaking process in the earth, for example martensite (α -iron and γ -iron). Generally, these textures require rapid cooling equivalent to quenching by water (>100 °C/s). However, the cooling rate estimated from silicates (ca. several °C/h) is much slower than that in producing the martensite. Thus, these metal textures may record the event separated from the event that recorded in the silicates, that is, disruption of parent body. Therefore, studying these complicated metal textures will contribute to a better understanding of the formation and origin of metal in ureilites with the information about their thermal histories.

Those metal textures were only found in Almahata Sitta fragment #44, in previous studies, but we found similar assemblages composed of iron metal and its compounds in other fragments of Almahata Sitta and Antarctic ureilites. Forms and abundances are variable depending on samples, but it is suggested that those mineral assemblages in Fe-Ni metal are commonly found in ureilites.

To estimate the cooling rate which can form these iron and iron compounds textures, we performed cooling experiments by the electric furnace to heat and quench metal whose compositions correspond to metals showing complex metal phase assemblages in Almahata Sitta ureilite. The results suggest that those metal textures can be achieved in the cooling rate faster than the lowest limit between 10 °C/s and 0.83 °C/s, whose chemical composition is $\text{Fe}_{79.2}\text{Ni}_{3.4}\text{P}_{2.5}\text{Si}_{2.7}\text{C}_{12.2}$. At lower cooling rate (0.83 or 0.04 °C/s) and 10 °C/s of other starting material ($\text{Fe}_{86.4}\text{Ni}_{2.8}\text{P}_{0.7}\text{Si}_{4.1}\text{C}_{6.0}$), interstitial schreibersite among rounded iron was detected and neither cohenite nor γ -iron has been formed. In the carbon-free composition ($\text{Fe}_{91.2}\text{Ni}_{3.9}\text{P}_{0.5}\text{Si}_{4.4}$), similar textures were not generated at all cooling rates. This cooling rate, forming metal textures, is much faster than that estimated from silicates, and thus it is concluded that the event recorded by the silicates and the event formed the metal textures were truly separated.

Before disruption of ureilite parent body, primary metals probably melted and mixed with surrounding materials (graphite, phosphide and other iron compounds) to various extents at high temperature. The iron phase was considered to be uniformly γ -iron. Then, the ureilite parent body was destroyed and silicate minerals obtained cooling rate by quenching. Later, daughter body(ies) formed by accumulation of meter-size fragments. If daughter body(ies) was either shocked while still hot or heated by shock and then disrupted into smaller fragments (cm-size), the formation of iron textures may be achieved by super rapid cooling exceeding 1 °C/s. The metal grains without γ -iron would experience relatively slow cooling due to larger fragment size. Consequently, it is considered that the complex coexistences of iron and iron compounds found in ureilites have recorded temperature change and fragmentation process due to the impacts on the parent body and daughter body(ies).

原始惑星における初期衝突現象：玄武岩質隕石からの事実 Early impact events on differentiated protoplanets: Evidence from basaltic achondrites

山口 亮^{1*}
YAMAGUCHI, Akira^{1*}

¹ 国立極地研究所
¹ National Institute of Polar Research

Impact events are a ubiquitous geological process on planetesimals and protoplanets, evidenced by the presence of shock and brecciated textures in asteroidal meteorites. However, evidence for early impact events were obliterated by overprints of later thermal events such as volcanism and thermal metamorphism. We investigated early impact events in these meteorites on the basis of mineralogical and geochemical data.

At present, there are ~5 eucrites which were derived from distinct protoplanets. An anomalous eucrite, Ibitira, is a strongly recrystallized rock. Low-Ca pyroxene shows homogeneous compositions, indicating that these rocks experienced prolonged thermal metamorphism (~900-1000 C), as did most basaltic eucrites. The presence of unequilibrated pyroxenes related to oxide grains can be explained by short reheating event (and partial melting) and rapid cooling. Normal eucrites, EET 92023 and Y 86763, and a cumulate eucrite Moore County seem to have experienced a similar history. Most likely explanation for this thermal history is that they were excavated by impact from hot interior.

Anomalous cumulate eucrites Dho 700 and EET 92023 are medium-grained granular rocks similar to cumulate eucrites. Anomalous basaltic eucrite, NWA 011 shows a recrystallized texture. These rocks are crystalline (unbrecciated) but contain significant amounts of impactor materials. Dho 700 and EET 90020 contain taenite which is not common in pristine eucrites. The high abundances of siderophile elements are explained by addition of ~1% iron meteorites. Thus, these rocks experienced impact event before or during crystallization and thermal metamorphism.

All anomalous eucrites studied here show crystalline textures, but have evidence for impact melting or brecciation before thermal events. These meteorites record early collisional history possibly during the stage of runaway growth.

火星起源隕石 Tissint の衝撃組織の特徴 Shock features in a Martian meteorite, Tissint

宮原 正明^{1*}; 大谷 栄治²; El Goresy Ahmed³; Gillet Philippe⁴
MIYAHARA, Masaaki^{1*}; OHTANI, Eiji²; EL GORESY, Ahmed³; GILLET, Philippe⁴

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 東北大学理学研究科地学専攻, ³ バイロイト大学, ⁴ スイス連保工科大学 ローザンヌ校

¹DEPSS, Graduate School of Science, Hiroshima Univ., ²Institute of Mineralogy, Petrology and Economic Geology, Graduate School of Science, Tohoku Uni., ³BGI, ⁴EPFL

Tissint is the fifth fall Martian meteorite collected in Morocco on 2011 [1]. The nomination of a fall Martian meteorite is since 1962. Tissint will bring new clues for Martian evolution because it is less contaminated with terrestrial materials. Tissint is a member of shergottite. Many shergottites experienced a heavy shock event on Mars [e.g., Ref. 2]. We expected that Tissint should be also heavily shocked. A high-pressure polymorph is one of clear evidences for such a dynamic event. Accordingly, we described shock features, especially a high-pressure polymorph by FEG-SEM, EMPA, Raman spectroscopy and FIB-TEM techniques to clarify shock history recorded in Tissint.

We prepared several petrographic thin sections of Tissint for this study. EMPA analysis show that Tissint studied here consists mainly of olivine (Fa₁₈₋₆₆), pigeonite or augite (En₄₃₋₆₂Fs₂₃₋₃₇Wo₁₀₋₃₄) and labradoritic feldspar (An₆₂₋₆₆Ab₃₄₋₃₇Or₀₋₁). There are many melt-pockets, which is suggestive of a heavy shock event. FEG-SEM and FIB-TEM observations show that olivine grains entrained in the melt-pockets dissociated into silicate-perovskite (now almost amorphous or poorly-crystallized) and magnesiowustite, which is found in a Martian meteorite DaG 735 for the first time [3]. Silicate-perovskite and magnesiowustite show equigranular texture and less than ~100 nm in dimension. We also identified ringwoodite lamella in some olivine grains adjacent to the melt-pockets. TEM images show that ringwoodite has a dimension of less than ~500 nm. Raman spectroscopy analysis indicates that most feldspar now transforms into maskelynite. Jadeite-like crystals appear in some feldspar grain adjacent to the melt-pockets.

Considering the dissociation reaction of olivine into silicate-perovskite and magnesiowustite, shock pressure condition recorded in Tissint is beyond ~23 GPa based on phase diagram deduced from static synthetic experiments [4]. Phase transformation from olivine to ringwoodite also occurs besides the olivine dissociation reaction. Phase transformation from olivine to ringwoodite occurs instead of olivine dissociation reaction with decreasing temperature but under same pressure condition [5], which is due to thermal gradient in the olivine grains adjacent to the melt-pockets although pressure condition should be almost homogeneous. The nucleation and grain growth of a high-pressure polymorph is kinetically controlled. Baziotis et al. (2013)[6] propose that Tissint experienced the largest impact event among known Martian meteorites because ringwoodite appear to be a huge single crystal based on their SEM observations. However, our TEM images clearly depict that ringwoodite is a fine-grained grain assemblage, suggesting that it is unlikely that Tissint experienced the largest impact event.

References

- [1] Chennaoui Aoudjehane H. et al. Tissint Martian Meteorite: A fresh look at the interior, surface, and atmosphere of Mars. *Science* 338, 785-788 (2012).
- [2] El Goresy A. et al. Shock-induced deformation of Shergottites: Shock-pressures and perturbations of magmatic ages on Mars. *Geochim.Cosmochim.Acta* 101, 233-262 (2013).
- [3] Miyahara M. et al. Natural dissociation of olivine to (Mg,Fe)SiO₃ perovskite and magnesiowustite in a shocked Martian meteorite. *Proc.Nat.Acad.Sci.U.S.A.* 108, 5999-6003 (2011).
- [4] Presnall D.C. Phase diagrams of Earth-Forming Minerals. 248-268, in *Mineral Physics & Crystallography, A Handbook of Physical Constants*, T. J. Ahrens ed., AGU, Washington D. C (1995).
- [5] Akaogi M. et al. Low-temperature heat capacities, entropies and enthalpies of Mg₂SiO₄ polymorphs, and a?b?c and post-spinel phase relations at high pressure. *Phys.Chem.Minerals* 34, 169-183 (2007).
- [6] Baziotis I.P. et al. The Tissint Martian meteorite as evidence for the largest impact excavation. *Nat.Commun.*, doi: 10.1038/ncomms2414 (2013).

Keywords: Tissint, Martian meteorite, Shock, High-pressure polymorph

EPMAを用いたアポロ衝撃溶融岩片の全岩組成の推定 Estimation of bulk major element composition for Centimeter-Sized Impact Melt Clasts in Lunar Rocks using EPMA

新原 隆史^{1*}; クリング デービット²
NIIHARA, Takafumi^{1*}; KRING, David A.²

¹ 極地研 / LPI / SSERVI, ²LPI / SSERVI
¹NIPR / LPI / SSERVI, ²LPI / SSERVI

Most of lunar surface rocks are brecciated and mixed with various types of rock fragments and impact melt clasts during multiple impact events. We are testing the Late Stage Heavy Bombardment on the Moon surface [1-3] using Apollo 16 centimeter-sized impact melt clasts in ancient regolith breccias. Bulk composition is a key to understand original (pre-impact) lithologies where the clasts come from [4, 5]. Large-sized impact melt rocks (>5 cm) have been classified into 4 major group (Group 1 to 4) according to Sm and Sc compositions [6]. We compiled major element compositions of the previously classified impact melt rocks [6] and found that we can classify major impact melt groups even when we use major element compositions. However, our samples, centimeter-sized impact melt clasts, are highly restricted on their masses and makes us difficult to obtain bulk composition using conventional techniques (e.g. INAA and XRF). Defocused beam analyses (DBA) with EPMA is used to estimate the bulk compositions for limited mass samples using petrological sections, however, nobody tested accuracy of DBA techniques using certified geochemical standard.

We use a thin section of BCR-2 (fine-grained basalt supplied from USGS) and tested accuracy of DBA method using an EPMA (CAMECA SX-100) at NASA Johnson Space Center. We measured 12 elements (Na, Mg, Si, Al, P, K, Ca, Ti, Fe, Mn, Cr, and Ni) at >250 points with 20 micrometer beam diameter. We corrected density effect following the Warren (1997) method [7]. Averaged SiO₂ and FeO have larger difference from USGS values (+4.4 wt.% for SiO₂, -4.68 Wt.% for FeO) relative to other elements (up to +/- 2.4 wt.%). Although there are major changes in SiO₂ and FeO values after correct the density effect (difference from USGS values are up to -4.1 Wt.% for SiO₂ and up to +4.6 Wt.% for FeO), we suggest the DBA compositions can useable for the fine-grained materials to estimate the bulk major element composition for Apollo 16 impact melt clasts.

We estimated the bulk composition by averaged DBA method for two impact melt clasts in an Apollo 16 ancient regolith breccia 61135 which have optically different 5 regions (Clast1 R1, R2, and R3; and Clast 2 R1 and R2) to reveal the original lithology of the impact melt clasts. Five regions from the two impact melt clasts can be divided into three chemical groups of high-K, low-K and intermediate compositions. Clast 1 R3 has high K (K₂O=0.72 wt.%) and P (P₂O₅=0.35 wt.%), and low Al (Al₂O₃=20.7 wt.%) and Ca (CaO=12.0 wt.%). On the other hand, Clast 1 R1 and R2 have low K (K₂O=0.31-0.27 wt.%) and P (P₂O₅=0.08-0.07 wt.%) with high Al (Al₂O₃=26.1-25.2 wt.%) and Ca (CaO=14.5-14.0 wt.%). Clast 2, in both dark and bright regions, has an intermediate composition between high-K and low-K melts (e.g. K₂O=0.46, P₂O₅=0.16 wt.%, Al₂O₃=22.9 wt.%, CaO=12.8 wt.%). The bulk Mg# of the 5 regions are similar (Mg#=80-78).

If the melts in the two clasts are related, there are two possible origins: (1) A single impact event hit a complex lithological target and incompletely mixed the melts, to produce high-K, intermediate-K, and low-K melt fractions. (2) An impact produced either a high- or low-K melt. A second impact produced a melt at the other end of the K spectrum. The melts in Clast 1 represent those two end member melts. If the second impact melt digested older fragments of the first impact melt, then that may have produced the intermediate compositions of Clast 2. Alternatively, the melts are not related and require three or more impact events.

Reference: [1] Papanastassiou D.A. and Wasserburg G.J. 1971. EPSL 11. 37-62. [2] Turner G. et al., 1973. Proc. LPSC 4, 1889-1914. [3] Tera F. et al., 1974. EPSL 22, 1-21. [4] Niihara, T. and Kring, D. A., 2012. LPSC. #1229. [5] Niihara, T. et al., 2013. LPSC. #2083. [6] Korotev, R.L. 1994. GCA 58, 3931-3969. [7] Warren, P.H., 1997. LPSC28, #1406.

キーワード: EPMA, 全岩組成, アポロ 16 号, 衝撃溶融岩片
Keywords: EPMA, Bulk composition, Apollo 16, Impact melt clast

月隕石におけるシリカ多形の形成過程の解明 Formation processes of silica polymorphs in lunar meteorites

鹿山 雅裕^{1*}; 富岡 尚敬²; 関根 利守¹; Götze Jens³; 西戸 裕嗣⁵; 大谷 栄治⁴; 宮原 正明¹; 小澤 信⁴
KAYAMA, Masahiro^{1*}; TOMIOKA, Naotaka²; SEKINE, Toshimori¹; Götze, Jens³; NISHIDO, Hirotugu⁵; OHTANI,
Eiji⁴; MIYAHARA, Masaaki¹; OZAWA, Shin⁴

¹ 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 岡山大学地球物質科学研究センター, ³ Department of Mineralogy, TU Bergakademie Freiberg, ⁴ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ⁵ 岡山理科大学生物地球学部生物地球学科

¹ Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, ² Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University, ³ Department of Mineralogy, TU Bergakademie Freiberg, ⁴ Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, ⁵ Department of Biosphere-Geosphere Science, Okayama University of Science

月面に広く分布する大小様々なクレーターやレゴリスは、隕石や微惑星が月や地球にこれまでに幾度と無く衝突した痕跡であり、このような天体衝突が月や地球の進化、例えばジャイアント・インパクトによる初期地球や月の形成、さらには後期重爆撃期における大量の隕石群の衝突と生命の誕生に寄与したことが知られている。通常、天体衝突の際に発生した高温高压条件により、惑星から放出された隕石には種々の高压鉱物が存在する。しかし、月のような大気のない天体の場合、高压鉱物が隕石中に残存することは難しいと考えられてきた (Papike 1998; Lucey et al., 2006)。しかし、最近では月隕石である Asuka-881757 や NWA4734 からコーサイトやスティショバイト、ザイフェルタイトなどのシリカ鉱物の高压相が発見されており、高压相の生成条件から月面における天体衝突過程の詳細が明らかとなってきた (Ohtani et al. 2011; Miyahara et al. 2013)。

天体衝突時の変成条件は、衝撃銃を用いた動的圧縮実験とマルチアンビルプレスやダイヤモンドアンビルセル (DAC) による静的圧縮実験をもとに決定されている。シリカ鉱物の場合、石英やシリカガラスを出発試料とした高压実験については数多くの研究がなされているものの、月面に存在すると考えられているクリストバライトやトリディマイトなどのシリカ多形については報告例が少ない。高压相への転移圧力や温度は出発試料の結晶構造に依存することから (Kubo et al. 2012; Bläß 2013)、月面における衝突過程の詳細を明らかにするためには種々のシリカ多形に対する高压実験が必須である。

本研究では、産状を異にする月隕石 (斜長岩質礫岩、玄武岩および、斑れい岩質礫岩) を対象としたラマン分光分析、透過型および走査型電子顕微鏡観察ならびに X 線回折分析からシリカ鉱物の同定ならびに記載を行い、高压実験の結果と比較することで、月面におけるシリカ鉱物の形成過程の解明ならびに各隕石が被った衝撃変成作用の圧力および温度条件の推定を行う。

キーワード: 月隕石, シリカ多形, 高压鉱物, 天体衝突, 衝突実験, 静的圧縮実験

Keywords: Lunar meteorite, Silica polymorph, High-pressure mineral, Collision, Shock experiment, Static compression experiment

Discovery of stishovite in an Apollo 15 sample and impact record on the Moon Discovery of stishovite in an Apollo 15 sample and impact record on the Moon

金子 詳平¹; 大谷 栄治^{1*}; 宮原 正明²; 小沢 信¹; 荒井 朋子³
KANEKO, Shohei¹; OHTANI, Eiji^{1*}; MIYAHARA, Masaaki²; OZAWA, Shin¹; ARAI, Tomoko³

¹ 東北大学, ² 広島大学, ³ 千葉工業大学

¹Tohoku University, ²Hiroshima University, ³Chiba Institute of Technology

Thick regolith layers and many craters on the Moon indicate that the Moon has been heavily bombarded after the lunar formation. Short time intervals of high-pressure and high-temperature occurred on the lunar surface during the collision of asteroids on the Moon, and the constituent minerals of the Moon and asteroids transformed into high-pressure polymorphs during the high-pressure and high-temperature conditions. Although many brecciated lunar rocks have been recovered by the Apollo missions, any high-pressure polymorph has not been observed in Apollo samples so far. Silica is one of constituent minerals of terrestrial planets and asteroid. We investigated a lunar regolith collected by the Apollo 15 mission with a special interest on silica, because high-pressure polymorphs of silica are recently reported from shocked lunar meteorites (Ohtani et al., 2011; Miyahara et al., 2013). Here, we show stark evidence for stishovite from a sample collected by the Apollo 15 mission. X-ray diffraction analysis and transmission electron microscopic observations clearly confirmed the existence of a high-pressure polymorph of silica, stishovite, in the Apollo sample, which suggests that the lunar regolith preserves records of early shock events. Considering radio-isotope ages, lithologies, and shock features, stishovite was formed by an impact event in the near side Moon ca. 3.8-4.1 Ga ago.

キーワード: スイテイショバイト, アポロミッション, 衝突, 高温高圧, 月試料

Keywords: Stishovite, Apollo mission, Impact, High pressure and temperature, Lunar sample

高圧下でのシリカおよび斜長石の非平衡相転移に基づく隕石の衝撃条件の制約 Experimental constraints on shock conditions of meteorites based on non-equilibrium behaviors of silica and plagioclase

久保 友明^{1*}; 河野 真利¹; 加藤 工¹
KUBO, Tomoaki^{1*}; KONO, Mari¹; KATO, Takumi¹

¹九州大理地球惑星

¹Dept. Earth Plant. Sci., Kyushu Univ.

Recent studies on shocked meteorites have revealed non-equilibrium behaviors of silica and plagioclase at high pressures. We focus on the following three points observed in meteorites to deduce the P-T-t shock conditions from high-pressure kinetic experiments. 1) The formation of seifertite as a high-pressure polymorph of silica, 2) The occurrence of jadeite from plagioclase that does not contain stishovite, 3) The formation of lingunite as a high-pressure polymorph of albite-rich plagioclase.

Seifertite is a polymorph of silica with alpha-PbO₂ type structure that was found in shocked Martian and lunar meteorites (e.g., Sharp et al., Science1999; Miyahara et al., PNAS2013). Although this phase is thermodynamically stable at more than 90 GPa corresponding to the base of the lower mantle (Murakami et al., GRL2003), it has also been known that it metastably appears from cristobalite at around more than 40 GPa and room temperature (Dubrovinsky et al., CPL2001). We have carried out high-pressure and high-temperature in-situ XRD experiments of cristobalite using a Kawai-type multi-anvil (KMA) apparatus, and determined the formation kinetics of metastable seifertite and the following stable phase of stishovite. Because the activation energy for the seifertite formation is very low (~10 kJ/mol), which is consistent with the recently proposed formation mechanism (Blab, PCM2013), it can metastably appear at low T conditions beyond the negative PT boundary from ~10 GPa and 400C to ~30 GPa and room T. We found the clear difference in the formation kinetics between seifertite and stishovite, which enables to estimate the P-T-t shock conditions from the coexistence of these phases in various ratios in meteorites.

The occurrence of jadeite from plagioclase that does not contain stishovite has been often reported in shocked meteorites (e.g., Kimura et al., MAPS2000). In-situ XRD study using KMA apparatus have revealed that jadeite forms first from (amorphous) plagioclase, whereas the nucleation of other minerals such as stishovite or garnet is significantly delayed (Kubo et al., NGE02010). The missing stishovite problem can be explained owing to the differences in crystallization kinetics of high-pressure phases from plagioclase. The hybrid shock indicator combining these non-equilibrium behaviors of silica and plagioclase mentioned above consistently and strongly constrains the P-T-t shock conditions of Martian meteorites.

The formation of lingunite (albite-rich hollandite) in shocked meteorites (e.g., Gillet et al., Science2000; Tomioka et al., GRL2000) has remained unsolved. This phase appears in laser-heated diamond anvil cell (LHDAC) experiments as a minor phase at around ~20-24 GPa and ~1000C (Liu, PEPI1978) and ~2000C (Tutti, PEPI07). However, KMA experiments indicate that the maximum solubility of NaAlSi₃O₈ component in hollandite structure is limited to ~50 mol% (Yagi et al., 1994, Liu, 2006). This clear contradiction may be due to the non-equilibrium origin. It has been suggested that the rapid T quenching in LHDAC experiments is important for the survival of lingunite metastably to the ambient condition. Our previous in-situ XRD study using KMA apparatus have indicated that lingunite is not formed at least ~1200C at these pressure conditions (Kubo et al., NGE02010). We are also preliminarily conducting some LHDAC experiments, however we have not observed lingunite at least ~1400C. Further studies on the formation process of lingunite are needed to solve this problem, which may lead to construct another P-T-t shock indicator.

小惑星レゴリス模擬標的に対する衝突実験：他天体由来インパクターの破壊と捕獲 Laboratory impact experiments of rock projectiles onto simulated asteroid regolith: Impactor fragmentation and capture

長岡 宏樹¹; 中村 昭子^{1*}; 鈴木 絢子²; 長谷川 直²
NAGAOKA, Hiroki¹; NAKAMURA, Akiko^{1*}; SUZUKI, Ayako²; HASEGAWA, Sunao²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Institute of Space and Astronautical Science

本研究では、角礫岩質隕石が形成される過程に着目し、小惑星レゴリスを模擬したシリカサンドに、他天体を模擬した岩石弾丸を衝突させ、衝突速度やシリカサンドの粒径と弾丸の破壊の程度との関係を調べた。

これまでの室内衝突実験では標的の破壊条件は詳しく調べられているのに対して、弾丸の破壊についてはほとんど研究がなされていない。そこで、神戸大学の火薬銃とガス銃を用いて、衝突速度 1 km/s 以下の低速度実験を行い、宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃を用いて、小惑星帯での平均衝突速度約 5 km/s を模擬する高速度実験を行った。弾丸物質として、標的破壊実験との比較のためにパイロフィライトと玄武岩を用いた。実験後に、シリカサンドの中に埋まったインパクターの破片を回収し、最大破片の質量を測定した。

弾丸の最大破片質量割合と、衝突時に発生する圧力を弾丸物質強度で規格化した値との関係を調べたところ、低速度衝突では、動的引張強度程度の圧力で壊れることがわかった。しかし、高速度衝突では、最大破片質量割合が低速度衝突から予想される値よりも大きくなり、特に、シリカサンドの粒径が小さいときにその傾向が顕著であった。その原因は、破片同士や破片とシリカサンドがユゴニオ弾性限界以上の加圧による塑性変形と衝突の温度上昇による焼結もしくは熔融により付着したことによると考えられる。特に、衝突速度 5 km/s で得られた弾丸破片の電子顕微鏡画像では、多数の気孔の存在が確認された。弾丸破片の熔融は、シリカサンドの圧密に伴って発生した熱によるものと考えられる。

キーワード: 隕石, 衝突過程, 小惑星

Keywords: meteorites, impact process, asteroids

SHRIMP による Chelyabinsk 隕石の年代分析 Secondary Ion Mass Spectrometry (SHRIMP) U-Pb dating of Chelyabinsk meteorite

上岡 萌^{1*}; 寺田 健太郎¹; 日高 洋²; 木村 光佑²; Skublov Sergey³
KAMIOKA, Moe^{1*}; TERADA, Kentaro¹; HIDAKA, Hiroshi²; KIMURA, Kosuke²; SKUBLOV, Sergey³

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ² 広島大学大学院理学研究科, ³Institute of Precambrian Geology and Geochronology,

¹Osaka University, Department of Earth and Space Science, ²Graduate school of Science, Hiroshima University, ³Institute of Precambrian Geology and Geochronology,

2013 年 2 月にロシア、チェリヤビンスク州に隕石が落下した。目撃された弾道の軌道計算、および回収された隕石の鉱物学的記載から、遠日点距離 2.6 AU, 離心率 0.51 の Near Earth Asteroid を起源とする LL5 の普通コンドライトと報告されている。(Zuluaga et al. 2013, Galimov et al. 2013)。その後、Sm-Nd 年代では 37 億年 (Bogomolov et al. 2013)、Rb-Sr 年代では 2.9 億年 (Galimov et al. 2013) など比較的若い年代が報告されており、インパクトなどのショックイベントにより放射壊変系の 2 次的変性の可能性がある。そこで閉鎖温度の高いリン酸塩鉱物に着目し U-Pb 年代分析を行った。

まず、走査型電子顕微鏡 SEM-EDS を用いてリン酸塩鉱物の構成元素でマッピングをとり、同定を行った。またリン酸塩鉱物に含まれる微量元素について定量分析を行い、メルリライトとアパタイトを判別した。そして空間分解能の高い広島大学の 2 次イオン質量分析計 SHRIMP を用いて U-Pb 系のシステムティックスを調べ、Chelyabinsk 隕石の形成年代、変性 (ショック) 年代の算出を試みた。当日は、ラマン分光観察によるリン酸塩鉱物の高圧変成相の有無などの結果と併せ報告する予定である。

キーワード: Chelyabinsk 隕石, SHRIMP, リン酸塩鉱物, U-Pb 年代分析

Keywords: Chelyabinsk meteorite, SHRIMP, phosphate, U-Pb dating

特異なエコンドライト隕石 NWA 6704 の結晶化およびサブソリダス過程について Crystallization and subsolidus processes of the NWA 6704 ungrouped achondrite

高木 康成¹; 野口 高明^{1*}; 木村 眞¹; 山口 亮²
TAKAGI, Yasunari¹; NOGUCHI, Takaaki^{1*}; KIMURA, Makoto¹; YAMAGUCHI, Akira²

¹茨城大学, ²国立極地研究所

¹Ibaraki University, ²National Institute of Polar Research

Introduction: NWA 6704 is a unique ungrouped achondrite. It consists of low-Ca pyroxene, less abundant olivine and plagioclase, minor chromite and merrillite, and trace awaruite, heazlewoodite, and pentlandite (1, 2). Although its bulk oxygen isotopic ratio is within the ranges of the acapulcoite-lodranite and CR chondrites, its petrography and mineralogy are evidently different from both of them (1). The U-Pb dating of this meteorite gives a ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb date of 4563.75 +/- 0.41 Ma (3). To deduce its formation processes is important to understand formation of its parent body that may have predated the formation of chondrite parent bodies.

Methods: Polished thin sections were investigated by optical microscopes, electron microprobe analyzer (EPMA), field-emission scanning electron microscope (FE-SEM), Raman spectroscopy, and electron backscattered diffraction (EBSD).

Results: The most abundant mineral in NWA 6704 is orthopyroxene containing blobs of augite. Both Raman spectroscopy and EBSD data indicate that this pyroxene is orthopyroxene. The texture of the blob-bearing orthopyroxene is very similar to Kintokisan-type orthopyroxene (inverted pigeonite) (4). We call it early formed (ef-) pigeonite. There are another less abundant low-Ca pyroxenes: augite blob-free orthopyroxene, and pigeonite containing sub-micrometer-size augite exsolution lamellae. Here we call them primary orthopyroxene and later formed (lf-) pigeonite. Lf-pigeonite occurs as coherent overgrowth of the primary orthopyroxene and discrete grains in the interstices of large ef-pigeonite. Lf-pigeonite also occurs as inclusions in olivine. Based on the EBSD data, modal abundances of ef-pigeonite, olivine, lf-pigeonite, primary orthopyroxene, feldspar, chromite, awaruite are 67.2, 16.8, 3.4, 0.6, 10.9, 0.4, and 0.4 vol.%, respectively. Crystallization sequence estimated based on the petrography is following: primary orthopyroxene => awaruite => ef-pigeonite => chromite => lf-pigeonite => olivine => augite (quite rare crystallized from melt) => heazlewoodite => pentlandite => merrillite => feldspar. Early formed pigeonite (blob-bearing orthopyroxene) shows a LPO of the [010] axis. Lf-pigeonite contains complex exsolution lamellae of augite. The thickest lamellae have ~0.2 micrometer in width and 1-2 micrometer wavelength. Finest lamellae have <0.1 micrometer thick and ~0.2 micrometer wavelength.

Discussion: Because [010] lattice preferred orientation of pyroxene in terrestrial rocks has been interpreted as settling of tabular pyroxene crystals in a stagnant magma chamber (5), ef-pigeonite could have settled in a stagnant magma chamber. Presence of Fe³⁺ in chromite and high NiO concentration in olivine (0.89 wt.% on average) suggest that this meteorite crystallized under an oxidized condition. About 1100 °C equilibrium temperature was estimated by using two pyroxene geothermometry and ~950 °C by using olivine-spinel geothermometry. These high temperatures suggest that the meteorite cooled rapidly in this range of temperature. Multiple exsolution lamellae with thickness and wavelength similar to this meteorite were observed in Zagami martian meteorite. Its cooling rate between 1100 °C to 950 °C was estimated to be ~0.02 °C/hr (6). This meteorite could be cooled as slow as Zagami did. Further studies are needed to clarify if a monotonous cooling can accomplish both high equilibrium temperatures estimated by geothermometers and sub-micrometer-size exsolution lamellae in lf-pigeonite. NWA 6704 has petrography similar to that of NWA 6693. However, there is a stark difference between these two meteorites. Blob-bearing orthopyroxene is the most abundant pyroxene in the former. On the other hand, low-Ca pigeonite is the most abundant in the latter. Therefore, it is possible that NWA 6704 is not mere a pair of NWA 6693.

References: (1) Irvine et al. (2011), (2) Warren et al. (2012), (3) Iizuka et al. (2013), (4) Ishii and Takeda (1974), (5) Jackson (1961), (6) Brearley (1991).

キーワード: NWA 6704, エコンドライト
Keywords: NWA 6704, achondrite

斜長石の粒径と普通コンドライトの岩石学的タイプ Petrologic type from plagioclase size distribution

川崎 雄大¹; 木村 眞^{1*}; 野口 高明¹
KAWASAKI, Takehiro¹; KIMURA, Makoto^{1*}; NOGUCHI, Takaaki¹

¹ 茨城大学理学部
¹ Faculty of Science, Ibaraki University

熱変成作用の程度によって普通コンドライトは岩石学的タイプ 3-6 に分類されている。このうちタイプ 5, 6 の分類基準として斜長石の粒径が一般的に用いられており、タイプ 5 は $10 \mu\text{m}$ 以下の粒子が多く、タイプ 6 は $50 \mu\text{m}$ 以上の粒子が多い、とされている [1]。しかしながら、この基準は定量的ではなく、サイズ分布の統計的検討の必要性が指摘されていた [2]。そこで、本研究では斜長石の主としてサイズ分布を測定し、岩石学的タイプ 5-6 の区分を明らかにすることを研究目的とした。

本研究では H と L、LL グループのタイプ 5, 6 コンドライト、計 26 試料を観察し、それらに含まれる斜長石のサイズ分布を画像処理ソフトウェア ImageJ を用いて測定した。また、斜長石以外の熱変成作用の程度を示す指標として、コンドロールや集片双晶を示す Low-Ca パイロキシンの存在度も観察した。

その結果、タイプ 5 と 6 の斜長石に関しては $50 \mu\text{m}$ 以上のものがどちらにも分布することが明らかになった。個数分布において、タイプ 5-6 間で違いがみられるのは数 μm サイズの小さな粒子の絶対数である。このため、累積個数割合のグラフにおいて、タイプ 5 の分布曲線とタイプ 6 の曲線には勾配に相違がみられる。タイプ 5 の試料は小さな粒子を豊富に含むためその勾配は急になるが、タイプ 6 は比較的大きな粒子が多いため勾配は緩やかになる。以上より、現在一般的に採用されている $50 \mu\text{m}$ という数値は粒子の個数の観点からは指標にならないことが明らかになった。そこで別のパラメータとして面積に注目すると、タイプ 6 はタイプ 5 に比べて $80-100 \mu\text{m}$ 以上の粒子が面積的に多くなり、両タイプの相違が明確になった。

一方、化学的グループ間の斜長石の特徴の相違も本研究で明らかになった。H グループではタイプ 5 からタイプ 6 に変化するにつれて、コンドロールの組織は他のグループのものと同様に輪郭が不明瞭になりメソスタシスの再結晶度は高くなる。しかし斜長石のサイズ分布をみると、H グループの試料はタイプ 5-6 間でほとんど違いがみられない。H6 においても斜長石粒子は大きく成長してはいない。これに対して、L、LL グループではコンドロールの再結晶度や集片双晶の存在度と斜長石のサイズ分布の間には概ね相関がある。このため、H グループと L、LL グループとでは少なくとも斜長石のサイズ分布に関しては従来とは異なる分類基準を用いて岩石学的タイプを決定する必要がある。

文献: [1] Huss et al. (2005) in *Meteorites and the Early Solar System*, [2] Kovach and Jones (2010) *MAPS*, 45, 246-264.

キーワード: 普通コンドライト, 岩石学的タイプ, 斜長石, 熱変成作用
Keywords: ordinary chondrite, petrologic type, plagioclase, thermal metamorphism

ユークライトの希土類元素、SrおよびBa同位体研究 Systematic isotopic studies of REE, Sr and Ba in eucrites

世羅 浩平^{1*}; 日高 洋¹; 米田 成一²
SERA, Kohei^{1*}; HIDAKA, Hiroshi¹; YONEDA, Shigekazu²

¹ 広島大学大学院地球惑星システム学専攻, ² 国立科学博物館理工学研究部

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, ²National Museum of Nature and Sci.

分化した隕石であるユークライトは小惑星4ヴェスタの地殻部分に起源をもつと考えられ、その同位体研究からは原始惑星内の地殻—マントル分化を伴う初期進化過程に関する物質科学的な知見を得ることが期待できる。本研究では、原始惑星地殻の初期進化過程および太陽系年代学に用いられる手法に関する情報を体系的に得ることを目的として、ユークライトの希土類元素およびSr, Baに着目し、その同位体の分析を試みた。希土類元素同位体からは、放射壊変起源¹³⁸Ce, ¹⁴²Nd, ¹⁴³Ndの同位体を組み合わせることで初期分化過程に関する年代学的情報を、中性子捕獲反応がもたらす¹⁴⁹Sm-¹⁵⁰Smおよび¹⁵⁷Gd-¹⁵⁸Gdの同位体シフトをとらえることによって宇宙線照射環境を知ることができる。また、SrおよびBa同位体データからは、ともに反応性に富むアルカリ金属元素を親核種にもつ⁸⁷Rb-⁸⁷Sr, ¹³⁵Cs-¹³⁵Ba壊変系に基づいた年代学的情報をもたらすと考えられる。

本研究では、Juvinas, Stannern, Millbillillie, Dar al Gani 380 (DaG 380), DaG 391, DaG 411, DaG 443, DaG 480の8つのユークライトを用いた。各隕石試料約1gを粉碎後、酸分解し、試料溶液とした。各試料溶液を二分し、その大部分は所定のイオン交換法を用いて、Sr, Ba, Ce, Nd, Sm, Gdを化学分離し、表面電離型質量分析計(Triton-Plus)による高精度同位体比測定を行い、残りはICP質量分析計(Agilent 7500cx)を用いてRb, Sr, Cs, Ba, REEの元素濃度測定を行った。

DaG 480を除く7つの試料がその全岩化学組成において、CIコンドライト隕石の数~十数倍の希土類元素存在度を示し、そのパターンはEuを除いてほぼ平坦であり、これまで報告されている典型的な非集積岩タイプのユークライトが持つ特徴を示した。Millbillillieは母天体での部分溶融あるいは地球上での汚染を経験した可能性が示唆される。¹³⁸Ce同位体比では4つ、¹⁴²Nd, ¹⁴³Nd同位体比では7つの試料についてデータが得られ、先行研究で示されている各同位体進化線(Makishima and Masuda, 1991; Boyet and Carlson, 2005; Andreasen and Sharma, 2007)と整合性のある結果が得られた。また、 $\epsilon^{142}\text{Nd}$ - $\epsilon^{143}\text{Nd}$ プロットにおいて本研究試料は先行研究で報告されている集積岩ユークライトの同位体データと同一の傾向を示したが、先行研究のコンドライトの同位体データとは違う傾向を示した。⁸⁷Rb-⁸⁷Sr壊変系における同位体比データは同一の外的等時線を形成するには至らず、Papanastassiou and Wasserburg, (1969)にて示されたSr初期同位体比(BABI)を改定することはできなかった。SmおよびGd同位体シフトから見積もられる中性子フルエンスは $(0.28 \sim 4.05) \times 10^{15} \text{ n cm}^{-2}$ であり、これらはほぼ母天体から放出された後の宇宙線照射によるものと考えられる。Ba同位体比では太陽系外での原子核合成に起因する同位体比異常は確認されず、ユークライト母天体における火成活動による同位体比の均質化が起こった可能性が示唆される。しかし、右図に示すように¹³⁵Ba同位体比には顕著な同位体変動が確認でき、ユークライト形成時における消滅核種¹³⁵Csの存在を示唆する結果が得られた。現在、各試料中のRbおよびSrの元素存在度について同位体希釈法を用いて高精度に定量することを検討しており、今後⁸⁷Rb-⁸⁷Sr壊変系に基づく年代学的データと¹³⁸La-¹³⁸Ce, ¹⁴⁶Sm-¹⁴²Nd, ¹⁴⁷Sm-¹⁴³Nd壊変系から得られる情報との詳細な比較を行うと共に集積岩ユークライトおよびユークライトと同一の隕石グループに属するダイオジェナイトについても同様の分析を行う予定である。

キーワード: ユークライト, 希土類元素, 年代学, 同位体
Keywords: eucrite, REE, chronology, isotope

衝撃を受けた隕石中の Lingunite 形成に関する実験的研究 Preliminary experiments on the formation process of lingunite in shocked meteorites

河野 真利^{1*}; 久保 友明¹; 加藤 工¹; 近藤 忠²
KONO, Mari^{1*}; KUBO, Tomoaki¹; KATO, Takumi¹; KONDO, Tadashi²

¹九州大学・理, ²大阪大学・理
¹Kyushu Univ., ²Osaka Univ.

Albite-rich hollandite (lingunite) has been frequently found in shocked meteorites with other high-pressure minerals (Gillet et al., 2000; Tomioka et al., 2000). According to the laser-heated diamond anvil cell (LHDAC) experiments by Liu (1978), following the decomposition of albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) into jadeite ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$) plus quartz (SiO_2) at 2-3 GPa, these phases recombine to form lingunite in the range of pressure between 21 and 24 GPa at about 1000 °C, and then it decomposes again into calcium ferrite-type NaAlSiO_4 plus stishovite at pressures above 24 GPa. Similarly, Tutti (2007) observed $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ lingunite at 21-23 GPa and 2000 °C using LHDAC. In contrast to these LHDAC studies, high-pressure experiments using multi-anvil type (MA) apparatus revealed that the maximum solubility of $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ component in hollandite structure is limited to ~50 mol% at 14-25 GPa and 800-2400 °C (Yagi et al., 1994, Liu, 2006). This contradiction has not been solved yet, which makes it difficult to understand the shock conditions for the presence of lingunite in shocked meteorites. Tutti (2007) suggested that the stability of lingunite might be sensitive to temperature and could transform back when quenching rate is slow like MA experiments. However, the formation conditions of lingunite has not been well constrained even by LHDAC experiments.

To investigate the formation process of lingunite, we preliminarily carried out LHDAC experiments using a powder of natural albite as a starting material. The samples were compressed at room temperature, and then heated by the double-sided laser heating method using a Nd:YAG laser. The emission spectra were measured on both side of the heated sample, and used to estimate temperature. Heating duration at the maximum temperature was several minutes. Recovered samples were analyzed by X-ray diffraction method at BL-ARNE7 and BL-ARNE1 of photon factory, KEK. The results obtained suggest that jadeite and stishovite are present at 22 GPa and 1230 °C. The assemblage changed into calcium ferrite-type structure and stishovite at 25 GPa and 1400 °C. Hydrous aluminum silicate (phase egg) was also present in both samples probably due to the effect of absorbed water in the powdered starting material. We measured X-ray diffraction patterns at several points in the sample, which showed changes of the ratio of the constituent minerals due to the presence of pressure and temperature gradients, however we did not observe lingunite in any measured points. Although experimental conditions are still rather limited, our preliminary results suggest that the formation condition of lingunite is more than 1400 °C at these pressure ranges.

Keywords: lingunite, high pressure, LHDAC, shocked meteorite

「かぐや」LRS: 月表面反射観測における表面粗さの影響 Surface roughness effect on KAGUYA LRS surface echo observation and its calibration

小林 敬生^{1*}; 李 承烈¹
KOBAYASHI, Takao^{1*}; LEE, Seung ryeol¹

¹ 韓国地質資源研究院

¹ Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

KAGUYA Lunar Radar Sounder (LRS) was an HF (5MHz) radar whose primary mission was to explore subsurface of the Moon. Its footprint covered whole surface of the Moon in its operation period. All the data was processed by applying Synthetic Aperture Radar (SAR) algorithm so that the signal-to-noise ratio of target echoes as well as the spatial resolution was improved.

The data was further processed to extract nadir surface echoes so that the surface property of the Moon was studied in a spectral range of the HF band. The physical property that can be known directly from the data was the apparent reflectivity of the lunar surface in the frequency range of the HF band: The data contains scattering effect of surface roughness due to the surface terrain. We need to separate this scattering effect from the data so that we can make quantitative evaluation of the surface reflectivity. In order to meet this requirement, we carried out simulation of KAGUYA LRS observation to evaluate the surface scattering effect due to the lunar surface terrain.

The simulation was based on Kirchhoff approximation method. The Lunar Imager/SpectroMeter (LISM) Digital Elevation Model (DEM) data was utilized to simulate actual lunar surface terrain. Flat surface observation was simulated as the reference case before the simulation of actual LRS observation was carried out. We assumed that the dielectric constant of the lunar surface material was 4.0.

Our simulation revealed that even a mare surface where the surface is often regarded to be flat certainly behaved as a rough surface which gave a rise to decrease of the nadir echo intensities for a few decibels in comparison to the flat surface reflection. This effect gives a significant influence on estimation of regolith thickness in maria. Newly estimated regolith thickness was approximately a meter smaller than previously estimated value: it turned out to be 6 - 7 m in Mare Imbrium.

キーワード: かぐや, LRS, HF レーダ, 表面反射, 散乱

Keywords: KAGUYA, LRS, HF radar, surface echo, scattering

かぐやで観測されたレーダエコー強度に基づく月表層誘電率の決定 Determination of the dielectric constant of the lunar surface based on the radar echo intensity observed by the Kaguya

熊本 篤志^{1*}; 石山 謙¹; 小林 敬生²; 押上 祥子³; 春山 純一⁴

KUMAMOTO, Atsushi^{1*}; ISHIYAMA, Ken¹; KOBAYASHI, Takao²; OSHIGAMI, Shoko³; HARUYAMA, Junichi⁴

¹ 東北大学, ² 韓国地質資源研究院, ³ 国立天文台, ⁴ 宇宙航空研究開発機構

¹Tohoku Univ., ²KIGAM, ³NAOJ, ⁴JAXA

In the planetary radar observation, echo power and delay time depend on the effective dielectric constant, or equivalent dielectric constant including the voids in the planetary uppermost media. As for the Moon, because there is almost no material whose dielectric constant is far from the basalt rocks, the effective dielectric constant of the lunar uppermost media is considered to depend mainly on their porosity. So if we can determine the effective dielectric constant of the lunar uppermost media, we can derive their bulk density, or density including the voids based on the empirical relation between the dielectric constant and bulk density of the Apollo samples [Carrier et al., 1991].

If we are going to use echo power for determination of the permittivity, we should note that the radar echo intensity depends not only on the dielectric constant but also on the roughness of the surface. Therefore, we have determined the permittivity of the lunar surface with considering the surface roughness. In the analysis, the dielectric constant is determined by using the radar echo intensity obtained by Kaguya Lunar Radar Sounder (LRS) [Ono et al, 2000; 2008; 2010], and the surface roughness parameters derived from Digital Terrain Model (DTM) based on Kaguya Terrain Camera (TC) observation [Haruyama et al., 2008]. The global distributions of the echo powers in a frequency range of 4-6 MHz were derived from the Kaguya/LRS dataset. We have used the intensity of off-nadir echoes in an incident angle from 5 to 15 degree. The reason why nadir echoes are not used in the analysis is because the echo intensity changes drastically in small incident angle range due to the poor range resolution from the spacecraft to the off-nadir reflection point. The echoes arrived after the arrival of the nadir surface echo were identified as off-nadir echoes in this study. In addition, we have also derived the global distribution of the surface roughness parameters. The RMS height of the surface can be obtained by $\langle(z(x+L)-z(x))^2\rangle$, where $z(x)$ is height of the surface derived from the Kaguya TC/DTM, L is baseline length, and $\langle\rangle$ denotes the average. If we assume the self-affine surface model, the roughness parameters H and s can be obtained by the least square fitting of the RMS heights to sL^H . The off-nadir surface echo power can be calculated based on the radar equation. Assuming Kirchhoff Approximation (KA), the backscattering coefficient in the radar equation can be obtained from the roughness parameters H and s , and assumed dielectric constant [cf. Bruzzone et al., 2011]. Using the backscattering coefficient, we can calculate the expected off-nadir surface echo powers. By performing the comparison between calculated and observed echo powers, we can determine most plausible dielectric constant. In the calculation of the echo powers, the transmitting loss of LRS have to be determined, which are however difficult to measure in the ground tests. So we estimated the transmitting loss to be 5.8 dB by assuming that the average dielectric constant is to be 5.3, which are derived from bulk density of 2.55 g/cm³ in the highlands reported based on GRAIL observations[Wieczorek et al., 2013].

The obtained Hurst exponent H is less than 0.5 in the maria, and about 0.9 in the highland. The parameter s is about 1 in the maria, and about 0.3 in the highland. By applying the analysis method mentioned above, we could obtain the observed and calculated surface echo powers in the regions where $H < 0.5$, and $H > 0.9$. Based on them, we could estimate the average dielectric constant in the maria ($H < 0.5$) to be 7, and that in the highland ($H > 0.9$) to be 4. The bulk densities are therefore estimated to be 3.0g/cm³ in the maria ($H < 0.5$), and 2.1g/cm³ in the highland. It suggests that there are more voids in the highland than in the maria due to longer exposure to the meteorite impacts.

Keywords: Kaguya (SELENE), Lunar Radar Sounder (LRS), Terrain Camera (TC), Surface roughness, Bulk density, Dielectric constant

虹の入り江および雨の海北西部における構造発達史 Tectonic evolution of Sinus Iridum and northwestern Imbrium regions

嵩由美子^{1*};山路敦¹;佐藤活志¹;春山純一²;諸田智克³;大竹真紀子²;松永恒雄⁴
DAKE, Yuko^{1*}; YAMAJI, Atsushi¹; SATO, Katsushi¹; HARUYAMA, Junichi²; MOROTA, Tomokatsu³; OHTAKE, Makiko²
; MATSUNAGA, Tsuneo⁴

¹ 京都大学理学研究科地球惑星科学専攻, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ³ 名古屋大学大学院環境学研究科, ⁴ 国立環境研究所

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Japan Aerospace Exploration Agency / Institute of Space and Astronautical Science, ³Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ⁴National Institute for Environmental Studies

リッジは、多くが海内部に集中して、弧を描くように分布することから溶岩堆積時の荷重で表層が水平短縮した構造だと考えられてきた。しかし近年、1.0 Ga以降に形成された lobate scarps (Watters et al., 2010) や、溶岩堆積後に形成されたリッジの発見が報告されている (Ono et al., 2008)。溶岩堆積時の変形以外の要因として、月の冷却に伴う変形や軌道進化に伴う変形が考えられる。溶岩堆積時の変形であれば、構造形成は溶岩大量噴出時期と一致するはずである。そこで本研究では、リッジが変形させている溶岩と堰き止めている溶岩のクレーター年代を求め、構造形成年代制約を行った。主に使った画像は、SELENE が取得した可視画像、近赤外域画像、地形データである。

その結果、本研究地域の主要なリッジ形成は、雨の海の溶岩大量噴出時期である 3.

0 Ga よりも若いことが分かった。ラプラス岬の南に位置する NNE-SSW 走向のリッジ群は、44° 以北では 2.1 Ga の溶岩を堰き止め、以南では変形させている。従って、このリッジ群は、北部は 3.3 から 2.1 Ga の間に、南部は 2.1 Ga 以降に形成されたと考えられる。同様に、ラプラス岬の南の E-W 走向のリッジ群は、主に 3.0 から 2.1 Ga の間に形成されたが、2.1 Ga 以降に一部地域が成長していることがわかった。

また、LROC NAC 画像を使って見つかった 1.0 Ga 以降の小構造も報告する。

キーワード: リッジ, 構造形成年代, クレーター年代, マスコンテクトニクス

Keywords: Mare ridges, Deformation ages, Crater ages, Mascon tectonics

月地殻表層の水平短縮量 Evaluation of the horizontal shortening in the shallow part of the lunar crust

山路 敦^{1*}; 嵩 由美子¹; 佐藤 活志¹; 春山 純一³; 諸田 智克²; 大竹 真紀子³; 松永 恒雄⁴
YAMAJI, Atsushi^{1*}; DAKE, Yuko¹; SATO, Katsushi¹; HARUYAMA, Junichi³; MOROTA, Tomokatsu²; OHTAKE, Makiko³
; MATSUNAGA, Tsuneo⁴

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 名古屋大学大学院環境学研究科, ³ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, ⁴ 国立環境研究所環境計測研究センター

¹Divisin of Earth and Planetary Scieces, Kyoto University, ²Graduate School of Environmental Studies, ³Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, ⁴Center for Environmental Measurement and Analysis, National Institute for Environmental Studies

月の起源や熱史を制約するために, mare ridge (以下, リッジ) や lobate scarp などの地質構造が利用されている。その際, 弾性係数などから強度を推定し, それを超える応力が発生したという議論がなされるのが普通である。しかし, 既存断裂やメガレゴリス層の存在のため, マクロスケールの表層物質の強度の推定は難しい。地質構造から歪み量を評価する方が直接的だが, SELENE など近年のデータでそれが可能になってきた。

これまでも歪み量の見積もりはあるが, まったく不確かである。インブリア紀以降の全球冷却で月の半径が約 1km 減少したとされるが, それは根拠の薄弱な MacDonald (1960) の議論に依拠する。Apollo 時代の地形データにもとづいて, リッジが褶曲構造であるとの仮定のもとに, Bryan (1973) は 1つのリッジ形成による水平短縮を 0.5% とした。これがリッジによる短縮量を代表しているとするなら, 月の半径の減少量はやはり 1km 程度である。

本研では, 雨の海北西部および虹の入り江の地質構造を, SELENE の LISM データおよび LROC 画像で精査した。地下におけるリッジの実態は断層関連褶曲 (fault related fold) であろうが, その逆断層が月面を破る場合と破らない場合がある。前者なら, 逆断層の変位量と傾斜角から水平短縮量が見積もられる。後者なら, 海の玄武岩は水平に堆積したと仮定し, リッジ群を横切る測線での地形断面の長さとして現在の水平距離を比較することで, 短縮量を見積もることができる。前者の例は, 雨の海北部のリッジで見つかった。そこでは, 500m 規模の水平短縮がある。ところが, その他のリッジでは, 月面を断層が破っているにせよ, 断層による短縮量は観測にかからないくらい小さかった。また, 断層ではなく褶曲による短縮量を TC からつくられた DTM で検討した結果, リッジ群の形成によるこの地域の地殻短縮量は, Rryan の見積もりよりずっと小さく, 0.001% の桁に過ぎないことが分かった。この小ささは, 見積もり自体の正しさよりむしろ, DTM の精度では捉えられないほど短縮量が小さいことを意味する。

LROC 画像でこの地域のリッジ群を精査したが, クレータがリッジを形成したと思いき逆断層で切られる例は散見されるものの, 逆断層による目立った短縮を示すクレータは見られなかった。上述の 500m 短縮を起こしたリッジでも同様である。このことは, 約 30 億年前の玄武岩堆積直後, 溶岩平原にまだクレータがあまりできないうちに 500m 短縮が完了したことを意味する。嵩ほか(当セッションの発表)により, この地域の主要なリッジの少なくとも一部は 10 億年以上の長期にわたって成長してきたことが分かったが, その間の短縮量としては非常に小さかったといえる。この地域で今回 LROC 画像により, エラトステネス紀末~コペルニクス紀のグラーベンを発見した。これらのことは, そのように最近になるまで, この地域が水平伸長と水平短縮の境界的な状況にあったことを示唆する。これは, 30 数億年まえから月の表層はずっと水平短縮で, 月の半径は 1km 程度短縮したという, 普及している描像に反する結果である。

キーワード: テクトニクス, リンクル・リッジ, グラーベン, バランス断面
Keywords: tectonics, wrinkle ridge, graben, restoration

月の海の火成活動：20億年前のスーパーホットプルームイベントの検証 Volcanic activity of lunar maria: Verification of super hot plume event at 2.0 Ga ago

加藤 伸祐^{1*}; 諸田 智克¹; 渡邊 誠一郎¹; 山口 靖¹; 大嶽 久志²; 大竹 真紀子²

KATO, Shinsuke^{1*}; MOROTA, Tomokatsu¹; WATANABE, Sei-ichiro¹; YAMAGUCHI, Yasushi¹; OTAKE, Hisashi²; OHTAKE, Makiko²

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻, ² 宇宙航空研究開発機構

¹Nagoya University Graduate School of Environmental Studies, ²Japan Aerospace Exploration Agency

固体惑星の形成と進化の体系的な理解に向けて、地球型惑星の小型端成分である月の初期進化を理解することは重要である。しかし、月のマグマオーシャンからの固化過程やその後の大規模な構造変化の有無については未だに良く分かっていない。

それを解決するための手段として、月の海の玄武岩を調べることは有効である。海の玄武岩の組成と年代の関係から、マンツルの組成や熱進化に関する情報が得られる可能性があり、マグマオーシャンの固化モデルや月マンツルの進化モデルを制約できると期待される。月の海の年代は、衛星によって得られた画像データを用いて、クレーターの浸食やサイズ頻度、層序関係などのクレーター年代学的手法に基づいて多くの研究によって調べられてきた。その結果、海の玄武岩の年代は、月の火山活動史の終盤(およそ20億年前)において、2度目のピークを持ち、最後の噴出はほぼ嵐の大洋と雨の海の地域に限られることを示した。

本研究では、月周回衛星「かぐや」に搭載されたマルチバンドイメージャによる分光データを用いて高分解能で算出されたチタン含有量を、玄武岩ユニットごとに地質を考慮して平均し、年代との相関関係を調べた。その結果、噴出が長く続いた Procellarum や Imbrium といった海では、約23億年前にチタン含有量が急激に増加していることが分かった。このチタン含有量の変化はマグマソースが変化したことを示唆しているのかもしれない。そこで本研究では、23億年前以前を「Phase 1 火成活動」、23億年前以後を「Phase 2 火成活動」と呼ぶことにする。これらの事実から、我々はマンツルの組成・構造変化に関して、20億年前頃にスーパーホットプルームが起こったという可能性を提示する。

スーパーホットプルーム仮説を検証するために、我々は測地学的データを用いて解析を行った。地形とセレノイドの差を計算し、マップ化すると、PKTの若い噴出のちょうど中央付近で台地状の特徴が見られた。この構造の規模は、北東-南西方向に1,000 km、北西-南東方向に1,200 km、周囲の海からの標高差はおよそ700 mであった。これはおそらくスーパーホットプルームの上昇に伴って形成されたものであると考えられる。そして、その構造を中心として、Phase2の噴出による玄武岩ユニットが形成された。スーパーホットプルームの上昇が、約20億年前であるとすると、およそその海の形成が終わった後であり、地殻構造の変化は、何らかの形で残されているはずである。本発表では、Phase2のHiチタンな噴出とスーパーホットプルームの関係性についての検証を行う。

キーワード: 月, 月の海, チタン含有量, PKT, スーパーホットプルーム, セレノイド

Keywords: Moon, lunar mare, titanium content, the Procellarum KREEP Terrane, super hot plume, selenoid

月のマントル進化の数値シミュレーション Numerical models of mantle evolution in the moon

小河 正基^{1*}
OGAWA, Masaki^{1*}

¹ 東京大学総合文化研究科

¹ Graduate School of Arts and Sciences, Univ. of Tokyo

月では、火成活動はマントル進化史の最初の10億年程度のうちにピークを過ぎ、その後は急速に衰えた。この特徴を理解することを目的とし、火成活動とマントル対流によるマントル進化の数値シミュレーションを行った。その結果、月のような小さい惑星では火成活動の時間スケールが火星などより大きな惑星より遥かに長く数億年程度になることがわかった。これは、より大きな惑星では、マントル対流の湧昇域でマグマが生成されるとその浮力のためさらにこの湧昇流が強まるというポジティブフィードバックがかかるが、月はこのフィードバックがかかるにはマントルのレイリー数が低すぎるためである。この長い時間スケールは月の海を形成した火成活動の時間スケールをよく説明する。また、このポジティブフィードバックの欠如は、火成活動の熱史への影響（サーモスタット効果）も弱い事を意味する。もともと月ではその低いレイリー数のため対流による熱輸送の熱史への効果も弱いため、このことは、月の進化にとって最も重要なのは、熱拡散による地表面からの冷却である事を示唆する。実際マグマオーシャンの効果を考慮せず、組成的に均質で温度はソリダス温度に等しいという初期条件から出発した予備的なマントル進化の数値シミュレーションでは、最初期の火成活動によりマントルから放射性元素が地殻に濃集して以降、マグマの母岩中の浸透率や地殻マントル全体の放射性元素の存在量などのパラメーターの値によらず、熱拡散によるリソフェアの厚さの増加の結果、火成活動は最初の10億年程度で衰えるという結果を得た。この結果は月の火成活動史の大枠は説明するが、同時に、現実の月で見られるおよそ20億年前まで続いた局所的な火成活動を理解するためには、マグマオーシャンの効果を考慮する必要のある事も示唆する。

キーワード: マントル進化, マントル対流, 火成活動, 月

Keywords: mantle evolution, mantle convection, magmatism, the moon

ボロノイダイアグラムを用いた月面クレーターから二次クレーターの抽出について Identification of secondary craters based on the Voronoi diagram of the lunar craters

木下 達生¹; 本田 親寿^{1*}; 平田 成¹; 諸田 智克²
KINOSHITA, Tatsuo¹; HONDA, Chikatoshi^{1*}; HIRATA, Naru¹; MOROTA, Tomokatsu²

¹ 会津大学, ² 名古屋大学大学院環境学研究科

¹The University of Aizu, ²Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

We developed an automatic method for detecting crater clusters with crater spatial distribution based on the Area Voronoi tessellation technique. In the method based on the hierarchical cluster analysis, the evaluation of crater strongly depends on the closest one crater (or one cluster). In the method based on Voronoi tessellation on the other hand, it depends on the adjacent all craters. Since, this approach does not misjudge the pair craters evaluated cluster by the method based on the hierarchical cluster analysis. When a small crater is close adjacent a large crater, a boundary line of Voronoi tessellation is in the rim of the crater. This is different from the line a person pulls by intuition. So, we select Area Voronoi tessellation. For estimate an area of Voronoi, we adopted the wave front method (Watanabe and Murashima, 2006). We applied the Area Voronoi tessellation to observed crater spatial distribution. If the area of Voronoi cell is small, the crater becomes the candidate of the crater cluster. As a result, for the evaluation of crater spatial distribution, we propose that the Area Voronoi diagram is suitable to identify candidates of secondary crater.

キーワード: 二次クレーター, ボロノイダイアグラム

Keywords: secondary crater, Voronoi diagram

かぐやスペクトルプロファイラデータを動的に解析するためのウェブアプリケーション開発 Development of a web application for dynamic analysis of the Kaguya Spectral Profiler data

杉本 紘平¹; 林 洋平²; 小川 佳子^{1*}; 平田 成¹; 寺 蘭 淳也¹; 出村 裕英¹; 松永 恒雄³; 山本 聡³; 横田 康弘³; 大竹 真紀子⁴; 大嶽 久志⁴

SUGIMOTO, Kohei¹; HAYASHI, Yohei²; OGAWA, Yoshiko^{1*}; HIRATA, Naru¹; TERAZONO, Junya¹; DEMURA, Hirohide¹; MATSUNAGA, Tsuneo³; YAMAMOTO, Satoru³; YOKOTA, Yasuhiro³; OHTAKE, Makiko⁴; Otake, Hisashi⁴

¹ 会津大学, ² 産総研, ³ 国環研, ⁴ 宇宙研

¹University of Aizu, ²AIST, ³NIES, ⁴ISAS/JAXA

Kaguya is a Japanese lunar orbiter launched on September 14, 2007 and observed the moon for about 2 years. The Spectral Profiler (SP) on board Kaguya was a spectrometer which provided global data set of visible-near infrared continuous reflectance spectra of the Moon. GEKKO is a web-application used to visualize the data observed by SP. GEKKO displays the graph of SP spectra and tables of ancillary data with thumbnail images simultaneously taken by Kaguya imager/camera. The current version of GEKKO is very useful for viewing SP spectra, but does not include analysis functions.

The goal of this study is to develop a framework for implementing analysis functions of the SP data. For transferring the data from the client, the original GEKKO connects to the server using MapServer. However, in case of MapServer, the client-researchers can only analyze in a predetermined manner. Therefore, we prepared CGI scripts and incorporated them into GEKKO.

By using the new GEKKO system, the clients-researchers will be able to dynamically analyze the SP data. The clients can select, coordinate and add the functions according to their objectives. We prepared the basic functions commonly used for the spectral analysis, such as running average, normalization and also similarity measurement.

月サウスポールエイトケン盆地の岩石・鉱物分布 Rock and mineral distribution of the lunar South Pole-Aitken basin

上本 季更^{1*}; 大竹 真紀子²; 春山 純一²; 山本 聡³; 中村 良介⁴; 松永 恒雄³; 岩田 隆浩²
UEMOTO, Kisara^{1*}; OHTAKE, Makiko²; HARUYAMA, Junichi²; YAMAMOTO, Satoru³; NAKAMURA, Ryosuke⁴; MATSUNAGA, Tsuneo³; IWATA, Takahiro²

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 国立環境研究所, ⁴ 産業技術総合研究所

¹The University of Tokyo, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³National Institute for Environmental Studies, ⁴National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

背景: サウスポール・エイトケン (以下 SPA) 盆地は月裏側の南半球に広がる月最大級の衝突盆地 (直径約 2200~2500 km) [1] であり、表面の地殻がはぎとられ、月マントルが露出しているといわれている [2]。そのため、SPA は月内部の組成を調べる上で最も重要な領域の 1 つである。SPA の中心部では、月マントル物質が地下深くまで溶融し貯留しているインパクトメルトプールが形成されたと考えられている [3]。その組成を調査することは、未だ解明されていない月マントル組成解明に繋がれると考える。ただし現在、SPA 盆地の内部は、盆地形成以降に噴出した溶岩流 (以下マーレ) による被覆や、衝突飛散物等による表面の混合により [4]、インパクトメルトプールの露出面積や鉱物・化学組成、溶融規模などは不明である。さらに、SPA 中心部は同プールを形成するインパクトメルトと似た鉱物組成をもつ溶岩流 (以下クリプトマーレ) が存在する可能性があるとして先行研究で言われているが [4]、先行研究では地形や反射率から推測されているのみである上に、使用したデータの解像度が低く、スペクトルの解析波長も短いため、各岩石同士の層序関係や、鉱物種を詳細に調査しておらず、中心部の地質は曖昧といえる。

手法: 本研究では、月周回衛星かぐやによって得られた標高情報 (LALT) と標高情報から製作した地形凸凹、分光データ (MI・SP) による盆地内部の岩石・鉱物組成を用いて、インパクトメルトプールの位置とサイズ (直径)、および岩相の推測をおこなった。

結果・考察: SPA 盆地内に地形の窪みが存在し、その外側と内側で、鉱物・化学組成が大きく異なり、外側では地殻物質や溶岩噴出物などが複雑に入り組んで存在するのに対し、内側では高カルシウム輝石に富む岩石が広く存在することが解った。さらにその地域の鉱物分布を詳細に解析した結果、主に低カルシウム輝石に富む岩石、高カルシウム輝石に富む岩石、マーレ物質に分けられた。SPA 盆地形成後にできたクレーターの内部や中央丘等の情報を使うことで、層序は上から、上部低カルシウム輝石層およびマーレ物質層→高カルシウム輝石層→下部低カルシウム輝石層と推測される。高カルシウム輝石層は、最上面に分布している領域に加え上部低カルシウム輝石層やマーレ物質層の一部覆われている部分も考慮すると、窪地全域に広範囲に存在することや、下部低カルシウム輝石層の中央丘 (最小のもの約直径 60km) から見積もると少なくとも約 10km は層厚が考えられる。この地域のマーレと比較すると、面積、層厚ともに数十倍の差が認められるため、クリプトマーレとは考えにくい。よって高カルシウム輝石層はインパクトメルトプールであると推測した。上部低カルシウム層の由来は窪地外側や分布状況、産状から盆地形成時の飛散物と考えられるが、下部低カルシウム輝石層の由来は、インパクトメルトプールの分化等を考慮にいれなければならず、今後の課題である。

[1] Alexander, 1978 [2] Spudis et al., 1994, [3] Lucey et al., 1997, [4] Pieters et al., 2000

キーワード: サウスポールエイトケン, 月, 岩石, 鉱物
Keywords: South Pole-Aitken, lunar, rock, mineral

ハイパースペクトルリモートセンシングによる月高地におけるCaに富む輝石の全球分布 Global Distribution Trend of High-Ca Pyroxene on the Lunar Highland by Satellite Hyperspectral Remote Sensing

山本 聡^{1*}; 中村 良介²; 松永 恒雄¹; 小川 佳子³; 石原 吉明⁴; 諸田 智克⁵; 平田 成³; 大竹 真紀子⁴; 廣井 孝弘⁶; 横田 康弘¹; 春山 純一⁴

YAMAMOTO, Satoru^{1*}; NAKAMURA, Ryosuke²; MATSUNAGA, Tsuneo¹; OGAWA, Yoshiko³; ISHIHARA, Yoshiaki⁴; MOROTA, Tomokatsu⁵; HIRATA, Naru³; OHTAKE, Makiko⁴; HIROI, Takahiro⁶; YOKOTA, Yasuhiro¹; HARUYAMA, Junichi⁴

¹ 国環研, ² 産総研, ³ 会津大, ⁴ JAXA, ⁵ 名古屋大, ⁶ ブラウン大

¹ NIES, ² AIST, ³ Univ. of Aizu, ⁴ JAXA, ⁵ Nagoya Univ., ⁶ Brown Univ.

The studies using the spectral data obtained by Spectral Profiler (SP) and Multiband Imager (MI) onboard the Japanese lunar explorer SELENE/Kaguya revealed the global distributions of the purest anorthosite (PAN), olivine-rich materials, orthopyroxene-rich, and spinel-rich materials over the entire Moon. However, the global distribution of high-Ca pyroxene (HCP)-rich sites has been unclear so far. In addition to mare region, which is dominated by HCP, it has been reported that several ray craters on highland regions show HCP-dominant spectra. Thus, the global distribution of HCP-rich sites, especially for the lunar highland regions, would provide important information for the structure and evolution of the lunar crust and mantle. Thus, using the global data set of the SP, we conducted the global survey to find HCP-rich sites on the Moon, especially for the lunar highland regions. Here, we report the global distribution trend of the HCP-rich sites based on this survey.

キーワード: リモートセンシング, ハイパースペクトル, かぐや

Keywords: Remote-sensing, Hyperspectral, Kaguya

月高地地殻の化学組成から推定するマグマオーシャンの固化過程 Solidification of the lunar magma ocean suggested by composition of the highland crust

大竹 真紀子^{1*}; 小林 進悟²; 武田 弘³; 諸田 智克⁴; 石原 吉明¹; 松永 恒雄⁵; 横田 康弘⁵; 春山 純一¹; 山本 聡⁵; 小川 佳子⁶; 唐牛 譲¹; 佐伯 和人⁷
OHTAKE, Makiko^{1*}; KOBAYASHI, Shingo²; TAKEDA, Hiroshi³; MOROTA, Tomokatsu⁴; ISHIHARA, Yoshiaki¹; MATSUNAGA, Tsuneo⁵; YOKOTA, Yasuhiro⁵; HARUYAMA, Junichi¹; YAMAMOTO, Satoru⁵; OGAWA, Yoshiko⁶; KAROUJI, Yuzuru¹; SAIKI, Kazuto⁷

¹宇宙航空研究開発機構, ²放射線医学研究所, ³千葉工大, ⁴名古屋大, ⁵国立環境研究所, ⁶会津大, ⁷大阪大
¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²National Institute of Radiological Sciences, ³Chiba Inst. of Technology, ⁴Nagoya University, ⁵National Institute for Environmental Studies, ⁶The University of Aizu, ⁷Osaka University

研究背景と目的: これまでに月高地地殻の Mg 値 (Mg/[Mg+Fe] のモル%比) が月の表側より裏側で高く、裏側を構成する岩石の方が表側よりもより未分化なマグマより結晶化した事が報告されている [1]。Mg 値の他にもう 1 つ Th 濃度もマグマの分化過程の情報源として重要である。Th は液相濃集元素であり、マグマの冷却過程で液相に濃集するため先に結晶化した岩石はより Th 濃度が低い。実際の月面観測からも月裏側の高地地殻は表側に比べて Th 濃度が低い事が報告されており [2]、Mg 値と Th 濃度の結果は定性的には整合している。本研究では Mg 値と Th 濃度の相関を調べる事により観測された月表と裏側の Mg 値や Th 濃度の違いがマグマオーシャンの固化時に形成した結果かどうかを評価し、また地殻形成時のマグマオーシャンの組成推定を試みる。

研究手法: かぐやの γ 線データを用いて Th 濃度のグリッドデータを作成する。その後、かぐやの反射スペクトルデータを用いて Th 濃度に対応する解像度を持つ Mg 値データを作成する。一方、マグマの分化過程シミュレーションプログラム (メルツ) [3] を使い、マグマオーシャンの初期組成を仮定した場合に想定される Mg 値と Th 濃度の変化を計算により求め、これと実測の比較を行う。計算にはマグマオーシャンの組成は地球の地殻+マントル組成やこれまでに推定されている月マグマオーシャン組成を出発時の組成として用いた。

結果: 観測された Mg 値と Th 濃度にはマグマの分化過程から想定される負の相関があり、また相関は 2 本のトレンドに分かれているように観察される。一方、シミュレーションによるマグマの分化トレンドと実測値を比較すると、上記 2 つのトレンドのうちの 1 方と地球の地殻+マントル組成から開始した場合のトレンドが類似し、月マグマオーシャン組成から開始した場合は 2 つのトレンドともに大きく異なる事が解った。

考察: 観測された Mg 値と Th 濃度に負の相関がある事は、これらパラメータが実際にマグマオーシャンの固化過程を反映している事を示すと考えられるが、2 つのトレンドの成因については現状不明である。一方でシミュレーション結果と実測値の比較は、従来の月マグマオーシャン組成推定の再評価が必要である事を示唆し、実測値を説明する為には従来よりも Mg 値の高い月マグマオーシャン組成が必要となる可能性もある。ただし今回のシミュレーションは計算条件等の評価が充分でなく、今後より詳細な検討が必要である。

[1] Ohtake, M. et al. (2012) Nature GeoSci. 5, 384-388. [2] Kobayashi, S. et al. (2012) Earth Planet. Sci. Lett. 337, 107-116. [3] Ghiorso and Sack (1995) Contrib. Mineral. Petrol. 119, 197-212.

キーワード: 月, かぐや, セレーネ, 地殻, マグマオーシャン
Keywords: Moon, Kaguya, SELENE, Crust, Magma Ocean

月裏側中央高地産の最もカルシウム濃度の高い斜長石 Plagioclase with High Ca Contents from the Central Farside Highland.

武田 弘^{1*}; 長岡 央²; 唐牛 譲³; 大竹 真紀子⁴; 矢沢 勇樹⁵; 山口 亮⁶
TAKEDA, Hiroshi^{1*}; NAGAOKA, Hiroshi²; KAROUJI, Yuzuru³; OHTAKE, Makiko⁴; YAZAWA, Yuuki⁵; YAMAGUCHI, Akira⁶

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² 早稲田大学理工学部, ³ 宇宙科学研究所, ⁴ 宇宙科学研究所, ⁵ 千葉工業大学工学部, ⁶ 国立極地研究所

¹Graduate School of Sciences, The University of Tokyo, ²Waseda Univ., ³JAXA/ISAS, ⁴JAXA/ISAS, ⁵Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology, ⁶National Inst. of Polar Research

月裏側中央高地に最もカルシウム濃度の高い斜長石が存在することを、月隕石と「かぐや」リモートセンシング・データで検証した。このような高カルシウム斜長石が弱い有機酸に溶けることより、その資源的利用と地球環境への影響につき述べる。

キーワード: 斜長石, 月地殻, 裏側高地, 資源的利用

Keywords: plagioclase, lunar crust, farside highland, resource utilization

月の水、地球の水 Volatile accretion on the Moon - A clue for the emergence of a habitable Earth.

橋爪 光^{1*}; 春山 純一²
HASHIZUME, Ko^{1*}; HARUYAMA, Junichi²

¹ 大阪大学理学研究科, ² 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究本部

¹Osaka University, Graduate School of Science, ²Japan Aerospace Exploration Agency / Institute of Space and Astronautical Science

月には大気が無く、月表土試料を調べても無水であり、月面は揮発性物質とはおよそ無縁な乾ききった環境のように見える。月と地球は太陽から同じ距離にある天体同士なのに、揮発性物質という観点から見ると、この二つは全く対照的な姿を見せる。地球を覆う揮発性物質は二次大気起源、すなわち、太陽系星雲そのものではなく、地球に集積した惑星物質に含まれていた成分が起源であると考えられている。いつ地球に供給されたのか、という問いの答えはまだ決着していない。地球形成と同時に供給されたという考え方もあるし、集積がほぼ完了した段階で地球表面に集中的に供給されたという考え方もある。ここでもう一度問う。なぜ月は全く無水に見えるのだろうか？ 月・地球系への惑星揮発性物質の供給タイミングに関する先ほどの選択肢の内、特に後者ならば、月に揮発性物質が相当量降着していて不思議ではないと思うのだが。もちろん、月は小さい天体なので、大気を永久には保持できない、というのが現在の月面が無水に見える大きな要因であろう。しかし、月形成初期において、揮発性物質の存在下で火成活動が起これば、地球の場合と同様、揮発性物質は岩石中に少ないながら必ず捕獲されているはずである。また、月試料には、月面上空に一時的に放たれた揮発性物質が、太陽風と相互作用をしながら表土にイオン打ち込みされる、という揮発性物質の記録モードもあるらしい。月試料には、水惑星地球の出自を明らかにする情報が記録されていても不思議ではない。ただ、ひょっとすると、その情報を引き出すのにふさわしい試料を、我々がまだ手にしていないだけかもしれない。講演では、月表土に降着する揮発性物質、その正体や降着率、を月試料から読み解く最近の試みをまず紹介する。そして、ここで掲げた問題の解決に向けて、われわれが今後目指すべき月科学の方向についても議論したい。

キーワード: 月レゴリス, 揮発性物質, 同位体組成, 降着率

Keywords: Lunar Regolith, Volatile Compound, Isotope Composition, Accretion Rate

月天体を形成する多状態混合固化した地球外物質 Extraterrestrial solidified materials with multi-mixture on the Moon

三浦 保範^{1*}
MIURA, Yasunori^{1*}

¹ 国内外大学
¹In & Out Universities

本研究は次のように最新の考えとデータにまとめられる。

- 1) 月の研究は、地球の早期物質のでき方と地球外天体のでき方に貴重な情報を提供してくれる。
- 2) 月の表層物質は、地球の固体岩石と同じ鉱物や形成とされているが、地球の鉱結晶と同じ同定法を使うので差異がわからない。しかし地球外では非晶質を含む多状態を混合した固体化物質である。
- 3) 月の準球形天体が衝突溶融形成により形成されているのは、均質岩石でなく不規則分布と衝突孔分布から推察できる。
- 4) 月の多状態含有固体物質の内部分布と保存などにより、不規則に表面や衝突孔内部に流体質の特徴が観察されている。
- 5) 月の岩石が地球の岩石と形成が異なることがイオン衝撃実験でわかる。地球の多層に分かれる結晶質岩石(マグマ溶融)物質は、かたいケイ酸塩構造が形成されているので、最初にイオン衝撃で発生するのはアルカリイオン(Na,K,Ca等)である。しかし月面の岩石は、衝突熱の形成のため、脆弱なケイ酸(Si,Al)が多くイオン衝撃で破壊され高い発生になる。
- 6) 地球の衝突岩石においても、原岩のケイ酸構造がかたいので地球と同じイオン衝撃の形式を示す。
- 7) 月の岩石は無大気・無水天体である月外物質で衝撃された多状態含有固体や固体相の破壊だけでなく、衝突しながら粒子が増大する、「衝突進化物質」よりなる天体であることを示している。
- 8) 地球創成期は月と同じ衝突形成で、不規則表面が地球に残存しているが、内部の軽元素流体が大量に放出し(巨大衝突)、凝固した海水層を形成する過程によってかなり異なった状態圏の循環層を示す天体となり、その循環系でマクロ生命循環体が発生したと考えられる。

キーワード: 月, 混合物, 固化物, 物質状態, ケイ酸塩骨格構造, イオン衝撃実験
Keywords: the Moon, mixture, solidified material, material state, ilicate framework, ion bombardment run

月衝突盆地の掘削深度の再検討 Re-examination of Excavation Cavity of the Impact Basins of the Moon based on GRAIL based Crustal Thickness Model

石原 吉明^{1*}; 中村 良介²
ISHIHARA, Yoshiaki^{1*}; NAKAMURA, Ryosuke²

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 産業技術総合研究所
¹JAXA, ²AIST

Large impact features, whose diameters are more than hundreds of kilometers, are called impact basins. Large impact basins can provide comparatively clear information of the cratering process and/or constrain the lunar thermal history. The internal or subsurface structures of basins can be assessed through an analysis of their associated gravitational and topographic signatures. The recently Kaguya/SELENE mission has improved the crustal thickness model not only for the nearside but also for the farside based on the first direct farside gravity and global topography mapping. Moreover most recent GRAIL mission vastly improved spatial resolution and overall accuracy of the lunar gravity models and lunar crustal thickness models. The GRAIL crustal thickness model gives us the opportunity to re-analyse excavation depth and diameter of basin forming impact processes anywhere on the Moon with improved accuracy. This study uses the GRAIL crustal thickness model, to reconstruct the excavation cavity geometry of large impact basins on the Moon.

Our method of reconstructing the excavation cavity of large impact basins is fairly simple. We assume that the thinned crust and uplifted Moho beneath features is a direct consequence of (1) the amount of crustal material excavated during the cratering process and (2) the subsequent rebound of the crater (basin) floor. We first construct azimuthally averaged profiles for the surface topography, mare thickness and subsurface structure of the Moho for each basin. Next, we restored the uplifted Moho and overlying crust to its pre-impact position. Estimating procedures of pre-impact position is almost the same as previous analysis. After removing mare fill, this process resulted in a roughly parabolic surface depression, that we interpret as being the first-order representation of the basin's excavation cavity.

One of the most important values of understanding the large impact basin is the depth-to-diameter ratio of the excavation cavity. We examine the depth versus the diameter of our reconstructed excavation cavities (excluding the Imbrium Basin and the South Pole-Aitken Basin). It seems that up to 400 km cavity diameter, the depth (hex) and diameter (Dex) are linearly related. Further more, the linear relationship ($\text{hex}/\text{Dex}=0.079\pm 0.006$) is almost consistent with, though slightly smaller than, the value for craters orders of magnitude smaller in size ($\text{hex}/\text{Dex}=0.1$), suggesting that proportional scaling is valid for basin scale impact structures except the largest impact structures on the Moon. One of the reasons of smaller depth-to-diameter ratio are probably effects due to the post impact modifications. Impact basins which has excavation cavity diameter larger than 400 km show the different state. The average crustal thickness of GRAIL lunar crustal thickness model is 34 to 43 km. So excavation cavity diameter of 400 km is located the regime boundary between the excavation/melting cavity within crust regime and the excavation/melting cavity exceed the Moho interface regime.

キーワード: 衝突盆地, 掘削領域, 溶融領域, 月
Keywords: Impact Basin, Excavation Cavity, Melting Cavity, Moon

GRAIL の Level-1b と Level-2 データを用いた月重力異常の推定 Lunar gravity anomaly recovery with the GRAIL level-1b and level-2 data

橋本 実奈^{1*}; 日置 幸介¹
HASHIMOTO, Mina^{1*}; HEKI, Kosuke¹

¹ 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻

¹Department of Natural History Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

現在までにいくつかの月の全球重力場モデルが得られているが、2011年9月に打ち上げられた双子衛星 GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory) によるものが、最も空間分解能が高い。従来地球局から月周回衛星のドップラー追尾によって求められた月の表側の重力場は、SELENE におけるリレー衛星を用いた衛星間 tracking によって全球で得られるようになった。一方 GRAIL は GRACE と同じ”Tom and Jerry”方式を採用しており、双子衛星間のマイクロ波測距データから重力場を推定する。全球で均一な精度で重力異常分布が得られ、既に Science の特集号でその科学的成果が注目されている。GRAIL による重力場のデータ (Level-2 data) は十月に公開済みだが、今回はそれに先立って公開された Level-1b データを用いて試験的に月の重力場の推定を試みたので、その結果を簡単に報告する。

データは PDS Geosciences Node (<http://www.pds.wustl.edu/>) からダウンロードした。GNV1B データは一分毎の衛星の位置と速度が与えられている。また KBR1B データには衛星間の距離、距離変化率、距離変化の加速度が5秒毎に与えられている。今回はこれら二種類のデータファイルをダウンロードし、衛星高度の低い適当な部分を取り出して、距離変化加速度を観測データとして月面上の質量分布をパラメータ推定した。プログラムは、かつて Lunar Prospector の延長低高度ミッションの視線加速度データから月の重力異常を求めるプログラム (Sugano & Heki, EPS 2004; Sugano & Heki, GRL 2005) を改造して用いた。

今回の発表では 2012年3月2-15日の表側のデータと、5月25-29日の裏側の距離変化加速度の値を、双子衛星の中心の位置を用いて地図上にプロットしたのを見せる。衛星高度が25km以下の部分のみを取り出した。その結果距離変化の加速度が全体に青みを帯びて(負の値をとって)おり、それはプロットした範囲がいずれの期間も近月点近傍であるためである。北から南、南から北のいずれの方向に衛星が飛んでいても、ケプラーの第二法則により近月点に近づくにつれて衛星が速くなり衛星間距離が増え、近月点を過ぎると距離が減少する。つまり距離変化の加速度は近月点付近では負となる。

裏側は緑や黄色の模様とところどころに見えた。これは短波長の重力異常に伴う加速度である。表側と裏側を比較すると、のっぺりした前者に比べて後者の方が細かい加速度変化を繰り返していることがわかった。更に表側の一部について、加速度データを用いて月面上の質量分布を推定したものも今回示す(推定結果はフリーエア重力異常に換算)。湿りの海の正の重力異常(マスコン)を十分に捉えることができた。

次に GRAIL の Level-2 data を用いて個々のクレーターの重力異常を推定する予定である。クレーターの重力異常は、クレーター内部の物質が取り除かれて周囲に堆積することで形成される。従来はクレーターの直径や深さは隕石などの衝突物体の質量やスピードで決まるとされている。月の表裏ではカウラ定数が異なることが知られている(橋本・日置, 2014)が、クレーターの大きさや深さも系統的に異なるとされている。そこには温度の違いが関係しており、一般に熱史の違いの結果の一つとして理解できる。最近の研究では、熱いマンツルの温度をもつ表側に生じた衝突盆地は、同じ大きさの物体が裏側に衝突して生じた衝突盆地に比べて大きくなることが示唆された(Miljkovi?, K. et al., 2013)。本研究では、これらを明らかにすることを目標とし、GRAIL の詳細な重力場データで個々のクレーターの重力異常の大きさを表と裏で比較を試みる。

深発月震の地震モーメント分布と月深部構造に関する考察 Consideration of the seismic moment distribution of deep moonquake and the lunar deep structure

山田 竜平^{1*}; 野田 寛大¹; 荒木 博志¹
YAMADA, Ryuhei^{1*}; NODA, Hiroto¹; ARAKI, Hiroshi¹

¹ 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室

¹ National Astronomical Observatory of Japan / RISE Project

NASA の Apollo ミッションで設置された月地震計ネットワーク (Apollo12 号, 14 号, 15 号, 16 号) により、月深部 700-1200km の間である特定の震源域から、月地震 (深発月震) が繰り返し発生する事が確認された。深発月震は、各震源域で月-地球-太陽の位置関係、すなわち月内部に作用する潮汐力に参与して周期的に発生することが分かっている (e.g., Lammlein, 1977, Bulow et al., 2007)。深発月震の震源位置は現在 106 個同定されており (Nakamura, 2005)、各々の震源においてその活動度や発生するイベント大きさ、また発生メカニズムが異なる事も示唆されている (Araki, 2001)。

Yamada et al., (2013) では、特に Apollo 観測時に活発で震源位置が良く決まっている深発月震源 15 個を選び、Apollo12 号で観測されたこれらの震源からの各深発月震イベントの地震モーメントの導出を行った。地震モーメントの導出には、観測された地震イベントの振幅値から、Apollo 地震計の特性、波が伝搬した経路の内部構造の特性、幾何減衰の効果、震源域における断層の放射パターンを補正する必要がある (Goins et al., 1981)。この解析で、最新の月内部構造モデル VPREM00N (Garcia et al., 2011) を使用したところ、震源ごとに地震モーメントの分布は異なり、特に遠地の震源程、大きい地震モーメントのイベントを発生し、震源間で最大で 1 桁程度、モーメントの大きさに差異がある事が分かった。

本研究では、この結果の妥当性を検証するために、同一震源イベントで Apollo15 号, 16 号で観測されたデータからも地震モーメントの評価を行った。この結果、本来同じであるはずの地震モーメントの値が、例え同一イベントであっても各ステーションデータから求められる地震モーメント間で異なる値を示す事が分かった。特に、ネットワークから離れた遠地の震源である程、地震モーメントの差異が大きい傾向があるため、モーメントを導出するのに使用した内部構造モデルに問題がある事が示唆される。特に地震計に到達する地震波の振幅値に対する影響が大きいのは地震波エネルギーの減衰の程度を表す Q 値である。これまでの研究では (e.g., Nakamura and Koyama 1982)、特に深部の Q 値に不確実性が高い事が示唆されており、VPREM00N でも誤差の大きい値を使用している。そこで、本研究では各ステーションデータから求めた地震モーメントの差異が最も小さくなるような Q 値の導出を試みた。このとき、震源域における放射パターンも不確実性が高く、地震モーメントの値に影響を与えるので、有り得る放射パターンの影響も考慮して、解析を行った。本発表ではこれら解析を通して求めた深発月震の地震モーメント分布と月マントル中の新しい Q 値について報告と議論を行う予定である。

キーワード: 深発月震, 地震モーメント, 月震活動度, 月マントル, 月 Q 値, 月深部構造

Keywords: Deep Moonquake, Seismic Moment, Lunar Seismic Activity, Lunar Mantle, Lunar Seismic Quality Factor, Lunar Deep Structure

月のアルカリ外気圏の構造と変動 Variation of the ionized lunar sodium and potassium exosphere

横田 勝一郎^{1*}; 斎藤 義文¹; 浅村 和史¹; Nishino Masaki²; 綱川 秀夫³
YOKOTA, Shoichiro^{1*}; SAITO, Yoshifumi¹; ASAMURA, Kazushi¹; NISHINO, Masaki²; TSUNAKAWA, Hideo³

¹宇宙研, ²名大太陽地球環境研究所, ³東工大
¹ISAS/JAXA, ²STE Lab., ³Tokyo Institute of Tech.

Lunar exosphere has been observed and studied on many occasions by ground-based telescopes since the discovery of surface-bounded alkali exosphere. The observed exospheric components were alkali atoms such as Na and K because the emission lines are much brighter than for other conceivable components. The structure, source, and the transport mechanisms of the lunar exosphere have been discussed based on these ground-based observations of the alkali atoms. As for the source mechanism of the thin lunar alkali exosphere, five processes were proposed as follows: thermal desorption, electron-stimulated desorption (ESD), photon-stimulated desorption (PSD), ion-induced desorption (sputtering), and vaporization by micrometeoroid impacts. Structure of the lunar exosphere gives us the key parameters to investigate the source mechanism. The observed Na exosphere distribution suggested that PSD and/or sputtering do not simply release the exospheric particles. Since PSD is capable of releasing alkali atoms only out of very shallow region in the lunar soils, PSD has relatively limited store of the exospheric particles in the lunar surface. If there was no replenishing process, PSD would deplete surface alkalis. We present latitude and longitude distributions of Na⁺ and K⁺ fluxes from the Moon derived from the Kaguya low-energy ion data. Although the latitude distribution agrees with the previous ground-based telescope observations, dawn-dusk asymmetry has been found in the longitude distribution. Our model of the lunar surface abundance and yield of Na and K demonstrates that the abundance decreases to around 50%, at dusk compared to that at dawn due to the emission of the exospheric particles. It is also implicated that the surface abundance of Na and K need to be supplied during the night in order to explain the observed lunar exosphere with the dawn-dusk asymmetry.

キーワード: 月, 外気圏, アルカリ大気, 質量分析
Keywords: Moon, Exosphere, Alkali atmosphere, Mass analyses

月周辺の太陽風中で観測されるホイッスラーモード波動の様々な形態 Various appearances of whistler-mode waves observed near the Moon in the solar wind

津川 靖基^{1*}; 加藤 雄人¹; 寺田 直樹¹; 綱川 秀夫²; 高橋 太²; 渋谷 秀敏³; 清水 久芳⁴; 松島 政貴²
TSUGAWA, Yasunori^{1*}; KATO, Yuto¹; TERADA, Naoki¹; TSUNAKAWA, Hideo²; TAKAHASHI, Futoshi²; SHIBUYA,
Hidetoshi³; SHIMIZU, Hisayoshi⁴; MATSUSHIMA, Masaki²

¹ 東北大学理学研究科地球物理学専攻, ² 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, ³ 熊本大学大学院自然科学研究科, ⁴ 東京大学地震研究所

¹Department of Geophysics, Tohoku University, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ³Department of Earth and Environmental Sciences, Kumamoto University, ⁴Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Narrowband whistler-mode waves whose frequencies close to 1 Hz have been observed near the Moon [Farrell et al., 1996; Nakagawa et al., 2003; Halekas et al., 2006; Tsugawa et al., 2011]. Broadband whistler-mode waves in the frequencies up to about 10 Hz with no preferred polarity have also been observed near the Moon [Halekas et al., 2008; Nakagawa et al., 2011, Tsugawa et al., 2012]. In addition, the lunar magnetometer (LMAG) aboard Kaguya detected right-hand polarized broadband waves, which is relatively weak and appears in the frequency range of several Hz. Since the angle between the wave vector and the sunward direction is large, the waves are not significantly Doppler shifted, indicating that they are whistler-mode waves. We also reveal the existence of harmonic waves whose fundamental waves appear in the frequencies near 1-2 Hz. The fundamental waves resemble the narrowband whistler-mode waves.

We construct criteria to select these waves and perform statistical analyses. Based on the statistical properties, we suggest possible scenarios of the generation and propagation of the four types of waves around the Moon. Whistler-mode waves in the frequency near the lower hybrid frequency generated through the reflection of ions by the Moon would be observed as (1) the narrowband waves in the spacecraft frame when the group velocity vector points to the sunward and is cancelled by the solar wind velocity, as (2) the broadband waves in the interaction region with various wave components, as (3) the right-hand polarized broadband waves when the wave vector points perpendicular to the sunward, and as (4) the harmonic waves in the same condition with NR with a large compressional component enough to be steepened.

K-Ar年代測定のための、LIBSを用いたAr輝線の検出実験 Detection experiment of Ar emission lines for K-Ar dating using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy

奥村 裕^{1*}; 芝崎 和夫¹; 大石 峻裕¹; 長 勇一郎²; 亀田 真吾¹; 三部 賢治²; 三浦 弥生²; 杉田 精司²
OKUMURA, Yu^{1*}; SHIBASAKI, Kazuo¹; OISHI, Takahiro¹; CHO, Yuichiro²; KAMEDA, Shingo¹; MIBE, Kenji²; MIURA, Yayoi N.²; SUGITA, Seiji²

¹ 立教大学, ² 東京大学

¹Rikkyo University, ²The University of Tokyo

現在 JAXA では月周回衛星 SELENE(かぐや)の後続機として SELENE-2 の打ち上げを検討している。SELENE-2 では無人探査ローバーを月に着陸させ、まだ謎の多い月表面物質の科学調査を行う予定である。月面物質についての情報はアポロ計画で持ち帰られた試料に大きく依存しているが、月全体の特徴を反映していない可能性がある。

そこで、我々は月の調査を行うローバーに搭載する元素組成・固化年代測定装置として LIBS(Laser Induced Breakdown Spectroscopy:レーザー誘起絶縁破壊分光装置)を提案している。LIBS は高エネルギーのパルスレーザーを測定対象に照射しプラズマ光を発生させ、その光を分光することによって元素組成分析を行う装置である。LIBS を用いた元素測定は NASA の火星探査ローバー「Curiosity」によって既に実証されている。また、固化年代測定は K-Ar 年代測定によって行うことを検討している。K-Ar 年代測定は K の放射壊変を利用した年代測定法である。K は多くの岩石鉱物に含まれており、その放射性同位体である ⁴⁰K は、半減期 12.5 億年で ⁴⁰Ar に崩壊してゆく。したがって岩石に含まれる ⁴⁰K に対する ⁴⁰Ar の割合を測定することにより、その岩石が固化した年代を測定することができる。現在、LIBS を用いて K の輝線は検出されているが Ar の輝線は検出されていない。既にその場で K-Ar 年代測定を行うため、K を LIBS で定量し Ar を四重極質量分析計(QMS)を用いて定量する、という手法が検討されている。この方法では LIBS と QMS の2つの観測器が必要となる。我々が検証している手法は、LIBS によって Ar の定量分析も行うことで LIBS のみで固化年代測定を行うことを目標としており、実現すれば装置を小型化することが可能となる。

LIBS によって大気中で生成されるプラズマの温度はおよそ 1eV(11600K)であると知られている。その条件下で検出できる可能性が高い Ar 輝線の波長は 104.8nm と 106.7nm である。この波長の付近には主要元素の中性、1 価イオンの輝線がないため Ar 輝線の検出は可能であると考えていた。この波長の光は大気中の窒素や酸素に吸収されてしまうため大気中では測定不可能である。そこで我々は真空紫外分光装置を用いた実験を行い Ar 輝線の検出を目指した。実験を行った結果、生成されるプラズマの温度が想定していた 1eV よりも高い数から数十 eV まで加熱されており、Ar の輝線に対して他の価数の高いイオン(e.g. Si(IV), Fe(II))の輝線が強くなっていることがわかった。このため、Ar 輝線を検出するためにはプラズマの温度を低減させる必要がある。我々は測定対象に照射されるパルスレーザーのエネルギー密度を小さくすることによってプラズマの温度を下げ、104.8nm と 106.7nm の Ar 輝線の検出実験を行った。またプラズマの温度が 1eV のときは検出が困難であると考えていた真空紫外-近赤外領域の Ar 輝線についても検証した。

キーワード: LIBS, 元素組成, K-Ar 年代測定, 惑星探査, 月

Keywords: LIBS, elemental compositions, K-Ar dating, Planetary Explora, Moon

月の縦孔・地下空洞探査 Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration (UZUME)

春山 純一^{1*}; 河野 功¹; 久保田 孝¹; 大槻 真嗣¹; 西堀 俊幸¹; 岩田 隆浩¹; 石原 吉明¹; 山本 幸生¹; 永松 愛子¹; 長谷 中利昭³; 清水 久芳⁴; 諸田 智克⁵; 道上 達広⁶; 白尾 元理⁷; 宮本 英昭⁴; 小林 憲正²; 山本 聡⁸; 横田 康弘⁸; 橋爪 光⁹; 佐伯 和人⁹; 小松 吾郎¹⁰

HARUYAMA, Junichi^{1*}; KAWANO, Isao¹; KUBOTA, Takashi¹; OTSUKI, Masatsugu¹; NISHIBORI, Toshiyuki¹; IWATA, Takahiro¹; ISHIHARA, Yoshiaki¹; YAMAMOTO, Yukio¹; NAGAMATSU, Aiko¹; HASENAKA, Toshiaki³; SHIMIZU, Hisayoshi⁴; MOROTA, Tomokatsu⁵; MICHIKAMI, Tatsuhiro⁶; SHIRAO, Motomaro⁷; MIYAMOTO, Hideaki⁴; KOBAYASHI, Kensei²; YAMAMOTO, Satoru⁸; YOKOTA, Yasuhiro⁸; HASHIZUME, Ko⁹; SAIKI, Kazuto⁹; KOMATSU, Goro¹⁰

¹ 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構, ² 横浜国立大学, ³ 熊本大学, ⁴ 東京大学, ⁵ 名古屋大学, ⁶ 近畿大学, ⁷ 惑星地質研, ⁸ 国立環境研, ⁹ 大阪大学, ¹⁰ ダヌンツィオ大学

¹ Japan Aerospace Exploration Agency, ² Yokohama National University, ³ Kumamoto University, ⁴ University of Tokyo, ⁵ Nagoya University, ⁶ Kinki University, ⁷ Planetary Geology Institute, ⁸ National Institute for Environmental Studies, ⁹ Osaka University, ¹⁰ Università d'Annunzio

2007年に我が国が打ち上げた月探査機 SELENE (かぐや) に搭載された地形カメラのデータから、月のマリウス丘、静の海、賢者の海に、直径、深さともに、50~100 mに及ぶ巨大な縦孔構造が発見された。これらは、月地下に存在する大きな空洞構造の上に開いたものと考えられた。その後、これらの縦孔構造は、明らかに地下の地下空洞構造に繋がっていることが確認されるようなデータが集積されている。こうした地下の空洞構造は、地球からの類推で、溶岩チューブや、マグマ溜まり、或いは断層起源の空洞などが考えられる。これらの縦孔・地下空洞は、様々な科学的な点から興味がある。加えて、こうした縦孔或いは地下空洞は、火星にも存在する。火星の地下空洞に至っては、生命が発現・維持・進化するのに、火星上でも最も可能性の高い所であると言える。月・火星の縦孔・地下空洞は、月惑星科学の観点から最も重要な探査対象の一つである。

しかしながら、深さ数 10m 以上にも及ぶ縦孔を降下し、数 10cm~数 m にも及ぶ岩体の散在する縦孔底を走破し、更に奥へ暗く広がる空間へと探査を進める事は、非常にチャレンジングである。しかしだからこそ、我々は、これら縦孔・地下空洞の探査をミッション・探査システム・アウトリーチなど、様々な観点から議論を重ね、「Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon Exploration (UZUME) 計画」として、探査を実現しようとしている。本講演では、現在の UZUME 計画の検討状況を報告する。

キーワード: 月, SELENE, 縦孔, 地下空洞
Keywords: Moon, SELENE, hole, cavern

DOEを用いた月面天測望遠鏡の開発及びDOE試作状況 Development of ILOM using DOE and situation of trial manufacturing of DOE

鹿島 伸悟^{1*}; 荒木 博志¹; 花田 英夫¹; 鶴田 誠逸¹; 鈴木 浩文²; 安田 進³; 宇都宮 真³
KASHIMA, Shingo^{1*}; ARAKI, Hiroshi¹; HANADA, Hideo¹; TSURUTA, Seiitsu¹; SUZUKI, Hirofumi²; YASUDA,
Susumu³; UTSUNOMIYA, Shin³

¹ 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, ² 中部大学工学部機械工学科, ³ 宇宙航空研究開発機構

¹RISE Project Office, National Astronomical Observatory of Japan, ²Mechanical Engg., Chubu University, ³Japan Aerospace Exploration Agency

【要旨】

次期 SELENE 計画の一環として、月面に天測望遠鏡を設置することを考えている。これにより、月の微妙な振動や変動を高精度に測定・解析し、月の内部構造やその起源を明らかにすることが目的である。本発表では、月面という過酷な温度環境の中でも、星像位置決定精度 1mas という高性能を実現することが可能な望遠鏡対物レンズの開発と、そのキーテクノロジーである DOE(Diff ractive Optical Element) の特徴や環境解析結果、中部大鈴木研と共同開発している DOE の製造方法及び試作品の状況等を報告する。

【DOE】

DOE はその名の通り回折で光を曲げるものである。従来のレンズは屈折で光を曲げるが、回折と屈折は色分散が逆であるため、これらを組み合わせることで、劇的に色収差を補正することが可能となり、従来は必須であった低分散ガラスも不要となる。従来は必須であったこの低分散ガラスは屈折率の温度変化が非常に大きく、ある温度では性能の出ている光学系が、温度が少し変化すると色収差が大きく出て性能が NG となるため、非常に狭い温度範囲でしか使えないという欠点があった。一方 DOE にはそんな特性はなく、少々温度が変化しても高性能をキープできるため、月面という過酷な温度環境の元でも現実的な温度範囲で使える光学系とすることが可能となる。

ただ DOE には、回折効率が波長に依存するという欠点と、高精度なものは製作が非常に困難という問題点もある。前者に関しては、ILOM のように、「像を見る」ことではなく、「星像の重心を正確に検出する」という目的に於いては、少々不要次数光による迷光が重畳しても検出精度に影響がないことを定量的な解析により示した。また、製造に関しては、高精度光学部品製造の権威である中部大工学部の鈴木研と協力研究体制を敷き、最適な製造法を考案して頂くことにより、十分実用となる DOE を製造することが可能となった。

【今後の展開】

DOE の製造目処は立ったため、それと組み合わせる屈折レンズや鏡筒を試作し、地上試験等で望遠鏡としての光学性能を確認することが今後必要である。また、DOE 以外にも天頂筒の構成に必須な水銀面(水銀皿)や折り曲げプリズム(スパイダプリズム)といったキーコンポーネントもあるため、これらに関しても試作し、光学系と組み合わせた性能確認を行うことも必要であると考えている。

キーワード: 月面天測望遠鏡, 回折光学素子

Keywords: ILOM, DOE, SELENE

月面コーナーキューブミラーの角度・変形・DAO 解析 Angle, deformation and DAO (Dihedral Angle Off-set) Analysys of the corner cube mirror for LL

鹿島 伸悟^{1*}; 野田 寛大¹; 荒木 博志¹; 花田 英夫¹; 國森 裕生²; 大坪 俊通³
KASHIMA, Shingo^{1*}; NODA, Hiroto¹; ARAKI, Hiroshi¹; HANADA, Hideo¹; KUNIMORI, Hiroo²; OTSUBO, Toshimichi³

¹ 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, ² 情報通信研究機構, ³ 一橋大学社会学研究科
¹RISE Project Office, National Astronomical Observatory of Japan, ²National Institute of Information and Communications Technology, ³Social Sciences, Hitotsubashi University

【要旨】

次期 SELENE 計画の一環として、月面に口径 20cm クラスの新たなコーナーキューブミラー (CCM) を設置することを考えている。これにより、地球・月間の距離を cm オーダーで精測し、その微妙な変動を高精度に解析することで、月の内部構造やその起源を明らかにすることが可能となる。このような高精度の測定を可能にするには、各ミラーの直角精度 0.1 秒、面精度 $10/\lambda$ 以下、DAO 角 0.6 秒 \pm 0.1 秒といった非常に高精度な加工・組立及び測定が必要となる。

【角度誤差解析】

完全な平面が完璧に直角に形成された CCM が月面に於いて環境温度や重力によりどのように変形するか、そしてそのように変形した場合の光学応答がどうなるかに関しては報告済みであるが、そもそも完全な平面や完璧に直角に形成することは不可能であるため、これらの初期エラーに関して解析しておく必要がある。

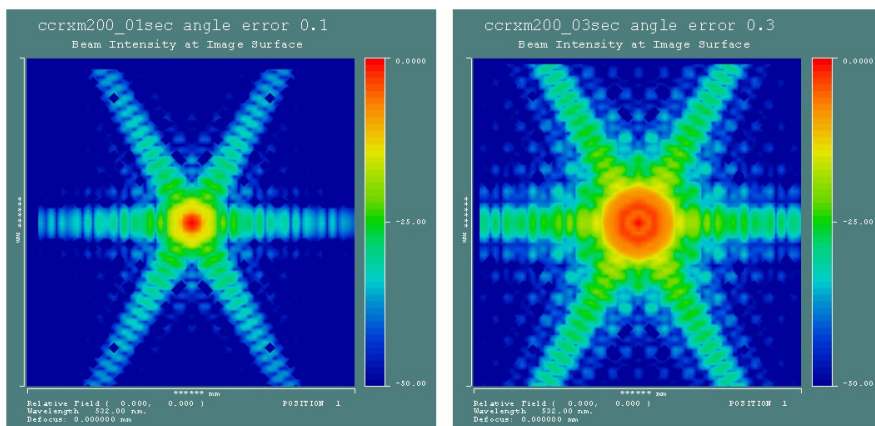
下図は CCM の 3 面の全ての各 2 面に 0.1 秒及び 0.3 秒の角度エラーを与えた場合の光学応答である。地球月間の距離、及びその間のビームの拡がりも考慮している。角度エラーが 0.1 秒から 0.3 秒になっただけで、大きく劣化していることが見て取れる。

【今後の展開】

下図では各面は完全な平面としているが、実際には製造誤差・熱変形・重力変形が重畳するため、これらを全て考慮した解析をする必要がある。かなり複雑且つ評価の難しい解析となるが、必要且つ重要な解析であり、今後の課題である。

キーワード: 月レーザ測距, コーナーキューブミラー, 光学応答

Keywords: LLR, CCM, SELENE



月レーザー測距用ホロー型新規月面反射板の開発 Development of the Retroreflector on the Moon for the Future Lunar Laser Ranging

荒木 博志^{1*}; 鹿島 伸悟¹; 野田 寛大¹; 國森 裕生²; 千葉 皓太³; 大坪 俊通⁴; 宇都宮 真⁵; 松本 吉昭⁶
ARAKI, Hiroshi^{1*}; KASHIMA, Shingo¹; NODA, Hirotomo¹; KUNIMORI, Hiroo²; CHIBA, Kouta³; OTSUBO, Toshimichi⁴
; UTSUNOMIYA, Makoto⁵; MATSUMOTO, Yoshiaki⁶

¹ 国立天文台, ² 情報通信研究機構, ³ 岩手大学, ⁴ 一橋大学, ⁵ 宇宙科学研究所, ⁶ (株) プラネット

¹National Astronomical Observatory of Japan, ²National Institute of Communication and Technology, ³Iwate University, ⁴Hitotsubashi University, ⁵Japan Aerospace Exploration Agency, ⁶PLANET Co. Ltd.

月レーザー測距 (LLR) は過去 40 年以上にわたり、月の回転、潮汐、および内部構造を制約する重要なデータを供給し続けている。LLR の測距精度は過去 20 年間では、地上局におけるレーザー光の発振・受信システム改良やレーザー光の大気遅延モデルの改良が進んだため、2cm 以下になっている。しかしながら月の深部構造 (流体コアの存否・サイズ・形状、マントルの非弾性など) のさらなる理解のためには、さらにひと桁以上の高精度測距が必要とされている。そこで我々は将来の月面設置を目標に、原理的に測距誤差を発生させない「単一素子ホロー型逆反射板 (Corner Cube Mirror; CCM)」の開発研究を進めている。CCM はオプティカルコンタクトで 3 枚の鏡を接合した 3 面鏡であり、アポロ 11 号地点に置かれた LLR 用コーナーキューブをしのぐ反射効率を持たせるため、口径 20cm を目標にしている。ミラーの材質については、「熱膨張率/熱拡散率」及び剛性率をもとに極低膨張率ガラスセラミック (クリアセラム Z-EX (CCZ-EX); オハラ) か単結晶シリコンを候補とした。さらに CCM のミラー部だけでなく CFRP 製ジンバルと組み合わせた熱モデルを作製し、月面の温度環境における熱変形/光学応答シミュレーションを行った。その結果、ミラーの固定方法に敏感ではあるが、(1) ミラーに影が付いて温度差がしやすい日照条件でも光学性能の劣化は十分小さくできること、(2) 差はわずかではあるがクリアセラム Z-EX よりも単結晶 Si の方が性能面で優れていることがわかった。

キーワード: 月レーザー測距, 逆反射板, ホロー型, 単結晶シリコン, 変形, 光学性能

Keywords: LLR, corner cube mirror, hollow, single crystal Si, deformation, optical performance

Lunar Laser Ranging Trial at Koganei SLR station Lunar Laser Ranging Trial at Koganei SLR station

野田 寛大^{1*}; 國森 裕生²; 荒木 博志¹
NODA, Hiroto^{1*}; KUNIMORI, Hiroo²; ARAKI, Hiroshi¹

¹ 国立天文台, ² 情報通信研究機構

¹National Astronomical Observatory of Japan, ²National Institute of Information and Communications Technology

Introduction: The Lunar Laser Ranging (LLR) is a technique to measure the distance between laser stations on the Earth and retroreflectors on the Moon, by detecting the time of flight of high-powered laser emitted from the ground station. Since the Earth-Moon distance contains information of lunar orbit, lunar solid tides, and lunar orientation and rotation, observation data of LLR have contributed to the lunar science, especially for the estimation of the inner structure of the Moon through orientation, rotation and tide. There are five retroreflectors on the Moon, Apollo 11, 14, 15 (U. S. A.), Lunokhod 1 and 2 (french-made, carried by former U. S. S. R.). The Apollo 15 has largest aperture among them, and almost 75 % of the total LLR data are from Apollo 15 site.

System Description: Since there is no Japanese station which can range the Moon so far, a precursor ranging experiment by using the Satellite Laser Ranging (SLR) facility in the NICT Koganei campus in Tokyo is ongoing. The SLR station has a 1.5 m Cassegrain telescope with Coude focus. Normally it is equipped with a laser with 20mJ, 20Hz repetition rate, and 35 picoseconds pulse width for satellite ranging. In addition to it, a wide-pulse width laser (3 nanoseconds, which corresponds to 45 cm in 2-way range) with energy of about 350 mJ per shot, repetition rate of 10Hz, wavelength of 532 nm is introduced to detect photons from the lunar retroreflectors for demonstration. As the pulse width is broad, the high accuracy ranging is not expected, therefore it is solely used for the confirmation of the optical link budget between the ground station and retroreflectors on the Moon. As the photon detector, we use a SPAD (Single Photon Avalanche Diode) and also an MCP (Micro Channel Plate) photo multiplier whose quantum efficiency is twice as much as that of the SPAD in use. For the pointing, a CCD imager is also available in the same detector box. They can be switched by reflecting mirrors. To suppress the background noise, a bandpass filter (0.3 nm FWHM, 50 % transparency) and spatial filter (pinhole) with diameter of 400 microns are installed and checked. For better link budget, the contamination of optical elements of the telescope and on the optical bench was checked. The alignment of the laser emission path with respect to the laser receiving path and laser beam divergence has been adjusted to maximize the efficiency of the laser emission.

Pointing: Because the retroreflectors are small and they are not visible from ground telescopes, we point the telescope to known small-sized craters (~10 km in diameter) whose positions are known in selenographic coordinate and thus in topocentric coordinate at the observation site. Then the offset angles in azimuth and elevation direction from the predicted pointing direction are determined so that the center of the crater comes to the center of the CCD images which are colligned with the SPAD and the MCP. This procedure confirms the pointing of the telescope.

Observations: Trials for the lunar return have been conducted since autumn 2013. As of the date of submission, the ranging to the Moon is not successful. Therefore we need to detect the return from the Apollo 15 site by using the nanosecond laser pulse for the first step. As the next step, we need to know the condition on which lunar ranging is successful in Koganei, for example, lunar phase, distance to the retroreflectors, libration angles, and atmospheric conditions.

Keywords: Lunar Laser Ranging, Satellite Laser Ranging, Moon, internal structure

SELENE-2/月電磁探査装置 (LEMS): インバージョンのテスト SELENE-2/Lunar ElectroMagnetic Sounder (LEMS): a test of inversion

松島 政貴^{1*}; 清水 久芳²; 藤 浩明³; 吉村 令慧⁴; 高橋 太¹; 綱川 秀夫¹; 渋谷 秀敏⁵; 松岡 彩子⁶; 小田 啓邦⁷; 小川 和律⁶; 田中 智⁶

MATSUSHIMA, Masaki^{1*}; SHIMIZU, Hisayoshi²; TOH, Hiroaki³; YOSHIMURA, Ryokei⁴; TAKAHASHI, Futoshi¹; TSUNAKAWA, Hideo¹; SHIBUYA, Hidetoshi⁵; MATSUOKA, Ayako⁶; ODA, Hirokuni⁷; OGAWA, Kazunori⁶; TANAKA, Satoshi⁶

¹ 東京工業大学, ² 東京大学地震研究所, ³ 京都大学, ⁴ 京都大学防災研究所, ⁵ 熊本大学, ⁶ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁷ 産業技術総合研究所

¹Tokyo Institute of Technology, ²ERI, University of Tokyo, ³Kyoto University, ⁴DPRI, Kyoto University, ⁵Kumamoto University, ⁶ISAS/JAXA, ⁷AIIST

Understanding of lunar origin and evolution can be advanced through investigation of the lunar interior structure. The present thermal state of the Moon can be clues to the Moon's thermal history. In the SELENE-2 mission, we propose a lunar electromagnetic sounder (LEMS) to estimate the electrical conductivity structure of the Moon, which can be used to deduce the thermal structure of the Moon.

Temporal variations in the magnetic field of lunar external origin induce eddy currents in the lunar interior depending on the electrical conductivity structure and frequencies of the temporal variations. The eddy currents, in turn, generate temporal variations in the magnetic field of lunar internal origin. Therefore electromagnetic response of the Moon is obtained from magnetic field measurements by magnetometers onboard a lunar orbiter and a lunar lander. The response function is then used to estimate the electrical conductivity structure by solving an inverse problem. Here we assume a one-dimensional structure for electrical conductivity distribution. We show some results for a test of inversion.

ペネトレータ 1 点設置による月震観測と月内部構造探査 Moonquake observation and lunar interior exploration by one penetrator station

山田 竜平^{1*}; 石原 吉明²; 小林 直樹²; 村上 英記³; 白石 浩章²; 早川 雅彦²; 田中 智²
YAMADA, Ryuhei^{1*}; ISHIHARA, Yoshiaki²; KOBAYASHI, Naoki²; MURAKAMI, Hideki³; SHIRAISHI, Hiroaki²; HAYAKAWA, Masahiko²; TANAKA, Satoshi²

¹ 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 高知大学

¹National Astronomical Observatory of Japan / RISE Project, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³Kochi University

日本の月探査計画「LUNAR-A」を通して開発されたペネトレータは人工衛星からの自由落下により天体表面に内部に搭載した観測機器を設置するシステムである。ペネトレータは複雑な着陸機構と熱制御機構を必要としないため、従来の軟着陸機と比較して小型軽量であり、天体表面に観測ネットワークを構築するのに優れたシステムである。一方、表面への衝突貫入時に強い衝撃が加わるため、ペネトレータ内部の観測機器はその衝撃に耐えて性能を維持するだけの耐衝撃性を確立する必要がある。これまでの研究では、ペネトレータ搭載用の地震計は月面貫入時に予測されるよりも高い衝撃を加えても、月震観測に必要な性能を維持できる事を示しており (Yamada et al., 2009)、またデータ送信に使用するペネトレータ-母船間の通信機能も正常に動作する事を確認できている (田中等, 2010)。

ペネトレータの耐衝撃性が確立された一方、LUNAR-A 計画の中止によりペネトレータの月表面への設置は未だ実現できていない。そこで、現在我々はイプシロンロケットを使用した次期小型探査計画において月面へのペネトレータの設置と観測の実証を行う事を計画している。小型探査計画においては、その厳しい重量制限のために従来のペネトレータシステムでは 1 本しか搭載する事ができない。そのために、我々はペネトレータ 1 点での観測においてどのような科学成果が得られるかの検討を行っている。

まず、ペネトレータ搭載用地震計では NASA の Apollo ミッションで設置した地震計により観測された深発月震、浅発月震、隕石衝突の観測が可能である。これら月震イベントの活動度をアポロ当時と比較して検証する事が重要なテーマとなる。特に隕石衝突においては、その衝突時の発光を地上望遠鏡から観測し、衝突位置を高精度で決定できれば、1 点でも月地殻厚や地殻内部構造の情報を得る事が期待できる。本発表では、これら月震イベントの検出期待個数や月震データから期待される成果について、検討した結果を報告すると共に、最良の科学成果が得られるペネトレータ 1 点設置点についても検討した結果を述べる。また、小型探査計画の後に実施が期待されるネットワーク観測に発展した場合、どれだけの科学成果が得られるようになるかも議論する予定である。

キーワード: ペネトレータ, 月震観測, 月内部構造探査, 小型衛星探査, 隕石衝突発光

Keywords: Penetrator, Moonquake Observation, Lunar Interior Exploration, Small Satellite Exploration, Meteoroid Impact Flash

「かぐや」月レーダー反射エコーの複素減衰率 On the attenuation of reflected echoes of Lunar Radar Sounder onboard Kaguya

藤 浩明^{1*}; 熊本 篤志²

TOH, Hiroaki^{1*}; KUMAMOTO, Atsushi²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 東北大学大学院理学研究科

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Graduate School of Science, Tohoku University

The successful Japanese Moon probe, KAGUYA, was equipped with a variety of state-of-the-art scientific instruments including the Lunar Radar Sounder (LRS; Ono et al., 2010). LRS is a frequency modulated continuous wave (FMCW) radar with carrier frequencies from 4 to 6 MHz, and succeeded in observing distribution of reflectors beneath almost all the Moon's surface (Ono et al., 2009). Pommerol et al. (2010) further pointed out that the presence of the reflectors in lunar maria is negatively correlated with abundance of TiO₂ because of its high electrical conductivity.

Loss tangent is defined as a ratio of the conduction to displacement current within an electric medium and hence an indicator of high electrical conductivity. If loss tangent is small enough, the permittivity and the electrical conductivity of the Moon's surface can be determined at the same time by comparing the reflected echo of LRS with its source pulse. Namely, by estimating the complex ratio of the received signal to the transmitted pulse, the dielectric constant can be known from the phase difference while the electrical conductivity can be derived by the observed amplitude attenuation and the permittivity obtained from the phase difference.

However, determination of the complex ratios is not straightforward because the reflected echoes are the product of a pulse compression technique and thus needs deconvolution to restore the true amplitude and phase of the echoes. Preliminary analysis of the LRS waveform data collected at the end of the fast down-link (21.3 Gbps) mode [Jun. - Sep. 2008] showed that quality of the data is sufficient enough to perform necessary deconvolution. This implies that LRS can also be used as a ground penetrating radar.

In this presentation, the principle and the method for estimating the permittivity and electrical conductivity are first described in addition to the data used. Interpretation of the derived complex ratios and its spatial distribution on the Moon's surface is finally discussed and summarized.

REFERENCES

Ono, T. et al., Lunar Radar Sounder Observations of Subsurface Layers Under the Nearside Maria of the Moon, *Science*, 323, 909-912 doi:10.1126/science.1165988, 2009.

Ono, T. et al., The Lunar Radar Sounder (LRS) onboard the KAGUYA (SELENE) spacecraft, *Space Sci. Rev.*, 154, 145-192, doi:10.1007/s11214-010-9673-8, 2010.

Pommerol, A. et al., Detectability of subsurface interfaces in lunar maria by the LRS/SELENE sounding radar: Influence of mineralogical composition, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L03201, doi:10.1029/2009GL041681, 2010.

キーワード: 地中レーダー, 電気伝導度, 誘電率, 送信パルス, 反射エコー, 誘電正接

Keywords: Ground penetrating radar, Electrical conductivity, Permittivity, Source pulse, Reflected echo, Loss tangent

かぐや衛星観測データに基づく雨の海の地下層の年代決定 The accumulation ages of subsurface layer in Mare Imbrium based on the SELENE observation data

石山 謙^{1*}; 熊本 篤志¹; 中村 教博¹
ISHIYAMA, Ken^{1*}; KUMAMOTO, Atsushi¹; NAKAMURA, Norihiro¹

¹ 東北大学理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku University

かぐや衛星に搭載された月レーダーサウンダー (LRS) は、主に月の海のチタン含有量が低い領域で、地下数百 m からの電磁波の反射波を観測することに成功した [Ono et al., 2009; Pommerol et al., 2010]。また、かぐや衛星に搭載された分光・地形カメラ (MI・TC) によって、月の表面組成 [e.g., Otake et al., 2012] や、月の海の溶岩の噴出年代 [e.g., Morota et al., 2011] の詳細が明らかにされている。さらに、かぐや LRS・MI・TC の各観測データを組み合わせることで、クレーターの周辺の地下構造が推定されるとともに [Oshigami et al., 2012]、誘電率の推定によって月表層の地質が隕石衝突によって多くの空隙を含む可能性が示唆された [Ishiyama et al., 2013]。本研究では、雨の海の北部における溶岩流ユニット (ユニット 12 と 8 [Bugiolacchi and Guest, 2008]) において、LRS で観測された地下層の年代推定を行った。地下層の年代決定は、溶岩の噴出時期・噴出量を明らかにし、月の火山活動の履歴を議論する上で非常に重要である。

LRS データより、ユニット 8 の地下には、3 つの地下エコーがあることが同定された。この地下エコーからは、地下の溶岩ユニットの間にレゴリス層が存在することが示唆される [e.g., Ono et al., 2009]。最も深い地下エコーは、ユニット 12 と 8 の境界と一致しているため、ユニット 12 の上にユニット 8 が堆積していることが同定された。先行研究では、ユニット 12 と 8 の表面年代は、クレーターカウンティングを用いて、双方とも 3.31 ± 0.19 Ga と推定されていた [Bugiolacchi and Guest, 2008]。しかしながら、彼らは TC の空間分解能 (10 m/pixel) よりも低い空間分解能のデータ (60~150 m/pixel) を使用しているため、表面年代推定において誤差を生じていた可能性がある。そこで、本研究では TC データを使用して、ユニット 12 の表面年代を推定したところ、 $3.58 (+0.04/-0.06)$ Ga と推定された。これは LRS データから導かれたユニット 12 と 8 の層序関係ともよい一致を示している。

また、LRS で明らかにされた地下層の層序と斜長石・鉄・チタンの含有量マップをもとに溶岩流ユニットの再識別を行った結果、ユニット 8 はさらに複数の異なる溶岩流ユニットに分割されることがわかった。講演では、クレーターカウンティングによる再識別された溶岩流ユニットの表面年代の決定、LRS で同定された地下層との対応検討の結果を示し、これらの溶岩流ユニットがかかわる火山活動の履歴について議論を行う。

月マントル深部における高Ti玄武岩マグマの存在の実験的証拠 Experimental evidence for the deep high-Ti basalt magma in the lunar mantle

五十嵐 愛子^{1*}; 鈴木 昭夫¹; 大谷 栄治¹; 朝原 友紀¹; 坂巻 竜也¹
IGARASHI, Mako^{1*}; SUZUKI, Akio¹; OHTANI, Eiji¹; ASAHARA, Yuki¹; SAKAMAKI, Tatsuya¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻

¹Division of Earth and Planetary Materials Science, School of Science, Tohoku University

The existence of high seismic attenuation zone at the depths greater than about 800 km implies that the lower mantle of the Moon could be partially molten (Nakamura et al., 1973; 1974). There is a longstanding hypothesis that the last fraction of the lunar magma ocean crystallized into a layer of dense Ti-rich cumulates at the shallow depths (~100 km) early in the lunar history. It has been suggested that the cumulates subsequently sank into the deep interior of the moon because of its gravitational instability (e.g., Ringwood and Kesson, 1976). It is necessary to investigate the melting relations of the high-Ti basalt that may be erupted from the depths at high pressure (>4 GPa). In this study, melting relations of Apollo 14 black glass (Delano, 1986), the most Ti-rich lunar ultramafic glasses, were experimentally determined at the pressure of 4 GPa and the temperature range from 1300 C to 1450 C.

The high-pressure and high-temperature experiments were performed by using 3000 ton Kawai-type multi-anvil apparatus of Tohoku University. The samples were packed into graphite capsules and the experimental temperatures were measured by using W-Re thermocouples. The compositions of run products were analyzed by using FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy). Our experiments depicted that the liquidus and solidus temperatures were determined to be 1450 C and 1325 C respectively at 4 GPa.

The liquidus phase is garnet, and the first consuming phase is ilmenite. Estimated temperature profile of the Moon at depths of 700 km -1200 km are between 1100 C and 1400 C (e.g., Gagnepain-Beyneix et al., 2006). The densities of partial melts and total melt were calculated by using the partial molar volume of the oxide components at one atmosphere (Lange and Carmichael, 1987) and the Birch-Murnaghan equation of state (Sakamaki et al., 2010). The densities of the melts formed by partial and total melting of the Apollo 14 black glass were heavier than those of the lunar deep mantle. Crystal-liquid density crossover is inevitable at the depth around 800 km, the pressure corresponding to 4 GPa. Therefore, the high-Ti basalt magma can exist stably if the lunar temperature profile is close to the upper bound of the estimated lunar temperature profile, suggesting existence of the low-velocity and low attenuation anomalies caused by chemical heterogeneities in the lunar deep mantle.

キーワード: 高圧, 月マントル, 月の高Ti玄武岩, マントルオーバーターン

Keywords: high pressure, lunar mantle, high-Ti basalt, mantle over turn

月面クレータからみた過去 10 億年の太陽系内側の天体衝突史 History of heavenly bodies collision of the solar system inside of the past one billion years studied from a lunar crater

加藤 麻美^{1*}; 諸田 智克¹

KATO, Mami^{1*}; MOROTA, Tomokatsu¹

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻

¹ Nagoya University Graduate School of Environmental Studies

月は過去 40 億年の天体衝突の記録をクレータとして保存しており、それは太陽系小天体の衝突・軌道進化を読み解く上で重要な情報源である。天体衝突史の理解は、アポロやルナの岩石試料の放射年代とクレータ数密度の関係から得られているが、アポロの岩石試料は 39 億年～31 億年に集中しているため、過去 30 億年間の天体衝突史の歴史はよくわかっていない。一方で、月の光条クレータの統計研究や月試料中の衝突ガラスの研究、地球クレータの統計研究などから、ここ数億年にクレータ生成率が上昇したという仮説が提案されている。

月面クレータ記録から天体衝突史を解明する手段として個々のクレータの形成年代を決定することは非常に有効である。天体衝突によってクレータが形成される際に、放出物の堆積によってその付近の地形がリセットされ、その後、時間がたつにつれ、クレータ放出物上により小さいクレータが蓄積する。クレータの相対年代はその後に出来た小クレータの個数密度から決定することが可能である。

近年の月探査の成功により高解像度の画像データによる月面の詳細画像が蓄積され個々のクレータの精度の高い年代決定が可能となった。そこで、本研究では、月周回衛星「かぐや」データを用いて、光条クレータを対象にクレータ年代学によって形成年代を求めることで、過去 10 億年間のクレータ形成頻度の時間変化について議論する。

キーワード: 月, クレータ, クレータ年代学

Keywords: Moon, crater, cratering chronology

月の線状重力異常の形成過程と熱進化 Formation process of linear gravity anomalies and thermal evolution of the Moon

澤田 なつ季^{1*}; 諸田 智克¹; 石原 吉明²; 平松 良浩³

SAWADA, Natsuki^{1*}; MOROTA, Tomokatsu¹; ISHIHARA, Yoshiaki²; HIRAMATSU, Yoshihiro³

¹ 名古屋大学環境研究科地球環境科学専攻, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 金沢大学自然科学研究科

¹Graduate School of the Environmental studies, Nagoya University, ²JAXA, ³Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University

1. はじめに

重力分布による月内部の密度構造の解明は月の初期進化過程を理解するための一つの手段である。Andrew-Hanna et al. (2013) は GRAIL の重力データを解析し、大規模な線状の重力異常を複数発見した。彼らはこの線状の重力異常の成因を月の初期における全球規模の膨張とマグマの貫入によるものと推定している。そのような大規模なマグマ貫入イベントは重力データ以外にもその痕跡を残すことが期待される。本研究の目的は、地形データと FeO 濃度分布を用いて線状重力異常に対応する地形的特徴の存在とマグマ貫入由来の痕跡を調査し、月の線状重力異常の形成過程を検討することである。

2. 解析データと手法

対象箇所は Andrew-Hanna et al. (2013) で同定された 20 の線状重力異常である。使用するデータは LOLA の 1/1024° の月面地形グリッドデータと Clementina の 10pix/° の月面 FeO 濃度分布図である。地形データの解析では、線状重力異常を中心に 300km 以内の領域を切り出し、フィルター処理により小規模なクレーターによる地形の起伏を除去する。線状重力異常に対して垂直な側線毎に線状重力異常上の標高を基準として相対評価した平均標高・標準偏差・平均勾配を計算し、地形断面図を作成した。「線状重力異常付近」を±50km 以内の領域とし、「周辺領域」を 100km 以上離れた領域と設定した。作成した地形断面図を用いて、「線状重力異常付近」と「周辺領域」の地形との比較により、線状重力異常領域の地形学的形態分類、谷地形、山地形、未区分地形の分類、を行った。FeO 濃度分布の解析では、FeO 濃度分布を用いて「線状重力異常付近」の平均 FeO 濃度と標準偏差を計算した。

3. 結果

地形データの解析から、線状重力異常の分布は谷地形とよく対応することが明らかになった。このことから、線状重力異常域は月形成初期における引張応力場による地溝的領域に形成されたと推測される。

FeO 濃度分布を解析した結果、高地に存在する「線状重力異常付近」の平均 FeO 濃度は 6.72 ± 1.62 [wt%] となり、月の高地試料 (<6[wt%]) と比較して高いことが明らかとなった。これはクレーター掘削による貫入岩の露出の可能性を示唆する。

4. 考察と結論

上記の観測事実と Head and Wilson (1992) の熱史から線状重力異常の原因である線状構造の形成過程について以下の仮説を提唱する。月の初期は熱膨張過程のため引張応力状態であった。~4.0Ga に引張応力場により亀裂が生じた後に、マグマが貫入したことで線状構造が作られたと考えられる。4.0~3.0Ga に海を形成したマグマ活動によって線状構造が隠された。その後の月全球の冷却に伴う圧縮応力場、または衝突盆地固有の圧縮応力場により、3.8~3.0Ga に海でリッジが形成された。リッジを形成する際に線状構造付近で生じた亀裂を利用したと推測される。

キーワード: マグマ貫入イベント, 熱膨張, リッジ, FeO 濃度, 月面地形データ

Keywords: magmatism intrusions event, expansion, ridge, FeO concentration, Lunar topography data

プリズムモデルによる月磁気異常磁化ソースの推定 Source of the lunar magnetic anomalies estimated with the prism model

横山 貴史^{1*}; 高橋 太¹; 綱川 秀夫¹
YOKOYAMA, Takashi^{1*}; TAKAHASHI, Futoshi¹; TSUNAKAWA, Hideo¹

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

月は現在グローバルな固有磁場を持たないが、アポロ計画以降、磁力計や電子反射計の観測により月には磁気異常が多数存在することが知られている。これは地殻の岩石が持つ残留磁化によるものである。しかし、その獲得メカニズム、記録している磁場、すなわち磁気異常の起源には諸説ありまだ明らかになっていない。主に考えられている起源としては、Hood et al. (2001)、Hood et al. (2013) などは、Reiner Gamma、Rima Sirsalis 磁気異常などの巨大衝突盆地から放射状に分布・伸長するように見える磁気異常のソースとして、インパクトで飛散した ejecta の堆積物を示唆している。この場合、磁気異常ソースは表面付近に分布していると考えられる。また、Purucker et al. (2012) は、South-Pole Aitken 盆地北西部の WNW-ESE に伸長する磁気異常群のソースとして岩脈を考え、幅約 30km の 2 次元板状モデルで磁気異常を説明している。岩脈モデルの場合、水平方向に細長く鉛直方向に深い磁気異常ソースとなる。このように月の磁気異常は月地殻の形成・進化の情報も含み、磁気異常ソースの深さ分布や形状、磁化の情報を得ることは非常に重要である。ソースモデルとして、Hemingway&Garrick-Bethell (2012) や Nicholas et al. (2007) は、dipole をつかって磁気異常をモデル化している。また、また、Hood (2011) や Richmond et al. (2003) では、月表面に置いた円盤ソースで磁気異常をモデル化している。しかし、これらのモデルではソースの形状や深さ分布に関して有意に情報を得られない。そこで本研究では、磁気異常ソースとして一様に磁化したプリズムを仮定し、位置・サイズ・磁化ベクトルだけでなく上面・下面の深さもパラメータとして取り扱い、表面のソース、地殻内部のソースも可能なモデル化を行った。

これまでにモデル解析を行った地域は、衝突盆地内で観測される磁気異常として Crisium、Mendel-Rydberg の 2 箇所、衝突盆地との関連が見られない独立した磁気異常として Reiner Gamma、Rima Sirsalis、Descartes、Airy、Abel の 5 箇所である。解析には Lunar Prospector と Kaguya の磁力計による低高度観測データ（磁気圏内観測、Wake 側観測）を使用した。磁気異常ソースとして一様に磁化した鉛直方向の直方体を仮定し、中心点の緯度・経度、水平方向の縦横サイズ、上面・下面の深さ、磁化の大きさ・方位をパラメータとした。Dipole モデルの結果を参考に初期値を決め、反復的にパラメータ値を変化させる反復法として解き、モデル磁場と観測磁場との差が収束するパラメータ解を求めた。これを反復的に変化させフォワード法として解き、モデル磁場と観測磁場との一致が良くなるようにパラメータ解を求めた。収束解を得たのち、磁気異常ソースの個数を変え、最適数を赤池情報量基準 (AIC) を用いて選択した。

現時点での解析結果から、ほとんどのソースモデルに共通する特徴として以下の 3 つが挙げられる。(1) 上面深度は表面～数 km であり、下面深度は数 km～20km 程度となった。(2) 水平方向のサイズとして、縦横比が 2 以上の細長い形状となり、幅は数 km のものが多い。(3) 磁化強度は 1 A/m を超え、月リターンサンプルの磁化強度より一桁以上大きくなった。下面深度の結果から、今回解析した磁気異常ソースとして、月地殻内部の物質を考えるモデルの方が ejecta モデルよりも妥当と考えられる。一方、一部のソース形状の水平伸長方向は Imbrium 盆地から放射状になっているとも解釈でき、巨大盆地形成と関連する可能性もありうる (Hood et al., 2001)。

今後、複雑な磁気異常地域の解析が進め、様々な磁気異常ソースの特徴を把握することで、磁気異常生成メカニズムにとって重要な情報を得られると期待される。さらに、磁気異常ソースの位置と高アルベド地域 (swirl) 分布との関係についても検討する予定である。

キーワード: 月, 磁気異常, プリズムソースモデル, スワール
Keywords: moon, magnetic anomaly, prism source model, swirl

階段状磁場変化に対する月の電磁応答 Lunar Electromagnetic responses to the stepwise changes in the IMF

比嘉 哲也^{1*}; 吉村 令慧²; 大志万 直人²; 清水 久芳³; 松島 政貴⁴; 高橋 太⁴; 渋谷 秀敏⁵; 綱川 秀夫⁴
HIGA, Tetsuya^{1*}; YOSHIMURA, Ryokei²; OSHIMAN, Naoto²; SHIMIZU, Hisayoshi³; MATSUSHIMA, Masaki⁴; TAKA-
HASHI, Futoshi⁴; SHIBUYA, Hidetoshi⁵; TSUNAKAWA, Hideo⁴

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 京都大学防災研究所, ³ 東京大学地震研究所, ⁴ 東京工業大学大学院理工学研究科, ⁵ 熊本大学理学部

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Disaster Prevention Research Institute, ³Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ⁴Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ⁵Department of Earth and Environmental Sciences, Kumamoto University

月の起源・進化に対する理解を深める上で、月の電気伝導度構造（内部構造）を明らかにすることは必要不可欠である。かぐや衛星の磁場観測装置 LMAG で取得された磁場データに関して、2007 年 12 月 21 日から 2008 年 10 月 31 日の期間（衛星高度 100 km）のデータを用いて、電気伝導度の推定を行っている。月において電磁誘導現象が発生した場合、電磁誘導のソースとなる磁場変化と、月の電磁誘導による二次磁場の和として磁場変化が観測されていることが期待され、定点観測である Apollo12 号ではそのような事例が報告されている（例えば Dyal and Parkin, 1971）。本研究では、月の遠方太陽側に位置する ACE 衛星もしくは WIND 衛星で観測された階段状の惑星間空間磁場変化に着目し、月への到来時刻に対応する時間帯の LMAG データにも、前述の電磁誘導現象と考えられる記録を確認した。

上記のかぐやにおける観測事例に対して、月を一様導体球と仮定して電気伝導度を求める Dyal and Parkin (1971) の手法を適用すると、階段状磁場変化の主たる成分に対する電磁応答が再現でき、一様導体球とみなした月の電気伝導度は、 $1 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ S/m と推定された。他方 LMAG データには、入力磁場の微小成分に対して、モデル計算からは予測されない信号が含まれていることが明らかになった。Apollo、Lunar Prospector のデータについても精査した結果、このような信号は、階段状磁場変化到来時に共通するものであるとわかった。本発表では、かぐや、Apollo、Lunar Prospector の磁場データを用いた電気伝導度のモデル計算の結果と、新たに判明した特異な信号について報告する予定である。

キーワード: 月, かぐや, LMAG, 電磁誘導, 電気伝導度

Keywords: Moon, KAGUYA, SELENE, LMAG, induction, conductivity

Plasma observations above strong lunar crustal fields in the solar-wind wake Plasma observations above strong lunar crustal fields in the solar-wind wake

NISHINO, Masaki n^{1*}; SAITO, Yoshifumi²; TSUNAKAWA, Hideo³; TAKAHASHI, Futoshi³; YOKOTA, Shoichiro²; MATSUSHIMA, Masaki³; SHIBUYA, Hidetoshi⁴; SHIMIZU, Hisayoshi⁵; FUJIMOTO, Masaki²
NISHINO, Masaki n^{1*}; SAITO, Yoshifumi²; TSUNAKAWA, Hideo³; TAKAHASHI, Futoshi³; YOKOTA, Shoichiro²; MATSUSHIMA, Masaki³; SHIBUYA, Hidetoshi⁴; SHIMIZU, Hisayoshi⁵; FUJIMOTO, Masaki²

¹Nagoya University, ²ISAS/JAXA, ³Tokyo TECH, ⁴Kumamoto University, ⁵Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

¹Nagoya University, ²ISAS/JAXA, ³Tokyo TECH, ⁴Kumamoto University, ⁵Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

Plasma signature around crustal magnetic fields is one of the most important topics of the lunar plasma sciences. Although recent spacecraft measurements are revealing solar-wind interaction with the lunar crustal fields on the dayside, plasma signatures around crustal fields on the night side have not been fully studied yet. Here we show evidence of plasma trapping on the closed field lines of the lunar crustal fields in the solar-wind wake, using SELENE (KAGUYA) plasma and magnetic field data at 15 km altitude. In contrast to expectation on plasma cavity formation at the strong crustal fields, electron flux is enhanced above one of the strongest crustal fields, Crisium Antipode (CA), where the magnetic field along the spacecraft orbit is as strong as 80 nT. The enhanced electron fluxes above CA are characterized by bidirectional beams in the lower energy range (typically lower than 100 eV), which shows that these electrons are trapped on the closed field lines of the crustal magnetic fields, although a possibility of opened field configuration with cusps is not totally excluded. The observed electrons on the closed field lines may come from the lunar night side surface, while the mechanism of electron supply onto the closed field line remains to be solved.

キーワード: Lunar crustal field, Lunar plasma environment, Lunar wake, SELENE (KAGUYA)

Keywords: Lunar crustal field, Lunar plasma environment, Lunar wake, SELENE (KAGUYA)

A long-term all-sky imager observation of lunar sodium tail A long-term all-sky imager observation of lunar sodium tail

NISHINO, Masaki n^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; OTSUKA, Yuichi¹
NISHINO, Masaki n^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; OTSUKA, Yuichi¹

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

The Moon possesses long tail of neutral sodium atoms that are emitted from the lunar surface and transported anti-sunward by the solar radiation pressure. Since the earth crosses the lunar sodium tail for a few days around the new moon, the resonant light emission from sodium atoms can be detected from the ground. Although it has been reported that bright emissions from sodium atoms of the tail is observed during the Leonids meteor shower, only few events without meteor shower have been investigated so far. Here we show a long-term (over 15 years) observation of the lunar sodium tail using all-sky imager at Shigaraki Observatory (35N, 136E), Japan. We have surveyed our database of all-sky sodium images at a wavelength of 589.3 nm to find that a bright spot emerges around the anti-lunar point for a few days around the new moon. Although the sodium spot is the brightest during the Leonids meteor shower, a weaker sodium spot is detected in the period without meteor shower as well. The sodium spot gradually moves eastward (roughly, 0.2 hours a day), which shows that the sodium tail is strongly affected by the earth's gravity. We will present the latest results of our data analysis to discuss signatures of the lunar sodium tail as well as the origin of the lunar sodium exosphere.

キーワード: Lunar sodium tail, Lunar exosphere, All-sky imager observation

Keywords: Lunar sodium tail, Lunar exosphere, All-sky imager observation

プレソーラーアルミナ粒子の内部構造分析による形成・変成履歴の推定 Crystal structure, morphology, and isotopic compositions of presolar alumina grains in unequibrated ordinary chondrites

瀧川 晶^{1*}; ストラウド ロンダ²; ニトラー ラリー³; ヴィセンジ エドワード⁴

TAKIGAWA, Aki^{1*}; STROUD, Rhonda M.²; NITTLER, Larry, R.³; VICENZI, Edward, P.⁴

¹ 京都大学 地球惑星科学専攻 地質学鉱物学教室, ² アメリカ海軍研究所, ³ カーネギー研究所, ⁴ スミソニアン研究所, ⁵ アメリカ国立標準技術研究所

¹Department of Geology and Mineralogy, Kyoto University, ²The U.S. Naval Research Laboratory, ³Carnegie Institution of Washington, ⁴Smithsonian Institution, ⁵National Institute of Standards and Technology

Corundum, the thermodynamically stable phase of Al_2O_3 , is predicted to be the most abundant refractory dust species condensed in envelopes around oxygen-rich asymptotic giant branch (AGB) stars. Many presolar Al_2O_3 grains, which are the survival circumstellar dust grains, have been identified from acid-residues of chondrites. The grain morphology and crystal structure of presolar grains may reflect condensation conditions in circumstellar envelopes of AGB stars and processing in the interstellar medium (ISM) and protosolar disk.

Using scanning electron microscopy (SEM) we obtained detailed secondary electron images, energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS), electron backscattered diffraction (EBSD) patterns, and cathodoluminescence (CL) spectra of each Al_2O_3 grain prior to isotopic measurements. Focused ion beam (FIB) lift-out sections were made from the identified presolar grains and the interior structures were observed with a transmission electron microscope (TEM).

The Al_2O_3 grains were identified from acid residues of QUE97008 (LL3.05) by EDS and observed in detail by field emission (FE) SEM at the Carnegie Institution of Washington (CIW). Previously identified alumina grains from Semarkona (LL3.0), Roosevelt County 075 (H3.1), and Bishunpur (LL3.15) were also used in this study. CL spectra were obtained with a FE-SEM equipped with a Gatan Mono CL4 system at NIST. EBSD analysis was performed with an FEI Nova 600 FIB-SEM equipped with an HKL EBSD system at the Naval Research Laboratory (NRL). Isotope measurements were performed with the Cameca NanoSIMS 50L ion-microprobe at CIW. Oxygen isotopes of 163 grains were measured using ~ 100 nm Cs^+ beam rastered over each of the grains. An O^- beam was used to measure the Mg-Al isotopic compositions of the presolar and some solar Al_2O_3 grains. Ultra-thin sections of presolar grains QUE053, 060, and 067 were prepared with the NRL FIB-SEM. TEM studies were carried out at NRL with a JEOL 2200FS field-emission scanning transmission electron microscope (STEM).

Eight presolar grains from QUE97008 and one from RC 075 were newly found. Grain QUE060 is classified into Group 2 and has a subhedral shape with clear flat facets. The surface is smooth except for a face with a cavity. TEM diffraction patterns of the FIB section indicated that the grain consists of multiple corundum crystallites. Dark-field TEM image showed large (>100 nm) and small (<30 nm) scale orientation variation. The large-scale misorientation observed on the right side of the grain seems to relate to the cavity. Small-scale distortions occur uniformly within the grain. EDS spectra showed that the Mg/Al ratio of QUE060 is ~ 0.01 , and the NanoSIMS measurement revealed this high Mg content to be essentially pure radiogenic ^{26}Mg , with inferred initial $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} \sim 0.01$, similar to other Group 2 grains.

QUE067 is a thin Group 4 grain with very irregular morphology. Its $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$ ratio was three times lower than in QUE060, but its inferred $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ratio was similar. No EBSD patterns of crystals were obtained from the grain surface but TEM observation on the FIB section showed that the interior of QUE067 was corundum, not amorphous.

The subhedral shape and smooth surface of QUE060 suggest that this grain was likely single crystalline corundum when it condensed in a circumstellar envelope of a low-mass AGB star, and that the polycrystalline nature, voids and distorted crystal structure inside the grain are secondary features.

A possible process to form large-scale misorientation and the cavity is grain-grain collisions in a SN shock in the ISM. A high velocity collision creates a shockwave propagating inside the grain, finally forming a crater. Small-scaled distortions may have also formed by collisions with small particles in the ISM. Such collisions are less destructive than with larger grains, but their probability is high. Ion bombardment in the ISM may also contribute to the small-scale distortions.

キーワード: ダスト, 初期太陽系, コンドライト, プレソーラー粒子, 透過型電子顕微鏡, 晩期型巨星

Keywords: dust, early solar system, chondrite, presolar grain, transmission electron microscopy, evolved star

電子線トモグラフィ法による GEMS の 3次元構造の観察 3-D observation of GEMS by electron tomography

松野 淳也^{1*}; 三宅 亮¹; 土山 明¹; 中村 圭子²; メッセンジャー スコット²

MATSUNO, Junya^{1*}; MIYAKE, Akira¹; TSUCHIYAMA, Akira¹; NAKAMURA-MESSENGER, Keiko²; MESSENGER, Scott²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ²NASA ジョンソンスペースセンター

¹Dep. of Geology and Mineralogy, Kyoto Univ., ²NASA Johnson Space Center

彗星起源と考えられる無水惑星間塵 (CP-IDPs) には GEMS (Glass with Embedded Metal and Sulfides) と呼ばれる微小(数 100 nm) 粒子が多量に含まれている。GEMS は非晶質珪酸塩中に複数の Fe-Ni 金属、硫化物ナノ包有物 (10-50 nm) を有しており、太陽系の最も始原的な物質の一つと考えられている。また GEMS は、その赤外スペクトルの特徴が星間塵や星周塵のものとよく合致するサブミクロンサイズのダストであることから、いわゆる”astronomical silicate” の候補物質でもある [1]。このように惑星物質学上も天文学上も注目されている物質であるが、どこでどのように GEMS が生まれたのかは議論中である [2-5]。

Bradley らは、GEMS は原始太陽系円盤での様々な変成を免れた星間塵であり、結晶が宇宙線などの照射により非晶質化して形成したと主張している [2,4]。その根拠の一つとして透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた観察結果で、GEMS の中に 10nm 程度の relict grain と呼ばれる結晶が存在しその外形が GEMS そのものの外形と仮晶関係にある、というのがある [2]。しかし、そもそも relict grain がこの報告以外では観察されないこと [3] や、2次元の観察での外形評価は不定性が大きいことなどの疑問も残っている。

一方 Keller と Messenger は、GEMS は高温ガスの凝縮物であるというモデルを提案している [3,5]。ほとんどの GEMS に酸素同位体異常がみられない、元素存在度が粒子毎にばらつきが大きい、粒子表面にのみ硫化鉄が存在するという観察事実に基づき、GEMS は原始惑星円盤において高温ガスから金属鉄を含む非晶質珪酸塩が凝縮し、冷却するにつれて凝縮粒子表面の金属鉄が硫化したことにより形成した、と説明している。しかしこのグループの観察においても TEM による 2次元像観察を行なうため、真に硫化鉄が GEMS 表面のみに存在しているのか証明できていない。

GEMS の形成起源を明らかにするため、本研究では、これまで 2次元での観察に留まっていた GEMS の組織観察を、TEM を用いた電子線トモグラフィにより 3次元で行なうことを試みた。これにより、3次元構造が得られるだけでなく、従来の 2次元観察では試料の厚み (>50 nm) により制限を受けていた空間分解能が、透過像の画素サイズの数倍程度まで上げることが可能であり、nm オーダーでの不均一性をもつ GEMS のようなサンプルにとって極めて有効な観察手段である。観察には cluster CP-IDPs である、L2036AA5 cluster4, L2009O8 cluster13, W7262A2 の 3 試料を用いた。このうち W7262A2 はポリウレタンを用いて捕獲した IDP であり、従来の捕獲法で使用されるシリコンオイルによる汚染を受けないという特徴をもつ試料である [6]。

IDP 試料を樹脂に埋めミクロトームにより超薄切片を作成した。GEMS の平均粒径が約 180 nm であるため、切片厚みは 50-300 nm とした。電子線トモグラフィは京都大学の TEM (JEM-2100F, JEOL) を用いて行い、約 ± 65° 回転させながら 1° おきを取得した透過像を再構成し一連の断層像を得た。なお透過像は、明視野透過顕微鏡法 (BF-TEM)、高角散乱環状暗視野走査透過顕微鏡法 (HAADF-STEM) 法により取得した。

断層像中に含まれる鉱物相の推定を、STEM-EDS (エネルギー分散型 X 線分析法) で取得した 2次元元素分布像と比較することにより行なった結果、金属鉄は珪酸塩に含まれる事、硫化鉄は主に GEMS の表面に存在する事を確認した。このことは GEMS が凝縮物であることを示唆するモデル [3,5] と調和的な結果だが、今後サンプル数を増やして統計的に検討する必要がある。なお電子線トモグラフィを惑星間塵へ応用し断層像の再構成に成功したのは、今回の研究が世界初である。このことは今後の惑星物質科学の分析的研究上も意義深いといえる。

[1] Bradley et al. (1999) Science, 285, 1716

[2] Bradley and Dai (2004) ApJ, 617, 650

[3] Keller and Messenger (2011) GCA, 75, 5336

[4] Bradley (2013) GCA, 107, 336

[5] Keller and Messenger (2013) GCA, 107, 341

[6] Messenger et al. (2012) 43rd LPSC, 2696 (abstr.)?

キーワード: 惑星間塵, GEMS, 透過型電子顕微鏡, トモグラフィ

Keywords: IDP, GEMS, TEM, tomography

新たに開発した手法によるコンドリュールメルトへのシリカに富むガスの凝縮実験：
急速な低Ca輝石の析出
Condensation experiments of Si-rich gas into the chondrule melt for rapid low-Ca pyroxene formation using a new furnace

今榮 直也^{1*}; 磯部 博志²
IMAE, Naoya^{1*}; ISOBE, Hiroshi²

¹ 情報・システム研究機構 国立極地研究所, ² 熊本大学
¹National Institute of Polar Research, ²Kumamoto University

はじめに

低Ca輝石(主としてエンスタタイト)とその多形は、太陽系岩石圏を構成する最も主要な相である。原始太陽系星雲における低Ca輝石の形成機構には不明な点が多い。低Ca輝石は、その凝縮過程でMg珪酸塩として先に晶出するフォルステライトとは反応関係にあり、フォルステライトとシリカに富むガスとの反応によりエンスタタイトが包晶反応として形成することが熱力学計算により予測されている(Grossman, 1972)。しかし、その反応は生成層(エンスタタイト)中の固体内拡散が律速するために遅く、最大分別凝縮で近似でき、また、ガスから直接するエンスタタイトは微量である(Imae et al., 1993)。Tissandier et al. (2002)によりコンドリュールメルトへシリカに富むガスが相互作用してピジョン輝石(CaO 5-7wt%)が析出することを実験的に示した。本実験的研究では、原始太陽系星雲環境を再現する新たな実験法を開発し、この装置を用いて短時間で多量の低Ca輝石(CaO 1wt%)を析出させることに成功したので報告する。

実験

全圧は水素ガス導入下で主として100Paに設定し、排気系にバタフライバルブを用い、隔膜真空系を用いて制御した。各実験の最高温度は輝石の安定な1200-1450°Cとし、冷却速度は主として約100°C/hとした。実験出発物質としてAllende隕石(CV3)の小片(1回の実験に~30-50mg)を用いた。上部に1mmの穴の開いたアルミナのるつぼ内には出発物質とシリカガス源としてシリカの粉末を試料と直接触れないように入れた。また対照実験としてシリカ粉末のない条件でも行った。

結果

シリカ粉末のない条件では微量の輝石が認められることがあるが、かんらん石が支配的に析出した。一方、シリカに富むガスのある条件では、顕著な変化が認められた。すなわち、熔融したAllende試料の1450°Cでは試料全体が低Ca輝石に変化しており、かんらん石をポイキリティックに取り囲んで成長していた。一方、1350°Cおよび1250°Cと最高到達温度がより低温になるにつれ晶出するかんらん石および輝石は鉄成分に富み、縁に主として低Ca輝石がより多く析出した。

議論

出発物質へのシリカに富むガスの衝突頻度は大規模なバルクの組成変化を引き起こすほど高くない。シリカに富むガス源が存在しない実験温度条件は、輝石の安定温度域であるので、準安定に存在したかんらん石がメルトと共存していたことを示唆する。シリカに富むガス源がある実験では、シリカに富むガスが輝石の析出を助けたと考えられる。

文献

Grossman L. (1972) GCA 36, 597.
Imae N., et al. (1993) EPSL 118, 21.
Tissandier L., et al. (2002) MAPS 37, 1377.

キーワード: 原始太陽系星雲, 凝縮, 低Ca輝石, シリカに富むガス, 低圧実験, コンドリュール

Keywords: primordial solar nebula, condensation, low-Ca pyroxene, Si-rich gas, low-pressure experiments, chondrule

原始惑星系円盤におけるアモルファスフォルステライト粒子表面での含水鉱物形成 Hydration of amorphous forsterite grains in protoplanetary disks

山本 大貴^{1*}; 黒田 みなみ¹; 橘 省吾²
YAMAMOTO, Daiki^{1*}; KURODA, Minami¹; TACHIBANA, Shogo²

¹ 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻, ² 北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門

¹Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, ²Department of Natural History Sciences, Hokkaido University

Hydrous silicate dust can be thermodynamically stable at low temperatures ($\sim 200\text{K}$) in protoplanetary disks with the solar-system abundance of elements. Theoretical and experimental investigation (Fegley and Prinn, 1989; Imae et al., 1999) have shown that the hydration reaction between crystalline Mg-silicates and water vapor is too sluggish to occur during a lifetime of protoplanetary disks. However, infrared spectroscopic observation and investigation of extraterrestrial materials have shown that both crystalline and amorphous Mg-silicates may be present in protoplanetary disks and in the protosolar disk. Amorphous silicates are thermodynamically unstable, and thus could be hydrated more rapidly at higher temperatures than crystalline silicates (Nagahara and Ozawa, 2011). If hydration of amorphous silicates occurs within a disk lifetime, hydrated dust could be a source of water to terrestrial planets.

In this study, in order to investigate hydration of amorphous Mg-silicates, we conducted closed-system reaction experiments of amorphous forsterite and water vapor in sealed glass tubes at temperatures of 1023-423K and $P_{\text{H}_2\text{O}}$ of 0.05 -50 bar for 2-1344 hours. Run products were analyzed with FT-IR and XRD. We found that samples reacted at temperatures below 723K and $P_{\text{H}_2\text{O}}$ of 5-50 bar showed sharp $3\mu\text{m}$ absorption features, clearly suggesting the formation of hydrous phase(s). XRD analyses of some run products showed that the hydrous phase was serpentine. Because the stable temperature of hydrous phase(s) at $P_{\text{H}_2\text{O}}$ of 5-50 bar is $\sim 523\text{K}$, the present results indicate that hydrous Mg-silicates can be formed metastably from amorphous forsterite at higher temperatures than the thermodynamic prediction. Moreover, hydration of amorphous forsterite occurred after 2-hour heating at 623K and $P_{\text{H}_2\text{O}}$ of 5 and 50 bar, implying that the activation energy for hydration of amorphous forsterite is much smaller than that for crystalline forsterite.

Hydration reaction seems to have little $P_{\text{H}_2\text{O}}$ dependence at $P_{\text{H}_2\text{O}}$ of 5-50 bar, indicating that hydration is controlled by a reaction between amorphous forsterite with saturated adsorbing water molecules. No hydration occurred, however, at 523K and $P_{\text{H}_2\text{O}} < 1$ bar, which could be due to less effective adsorption of water molecules at low-pressure conditions.

キーワード: 原始惑星系円盤, マグネシウムケイ酸塩, 結晶質, 非晶質, フォルステライト, 含水鉱物
Keywords: protoplanetary disk, Mg-silicate, crystalline, amorphous, forsterite, hydrous mineral

鉄ダストの均質核生成時の付着確率 Sticking probability for homogeneous nucleation of iron dust

木村 勇氣^{1*}; 田中 今日子²; 稲富 裕光³; 竹内 伸介³; 塚本 勝男¹
KIMURA, Yuki^{1*}; TANAKA, Kyoko²; INATOMI, Yuko³; TAKEUCHI, Shinsuke³; TSUKAMOTO, Katsuo¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ² 北海道大学低温科学研究所, ³ 宇宙航空研究開発機構
¹Tohoku University, ²Hokkaido University, ³ISAS/JAXA

Nucleation theories have been used to understand the condensation sequence, number density and size of cosmic dust in a gas outflow of dying stars or a gas plume after shock wave heating in the primitive solar nebula. However, it has been well known that nucleation rates obtained by nucleation theories and by experiments have a large difference. We believe that the reason is uncertainties of the physical parameters of nanometer sized particles. Therefore, it is still not successful to explain the characters of cosmic dust by a nucleation theory. To determine the physical parameters of nanoparticles and evaluate nucleation theories, we constructed an in-situ observation system of temperature and concentration during homogeneous nucleation in vapor phase using interferometry for both of ground based and microgravity experiments.

Nanoparticles are formed from a supercooled vapor after evaporation by electrical heating in a controlled gas atmosphere. Using the new system in lab, we succeeded to determine surface free energy and sticking probability of manganese nanoparticle from timescale for gas cooling and condensation temperature based on nucleation theories [1]. In this laboratory experiment, convection of gas atmosphere caused by thermal heating generates heterogeneity of nucleation environment, such as temperature and concentration profiles around evaporation source. If same kinds of experiments are performed in microgravity, evaporated vapor defuses uniformly and the temperature profile becomes concentric around the evaporation source. As the result, nucleation will occur at concentric position. Then, we can obtain physical properties with relatively smaller error bars and then we may be able to evaluate nucleation theories more precisely. Therefore, we also performed a microgravity experiments using an aircraft and the sounding rocket S-520-28 launched on December 17th, 2012.

We prepared specially designed Mach-Zehnder-type interferometers with an evaporation chamber and camera recording systems to fit the space and weight limitations of the rocket. Three systems, named DUST 1 to 3, with same configuration except evaporation source and gas pressure in the chamber were installed into the nosecone of the rocket. The evaporation source and gas atmosphere were tungsten and gas mixture of oxygen (4000 Pa) and argon (36000 Pa) for DUST 1, iron and argon (20000 Pa) for DUST 2, and iron and argon (40000 Pa) for DUST 3. The experiments were run sequentially and automatically started from 100 s after launch of the rocket. The evaporation source of iron was electrically heated under microgravity. Evaporated iron vapor was diffused, cooled and condensed in the gas atmosphere. The temperature and concentration at the nucleation site are determined from the movement of the fringe in the interferogram. Here, we will show the results of the homogeneous nucleation and determine the sticking probability of iron atoms into a nanoparticle based on nucleation theories. The results will be compared with that by ground based experiment.

[1] Y. Kimura, K. K. Tanaka, H. Miura, K. Tsukamoto, Direct observation of the homogeneous nucleation of manganese in the vapor phase and determination of surface free energy and sticking coefficient, *Crystal Growth & Design*, **12** (2012) 3278-3284.

キーワード: 核生成, 観測ロケット, 干渉計, その場観察, ダスト

Keywords: Nucleation, Sounding Rocket, Interferometer, In-situ Observation, Cosmic Dust

イオン誘起微粒子核生成I：装置開発とねらい Ion-Induce nucleation experiment I: development of a new apparatus

渡部 直樹^{1*}; 日高 宏¹; 中井 陽一²; 小島 隆夫³
WATANABE, Naoki^{1*}; HIDAKA, Hiroshi¹; NAKAI, Yoichi²; KOJIMA, Takao³

¹ 北大 低温研, ² 理研 仁科センター, ³ 理研 原子物理研

¹Institute of Low temperature Science, Hokkaido University, ²Nishina Center, RIKEN, ³Atomic Physics Laboratory, RIKEN

Mechanisms of grain nucleation have attracted researchers in various fields of science in connection with e.g. atmospheric aerosols and cosmic dust grains. Although there have been many theoretical and experimental works approaching this issue, the details of nucleation mechanism is still in debate. Most of works are performed assuming homogeneous nucleation in gas phase or heterogeneous nucleation on the bulk surfaces. The homogeneous nucleation often suffers from a "critical size" of particle and requires high supersaturation condition to gain the efficient formation rate, while the nucleation on the bulk surface may not be relevant to the first stage of grain formation in realistic environments. It is known that ion-induced heterogeneous nucleation would play an important role in the particle formation because in this mechanism ion-neutral interaction overcomes difficulties expected in neutral-gas-phase homogeneous nucleation. We recently developed a new experimental apparatus to investigate the elementary process of the ion-induced nucleation. We present the importance of ion-induced nucleation and advantages of the newly developed apparatus. Using this apparatus, we have been successful in obtaining an important physical parameter, free energy, of water cluster ions.

キーワード: 微粒子, 核生成, クラスターイオン

Keywords: cluster ion, ion-induced nucleation

すばる望遠鏡によるアイソン彗星の中間赤外線観測 Mid-infrared Observation of sungrazing comet C/2012 S1 (ISON) with Subaru+COMCIS

大坪 貴文^{1*}; 白井 文彦²; 瀧田 怜³; 渡部 潤一⁴; 河北 秀世⁵; 古荘 玲子⁶; 本田 充彦⁷

OOTSUBO, Takafumi^{1*}; USUI, Fumihiko²; TAKITA, Satoshi³; WATANABE, Jun-ichi⁴; KAWAKITA, Hideyo⁵; FURUSHO, Reiko⁶; HONDA, Mitsuhiko⁷

¹ 東北大学, ² 東京大学, ³ 宇宙科学研究所, ⁴ 国立天文台, ⁵ 京都産業大学, ⁶ 都留文科大学, ⁷ 神奈川大学

¹Tohoku University, ²University of Tokyo, ³ISAS/JAXA, ⁴NAOJ, ⁵Kyoto Sangyo University, ⁶Tsuru University, ⁷Kanagawa University

Comets are the frozen reservoirs of the early solar nebula and are made of ice and dust. Dust grains in comets have been used to investigate the formation conditions of the solar system. A silicate feature is often observed in comet spectra in mid-infrared region, for example 11.3-micron, and may be used for probing early history of the solar system. In most cases the feature shows the existence of crystalline silicate together with amorphous silicate. Since the crystalline silicate grains are generally made through high-temperature annealing above 800K from amorphous ones, it is believed that the crystalline silicate grains produced at the inner part of the disk were transported to the outer cold regions where comet nuclei formed.

Comet C/2012 S1 (ISON) is a long-period Oort cloud comet, discovered in September 2012. In particular, comet ISON is a sungrazing comet, which is predicted to pass close by the Sun and Earth and becoming a bright object. Mid-infrared observations of this new comet and investigation of the 10-micron silicate feature help us to understand the formation of crystalline silicate grains in the early solar nebula.

We observed comet ISON in mid-infrared wavelength region using Cooled Mid-Infrared Camera and Spectrometer (COMICS) mounted on the Subaru Telescope on Mauna Kea, Hawaii. The observation of comet ISON was carried out on 2013 October 19th and 21st UT. Since the weather condition was not so good when we observed, we carried out N-band imaging observations (8.8 and 12.4 micron) and N-band low-resolution spectroscopy. The spectrum of C/ISON can be fit with 260–265 K blackbody spectrum when we use the 7.8–8.2 and 12.4–13.0 micron region as the continuum. The spectrum has only a weak silicate excess feature, which may be able to attribute to small amorphous olivine grains. We could not detect a clear crystalline silicate feature in the spectrum. We will compare the spectrum with other Oort cloud comets, such as comets C/2011 L4 (PanSTARRS) and C/2013 R1 (Lovejoy), and discuss the dust properties and the birthplace of the comet C/ISON.

Keywords: comet, dust, silicate, infrared

極低温原子間力顕微鏡によるアモルファス氷の表面構造観察 Observation of surface structure of amorphous solid water by atomic force microscope at low temperatures

日高 宏^{1*}; 杉本 宜昭²; 中坪 俊一¹; 渡部 直樹¹; 香内 晃¹
HIDAKA, Hiroshi^{1*}; SUGIMOTO, Yoshiaki²; NAKATUBO, Syunichi¹; WATANABE, Naoki¹; KOUCHI, Akira¹

¹ 北海道大学低温科学研究所, ² 大阪大学大学院工学研究科
¹Inst. of Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., ²Grad. Sch. of Eng., Osaka Univ.

Amorphous solid water (ASW) is one of the important materials in space because it exists an abundant and effects to evolution of interstellar molecules. In molecular clouds, it is well known that chemical reactions on icy interstellar dust grains which consist of ASW mantle and mineral particle core are key processes in the formations of important organic molecules (ie. H₂CO, CH₃OH) and deuterium-enriched molecules. Although ASW surface play an important role as a field of chemical reactions, the surface structure of ASW has yet to be revealed.

Recently, we developed a low temperature atomic force microscope (AFM) for study of the surface structure of ASW. AFM is a powerful tool to study the surface structure of ASW because it can work even if the surface do not have a conductive property. In this presentation, we show AFM images of ASW surfaces which were formed at several conditions. ASW were formed on Si(111) 7×7 at 103-135 K with various deposition rate (0.08-0.8 nm/min) and various thickness(2.5-22 nm). From the observations of surface structure, we discuss the relation between the surface structure and the condition of ASW formation.

キーワード: アモルファス氷, 星間塵, 分子雲, 原子間力顕微鏡法
Keywords: amorphous ice, interstellar dust, molecular clouds, atomic force microscopy

模擬氷星間塵への真空紫外光照射による有機分子生成実験 Experimental approach to the formation of organic molecules following vacuum-ultraviolet irradiation of interstellar ice

羽馬 哲也^{1*}; 橘 省吾²; ローレット ピアニ²; 遠藤 由希子²; 藤田 和之¹; 中坪 俊一¹; 福土 博樹¹; 森 章一¹; 千貝 健¹; 香内 晃¹

HAMA, Tetsuya^{1*}; TACHIBANA, Shogo²; LAURETTE, Piani²; ENDO, Yukiko²; FUJITA, Kazuyuki¹; NAKATSUBO, Shunichi¹; FUKUSHI, Hiroki¹; MORI, Shoichi¹; CHIGAI, Takeshi¹; KOUCHI, Akira¹

¹ 北海道大学 低温科学研究所, ² 北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻地球惑星システム科学分野

¹Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, ²Department of Natural History Sciences, Hokkaido University

Cosmic gases and dust grains ejected from dying stars gradually assemble under the influence of gravity to form interstellar clouds. Among these gases, heavy elements such as magnesium (Mg) and silicon (Si) are incorporated in dust. Lighter and chemically active elements (e.g., hydrogen, carbon, oxygen, and nitrogen; H, C, O, N, respectively) play important roles in the chemistry of interstellar clouds. After the temperature and photon field decrease when the density of dust particles increases in interstellar clouds, atoms (e.g., H, O, C, N) and molecules (e.g., CO) deposit onto the dust surfaces. Cold-surface reactions proceed on the grain surface, and an ice mantle, which is predominantly composed of H₂O combined with other molecules such as CO, CO₂, NH₃, CH₄, H₂CO, and CH₃OH, is formed.

The ice mantles are also subjected to substantial energetic processing by the prevailing ultraviolet radiation during the lifetime of an interstellar cloud. Followed by repeated processing when cycling between diffused clouds and dense clouds, new refractory organic molecules are formed in the ice mantles. The ice mantles undergo further photon radiations upon the formation of protoplanetary disks, and finally evolve to non-volatile complex organic residues by irradiation and thermal processing. However, the detail of the chemical evolution of the organic molecules has still been ambiguous. Although the previous laboratory studies using infrared spectroscopy can provide the presence of polar compounds such as amines, carboxylic acid or amides functions, it often suffers from the low sensitivity and the difficulty to obtain precise identifications of molecular species due to the overlapping of broad solid-state bands. Since dust grains and ice mantles are the precursors of planetary material, studying the photoprocesses is essential to understanding the origin of our solar system, and more powerful analytical techniques are required to unveil rich chemistry of the ices in interstellar clouds and protoplanetary disks.

Here, we are going to present a talk about a new apparatus which is now under construction to shed light on the chemical evolution of organic molecules in interstellar clouds and protoplanetary disks. The apparatus consists of three basic parts, i.e., a vacuum system, a copper-substrate equipped with a closed cycle helium refrigerator, and a vacuum ultraviolet source. Multi-component interstellar ice analogues are created on the cold (10 K) substrate by vapor deposition, and subjected to irradiation by the ultraviolet. The irradiated ice is subsequently heated up to 800 K. The gas composition desorbed from the ice during heating is analyzed by a high-resolution quadrupole mass spectrometer in the vacuum chamber. The survived organic residue from heating are studied using gas chromatography coupled to mass spectrometry (GC-MS) and high performance liquid chromatography coupled to mass spectrometry (HPLC-MS).

キーワード: 分子雲, 原始惑星系星雲, 氷星間塵, 有機物

Keywords: interstellar cloud, protoplanetary disk, ice mantles, complex organic molecules

固体表面における C_2H_2 分子水素付加反応：彗星 C_2H_6 生成の解明に向けて Hydrogen addition reactions of C_2H_2 on cold grains; clue to the formation mechanism of cometary C_2H_6

小林仁美^{1*}; 渡部直樹²; 日高宏²; 羽馬哲也²; 渡邊陽司¹; 河北秀世¹

KOBAYASHI, Hitomi^{1*}; WATANABE, Naoki²; HIDAKA, Hiroshi²; HAMA, Tetsuya²; WATANABE, Yoji¹; KAWAKITA, Hideyo¹

¹ 京都産業大学神山天文台, ² 北海道大学低温科学研究所

¹Koyama Astronomical Observatory, Kyoto Sangyo University, ²Institute of Low temperature Science, Hokkaido University

Volatiles incorporated into comets were formed in the pre-solar molecular cloud and probably chemically altered in the proto-planetary disk of the Sun. Although physico-chemical evolution from a molecular cloud to the disk is basically understood, detailed evolutionary processes are still in debate; e.g., the fraction of the materials originated in the molecular cloud incorporated into the disk without physico-chemical alterations (some fraction of materials might sublime via accretion shock) and physical conditions (temperature, densities of materials, etc.). To reveal those links, we focused on the molecules formed through grain surface reactions, which occurred under quite low temperature conditions like 10K. We discuss the origin of such molecules in comets (icy small body of the Solar system), which might preserve the information about chemical and physical conditions of proto-planetary disk. Cometary ethane (C_2H_6) and acetylene (C_2H_2) have been observed in multiple comets since 1996 and their abundances relative to H_2O (the major component of cometary ices) is $\sim 10^{-3}$ but with variations. This variation might be caused by the difference in the mixing ratios between the materials originated in the molecular cloud and the disk-processed materials. C_2H_6 has never been detected in the molecular cloud and the formation mechanism of C_2H_6 detected in comets is still in debate. One of the candidates of formation reactions of C_2H_6 is the hydrogen addition reaction of C_2H_2 on the cold grain surface ($C_2H_2 \rightarrow C_2H_3 \rightarrow C_2H_4 \rightarrow C_2H_5 \rightarrow C_2H_6$). In the previous experimental studies, those reactions were evaluated qualitatively and it was concluded that the reaction from C_2H_4 to C_2H_6 occurred more rapidly than the reactions from C_2H_2 to C_2H_4 and it would be a reason for the nondetection of C_2H_4 . To investigate these reactions more quantitatively in realistic conditions for molecular clouds, we performed the laboratory measurements of hydrogen addition reactions of C_2H_2 and C_2H_4 on the amorphous solid water (ASW), respectively.

The experiments were conducted by using laboratory setup for surface reaction in interstellar environment (LASSIE) at the institute of low temperature science, Hokkaido University³. A cryogenic aluminum substrate is located in the center of the main chamber and surrounded by a large copper shroud connected to a liquid-nitrogen reservoir. Atomic hydrogen used for the reactions were produced by the dissociation of H_2 molecules in microwave-induced plasma. The kinetic temperature of hydrogen atoms were ~ 120 K and the H-atom flux was $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The samples of pure solid C_2H_2 , C_2H_4 , and those on ASW were produced on the substrate at 10, 15 and 20K. Infrared absorption spectra of the ices were measured by FTIR before and during the exposure of H-atom.

Our measurements show basically the same trend as shown in the previous studies. We will discuss the temperature and thickness dependence of the time constant for the sample ices in the poster.

キーワード: 分子生成, 固体表面反応, 星間物質

Keywords: molecular formation, grain surface chemistry, Inter Stellar Medium

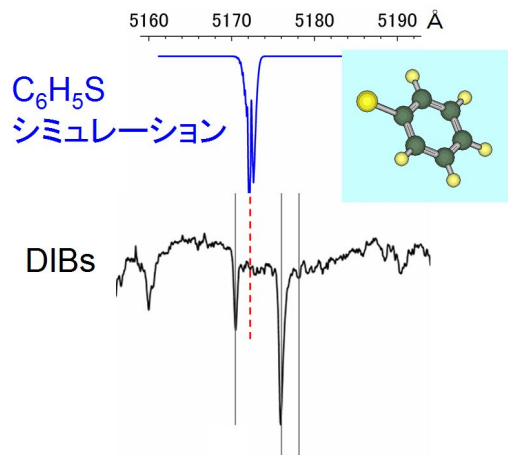
可視光応答性を持つ星間分子の実験室生成とその高分解能分光 High Resolution Spectroscopy of Laboratory-Produced Interstellar Molecule having Response to Visible Light

荒木 光典^{1*}; 輪胡 宏学¹; 庭山 桂¹; 築山 光一¹
ARAKI, Mitsunori^{1*}; WAKO, Hiromichi¹; NIWAYAMA, Kei¹; TSUKIYAMA, Koichi¹

¹ 東京理科大学
¹Tokyo University of Science

地球と星の間の星間空間には光を遮断する希薄な分子雲が存在し、その分子雲の物質による可視光領域の吸収線 Diffuse Interstellar Bands (DIBs) が観測されている。これらは未同定の星間分子である。その起源となっている分子は、地球外生物の元となりうる地球外有機物であり、宇宙の分子進化のひとつの段階を示すものと考えられている。DIBsの候補であるためには、可視光領域に吸収線を持たなければならない。そこで、多環芳香族のラジカルが有力視されている。これらを同定するため、放電による星間分子の生成と測定を行っている。生成にはホロカソード放電を用いており、測定には、Cavity Ringdown 分光器と放電発光分光器を用いている。近年我々は、Cavity Ringdown 分光器により、フェニルチオラジカル (C_6H_5S) の電子遷移の高分解能測定を行った。また、放電発光分光器により、フェノキシラジカル (C_6H_5O) の電子遷移の測定も行った。これらの測定結果を用いて、星間空間で観測された DIBs スペクトルとの比較検討を行った。

キーワード: ぼやけた星間線, 星間分子, 分光, キャビティリングダウン, 分子雲, 放電
Keywords: Diffuse Interstellar Band, interstellar molecule, spectroscopy, cavity ringdown, molecular cloud, discharge



Murchison 隕石中の極性有機化合物の多様性 Variation of organic compounds in the polar extract of Murchison meteorite

奈良岡 浩^{1*}; 山下 陽平¹; 三田 肇²
NARAOKA, Hiroshi^{1*}; YAMASHITA, Yohei¹; MITA, Hajime²

¹九州大学理学研究院地球惑星科学部門, ²福岡工業大学工学部
¹Dept. Earth & Planet. Sci., Kyushu Univ., ²Fukuoka Inst. Tech.

Various organic compounds have been found in carbonaceous chondrites, in which water-soluble bio-related organic compounds such as amino acids and carboxylic acids are fully studied mainly because of their great interests to origins of life in the universe and standards available for the analyses. The concentrations of these acids increase significantly after acid hydrolysis of the water extract. Even though a few studies attempted to identify the chemical structures of their precursors (Cooper and Cronin, 1995), the original structures remain largely unclear. The aqueous activity on the meteorite parent body also could proceed in a chemical oxidation (i.e. incorporation of oxygen by hydrous reaction), resulting in the alteration of original organic matter (Oba and Naraoka, 2009). The large abundance of carboxylic acids in the water extract may be attributable to such oxidation processes.

In contrast to the water extract, less polar methanol extract of chondrites has not been characterized well in spite of relatively high content of organic matter with the D- and ¹⁵N enrichment. Recently, ultrahigh-resolution mass spectral analysis on various solvent extracts of the Murchison meteorite (CM2) was performed by electrospray ionization (ESI) using Fourier transform-ion cyclotron resonance/mass spectrometry (FT-ICR/MS) to reveal significant chemical diversity to tens of thousands of different mass peaks having CHO, CHOS, CHNO and CHNOS elemental compositions (Schmitt-Kopplin et al., 2010). With the assumption for molecular formulae calculation and no chromatographic separation, however, the detailed chemical structures of the compounds cannot be determined. In particular, the organic compounds with their elemental compositions of CH and CHN were not discussed. In this study, we performed high-performance liquid chromatography/high resolution mass spectrometry (HPLC/HRMS) analysis of organic compounds in polar solvent extracts of the Murchison meteorite.

Homologous series of alkylpyridines have been identified in the polar solvent extracts of the Murchison meteorite by liquid chromatography/high-resolution mass spectrometry. The wide range of saturated- and unsaturated-alkylated (C1 to C21) pyridines is more diverse relative to that previously found, which could be produced by aldehydes and NH₃ through aldol condensation and Chichibabin-type synthesis on the meteorite parent body. This finding implies a high aldehyde activity under an alkaline condition with ammonia for the chemical evolution of organic matters in carbonaceous meteorites. In addition to the compound distribution of alkylpyridines, the occurrence of other compounds in the water extract will be also discussed with respect to their formation mechanisms in carbonaceous meteorites.

Keywords: polar organic compounds, carbonaceous meteorite, Murchison, high-resolution mass spectrometry

衝撃波による氷ダストの加熱と蒸発 Heating and evaporation of icy dust in transient heating events induced by nebular shocks

三浦 均^{1*}; 山本 哲生²; 中本 泰史³
MIURA, Hitoshi^{1*}; YAMAMOTO, Tetsuo²; NAKAMOTO, Taishi³

¹名古屋市立大学, ²神戸大学, ³東京工業大学
¹Nagoya City University, ²Kobe University, ³Tokyo Institute of Technology

分子雲から原始惑星系円盤へと至る際の化学進化において、固体氷は重要な役割を担う。固体氷表面ではCO分子へのH原子逐次付加反応によりホルムアルデヒドやメタノールなどの簡単な有機分子が形成する(Watanabe & Kouchi 2002)。さらにH-D置換反応により、これらの分子の重水素体が効率的に形成される(Nagaoka et al. 2005)。紫外線照射を受けた多成分氷を昇温させると、蒸発残渣としてアミノ酸などの複雑な有機分子が形成される(Munoz Caro et al. 2002)。固体氷が蒸発すると、中に閉じ込められていた多様な分子が放出されることでガスの化学組成が変化する。固体氷が経験する熱履歴は上記の化学進化に大きく影響するため、固体氷の熱進化を明らかにすることは重要である。

本研究では、円盤ガス中に生じる衝撃波による固体氷の過渡的加熱現象に着目した。ガス円盤では、分子雲からのガス降着やガス円盤内での惑星形成に伴い、様々な条件で衝撃波が生じる。固体氷が周囲のガスと共に衝撃波面を通過すると、周囲のガスが瞬間的に速度変化する一方、固体氷は慣性のために通過前の速度を維持するため、両者の間に大きな相対速度が生じる。ガス分子が高速衝突することで固体氷が加熱され、同時に蒸発が生じる。相対速度は時間と共に急激に減少するため、衝撃波による加熱は継続時間が極めて短い過渡的な現象である。このとき、固体氷が経験する熱履歴や蒸発率を、様々な衝撃波条件に対して系統的に調べた。

モデル：衝撃波後面のガスの温度や密度は一定だと仮定した。簡単のため、固体氷の形状は球であるとし、単一組成(H₂O or CO)からなるとした。また、固体氷の熱慣性は小さく、温度変化のタイムスケールは速度変化のタイムスケールに対して充分小さいと仮定した。以上の仮定の下では、個々の固体氷の蒸発率(初期半径に対してどの程度半径が減じるかの比)は、衝撃波後面のガスと固体氷の相対速度の初期値 v_0 と、衝撃波後面のガス密度 ρ_g のみに依存する。ある与えられた v_0 と ρ_g に対して、固体氷の運動方程式と蒸発に伴う半径変化の式を数値計算し、固体氷が経験する最高温度と蒸発率を求めた。

結果：定性的には、 v_0 と ρ_g が大きいくほど、固体氷は高温を経験し、蒸発率も大きくなる。その上で、以下のことが分かった。(i) v_0 と ρ_g を大きくしても、完全蒸発はなかなか起こらない。これは、蒸発率が激しくなると半径が小さくなり、ガスとの相対速度がすぐに減少することで加熱継続時間が抑えられるというnegative feedbackが作用するからである。(ii) 蒸発率が1%を上回るための臨界の $v_{0,c}$ が存在する。臨界速度は、純H₂O氷の場合は約3 km/s、純CO氷の場合は約1 km/sである。いくら ρ_g を大きくしても、 v_0 がこの臨界速度以下であればほとんど蒸発は生じない。(iii) 固体氷は、平衡状態であれば揮発してしまう温度(固気平衡温度)を上回る最高温度を経験し得る。これは、 ρ_g が大きいか場合は加熱継続時間が極めて短いため、完全に気化する前に加熱が終わるからである。

考察と結論：衝撃波の発生に伴う固体氷の熱履歴や蒸発率を、広い衝撃波条件にわたって系統的に明らかにした。これは、分子雲やガス円盤の天文観測で検出された化学組成の変化を、固体氷の蒸発現象と関連付ける上で有用であろう。固体氷が昇華温度を大きく上回る温度を経験することで、ガス円盤内においてアミノ酸などの複雑な有機分子が形成するかも知れない。高温では固体氷内でHとDの交換反応が期待できるため、これに伴う重水素濃集効果も興味深い。今後は、固体氷の過渡的加熱現象に伴う上記の過程の詳細について検討を進める予定である。

キーワード: 氷ダスト, 衝撃波加熱, 蒸発, 化学進化, 原始星円盤, 原始惑星系円盤
Keywords: icy dust, shock heating, evaporation, chemical evolution, protostellar disk, protoplanetary disk

星間塵表面におけるエタノール重水素濃集の可能性：H-Dトンネル置換反応実験 Importance of deuterium fractionation of ethanol by grain surface reactions: experiment of H-D tunneling substitution

尾坂 和哉^{1*}; 大場 康弘¹; 香内 晃¹; 渡部 直樹¹
OSAKA, Kazuya^{1*}; OBA, Yasuhiro¹; KOUCHI, Akira¹; WATANABE, Naoki¹

¹ 北大 低温研

¹ Inst Low Temp Sci, Hokkaido University

Since we have demonstrated the importance of tunneling grain surface reactions in deuterium fractionation of molecules, many works have targeted this process. To date, we have shown that the grain surface reactions play a crucial role in deuterium enrichments of water, formaldehyde, methanol, and methylamine. In this talk, we present the results of experiment on H-D substitution tunneling reactions of ethanol on cryogenic surfaces. Although C_2H_5OH was observed toward interstellar clouds, its deuterated species have not been detected. However, it was found that its homologous, CH_3OH can be highly deuterated by H-D substitution reactions on grain surfaces and thus it should be reasonable to focus on the potential importance of this process for ethanol. We demonstrated that deuterated methanol is efficiently produced by tunneling reaction of H atoms at very low temperatures relevant to grain surfaces in clouds. H-D reactions predominantly occur in CH_3-CH_2- groups but were hardly observed in an $-OH$ group which is consistent with the methanol case.

キーワード: 重水素濃集, エタノール, 星間塵表面反応

Keywords: deuterium enrichment, ethanol, grain surface reaction

イオン誘起微粒子核生成Ⅱ：水クラスターイオンの自由エネルギー Ion-Induce nucleation experiment II: free energy of the water-cluster ion

日高 宏^{1*}; 中井 陽一²; 小島 隆夫³; 渡部 直樹¹
HIDAKA, Hiroshi^{1*}; NAKAI, Yoichi²; KOJIMA M., Takao³; WATANABE, Naoki¹

¹ 北海道大学低温科学研究所, ² 理化学研究所仁科センター, ³ 理化学研究所原子物理研究室
¹Inst. Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., ²RIKEN Nishina Center, ³RIKEN Atomic Physics Laboratory

Ion-Induce nucleation in gas phase is an important mechanism for grain formation in various circumstances. However, the number of works regarding this formation mechanism is very limited. To investigate the elementary processes of ion-nucleation mechanism, we recently developed a new apparatus (See, the presentation by N. Watanabe in this session). Using this apparatus, the cluster ion formation with an ion core mass-selected, which is the first stage of nucleation, can be observed quantitatively. In this presentation, we show the results of experiment on water-cluster ion formation in which free energies with the size of cluster have been determined. The experiment was performed at temperatures in range of 230-400 K with the supersaturation ratio of about 10^{-3} - 10^{-2} .

キーワード: 星間塵, クラスターイオン, 核生成
Keywords: interstellar grain, cluster ion, nucleation

はやぶさ2 レーザ高度計による小惑星周辺ダスト検出の試み Detection of levitation dust around the asteroid by Hayabusa-2 LIDAR

押上 祥子^{1*}; 千秋 博紀²; 和田 浩二²; 小林 正規²; 並木 則行²; 水野 貴秀³
OSHIGAMI, Shoko^{1*}; SENSHU, Hiroki²; WADA, Koji²; KOBAYASHI, Masanori²; NAMIKI, Noriyuki²; MIZUNO, Takahide³

¹ 国立天文台, ² 千葉工業大学惑星探査研究センター, ³ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

¹National Astronomical Observatory of Japan, ²Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, ³Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

The micron-size particles are continuously produced at the surface of airless bodies like the Moon and asteroids by innumerable micro impacts and thermal stress related to large temperature difference between daytime and nighttime. Previous asteroid missions have revealed smooth appearance of topography on 951 Gaspra, 243 Ida, and 433 Eros suggesting that these asteroids are covered with particles smaller than resolution of camera images. Particularly, the exploration of Eros by NEAR Shoemaker has revealed as smooth surface as a liquid water at the base of craters whose diameter is between 20 and 300 m. This "pond" is consistent with stagnant dusts of diameter smaller than 50 microns. Based on this observation, dust levitation hypothesis was proposed. According to this hypothesis, a photoelectric effect of solar UV positively charges both dust and the surface. Then a balance between electric repulsion and gravity causes 0.5-microns dusts to oscillate vertically over the surface of Eros long period of time. When a dust has a horizontal velocity, it transfers laterally until it reaches to a shadow of topography where electrostatic field is weaker than surroundings. Thus topographic depression such as a crater becomes a sink of levitating dusts.

LIDAR is one of four remote-sensing instruments onboard Hayabusa-2, and is used to measure altitudes of the spacecraft from a surface of the asteroid, 1999 JU3, for not only secure navigation but also scientific investigation of a C-type asteroid. Hayabusa-2 LIDAR has been improved from that onboard Hayabusa which explored and returned samples from asteroid 25143 Itokawa. A new function called dust count mode is implemented to Hayabusa-2 LIDAR to observe spatial distribution of dust number density in 8 levels with resolution of 20 m in bore sight direction. LIDAR can hardly observe lateral distribution of dusts, but distinguish a weak reflection of thin dust cloud from that of the surface. To plan an operation of the dust count mode observation is difficult because the number density of asteroid dust is not known at all. Instead, we evaluate the lower bound of number density that is geologically important for morphology of asteroid surface. For a given number density of dusts and under an assumption that a characteristic time of levitation is the rotation period of 1999 JU3, the rate of embayment of craters is calculated. If this rate of embayment is greater than that of crater production, we need to take into account a modification process for the study of crater morphology and crater counts of 1999 JU3. This lower bound is calculated to be 10^6 m^{-3} for a cloud of dusts whose radius is larger than a few microns. Then we set this value as a target of the dust count mode observation.

A detectability of dust count mode is dependent on sensitivity of Hayabusa-2 LIDAR and an altitude of the spacecraft. We calculate a reflection from dusts using Mie scattering model assuming that a diameter of dust particle is constant and is larger than the wavelength of laser, that is, 1064 nm. A characteristic distance between dusts is also assumed to be sufficiently larger than the wavelength so that interaction between dust particles is negligible. Using a lidar equation, we calculate a peak power of backscattering light from a dust cloud for various sets of the distance, the number density, and the dust radius. The peak power of reflection is generally stronger than noise level of the detector. The reflection from dust cloud is so weak that the targeted number density of 10^6 m^{-3} is hardly higher than the detection limit. Even at the lowest altitude, the reflection from a dust cloud of 10-microns radius for 10^6 m^{-3} number density is equivalent to the detection limit. If the dust radius is 5 microns, number density more than 10^7 m^{-3} is necessary to be detected. Therefore we plan to start the dust count operation from the HP and attempt to conduct as much operations as possible at low altitude.

原始惑星系円盤条件でのフォルステライト気相成長 Condensation of forsterite under protoplanetary disk conditions

橘省吾^{1*}; 瀧川 晶²; 三宅 亮²; 永原 裕子³; 小澤 一仁³
TACHIBANA, Shogo^{1*}; TAKIGAWA, Aki²; MIYAKE, Akira²; NAGAHARA, Hiroko³; OZAWA, Kazuhito³

¹ 北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門, ² 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ³ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

¹Dept. Natural History Sci., Hokkaido Univ., ²Dept. Geol. Mineral., Kyoto Univ., ³Dept. Earth Planet. Sci., Univ. Tokyo

Meteoritic evidence indicates that dust condensation occurred in the early stage of solar system evolution. In this study, we succeeded in performing condensation experiments of forsterite under controlled protoplanetary-disk conditions, which will make significant contribution to understanding silicate formation and chemical fractionation in protoplanetary disks.

Condensation experiments were carried out in the system of $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{-H}_2\text{O}$. A mixed gas of H_2 and H_2O was flowed into a continuously evacuated infrared vacuum furnace at a controlled rate to keep a pressure constant. Synthetic forsterite powder in an Ir crucible was heated as a gas source. A part of evaporated gases were condensed on a Pt mesh located at a cooler region in the chamber. The pressure and temperature conditions were close to those of protoplanetary disks. The total pressure of the system was 5.5 Pa, and the substrate temperature ranged from 1320 to 1160 K. The $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ ratio was set at 0.015, which was about 15 times larger than the solar ratio. The SiO/H_2 ratio was evaluated to be about 0.7-2 % of the solar ratio from the weight loss rate of the gas-source forsterite. Experimental duration ranged from 6 to 237 hours.

Sub-micron to micron-sized condensates covered with Pt substrates at 1160 and 1275 K, but no condensates were found at 1320 K. The typical size of condensates at 1160 K was less than 1 micron irrespective of experimental duration and no effective growth of each condensed grain was observed. Condensates at 1275 K for >40 hours partly had several micron-sized flat regions. EDS analyses showed that chemical compositions of condensates were consistent with the stoichiometry of forsterite, and their EBSD patterns were well fitted with the patterns from crystalline forsterite. Coincident EBSD patterns were obtained from the flat region of condensates at 1275 K, suggesting that the area was covered with a single crystal. TEM observation of condensates at 1160 K also found that the condensates were polycrystalline forsterite with a thickness of 30-150 nm, and infrared absorption spectra of condensates show clear 10-micron absorption features resembling those of crystalline forsterite. These evidence indicates that polycrystalline forsterite condensed at 1275 and 1160 K.

The mean free path of gas molecules under the present experimental conditions is less than 1 mm, and the evaporated forsteritic gas and the ambient $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$ gas are expected to be well mixed. Supersaturation ratios (S) for experiments at 1320, 1275, and 1160 K are thus estimated to be <1.2, <10, and <1000-2000. These supersaturation ratios correspond to the supercooling of <5, <60 and <170 K, respectively.

No condensates were found at 1320 K because the degree of supersaturation was too small for nucleation of forsterite or even the vapor was not saturated with forsterite ($S < 1$). The condensates at the supercooling of <170 K (1160 K) imply that heterogeneous nucleation of new grains occurred successively on preexisting grains. On the other hand, with the supercooling of <60 K (1275 K), some grains seem to have grown up to several microns, and some seem to have newly nucleated on preexisting grains, suggesting that both nucleation and growth of each condensate occurred.

These differences would result in a structural difference in forsterite dust condensed in protoplanetary disks. Fluffy aggregates of sub-micron sized fine particle would form with a supersaturation of >1000, while aggregates of micron-sized grains would form with S of 10 that could be an analogue of amoeboid olivine aggregates in chondrites.

キーワード: フォルステライト, 気相成長, 原始惑星系円盤

Keywords: forsterite, condensation, protoplanetary disk

低温低圧環境下における微粒子表面での触媒化学反応による有機分子生成実験に向けて

A New Experiment for Organic Molecule Formation by Catalytic Reactions on the Surface at Low Temperature and Pressure

木村 勇気^{1*}; 土山 明²; 永原 裕子³
KIMURA, Yuki^{1*}; TSUCHIYAMA, Akira²; NAGAHARA, Hiroko³

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ² 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ³ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

¹Tohoku University, ²Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, ³Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

Abundant H₂, CO and N₂ gases react to be more complex molecules mainly on the cooled surface of cosmic dust particles in the molecular cloud and/or primitive solar nebula [1]. The production of organic molecules and subsequent evolution to organic materials in the solar nebula may contribute to the primordial organic system of the Earth. Catalytic chemical reactions are possible production pathway of organic materials in the solar nebula after the formation of simple molecules on nanometer sized cosmic dust particles in the molecular clouds. Experimentally, organic molecules ranging from methane (CH₄), ethane (C₂H₆), benzene (C₆H₆) and toluene (C₇H₈), to more complex species such as acetone (C₃H₆O), methyl amine (CH₃NH₂), acetonitrile (CH₃CN) and N-methyl methylene imine (H₃CNCH₂) have been produced using such as the Fischer-Tropsch type (FTT) and Haber-Bosch type (HBT) reactions on analogs of naturally occurring grain surfaces [2]. Previous studies were performed at higher-temperature (>573 K) and pressure (~1 atm) than the expected conditions in the solar nebula [3-6]. However, since the actual environment is at lower temperature and pressure, it is not clear whether the previous experimental results can be extrapolated to the solar nebula. Our group seeks to elucidate the reaction rates of chemical reactions including isotopic fractionation at lower temperature (100-500 K) and pressure (10⁻³-10⁰) and their contribution to the primordial organic system of the Earth.

We are constructing a vacuum chamber based on a new concept to conduct the experiments mentioned above. The chamber with a differential pumping system has a temperature-controlled substrate, a Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR), and two quadrupole mass spectrometers (Q-MSs). The substrate has an iron or silicate thin film for FTT and HBT reactions and the FT-IR measures the vibration modes of adsorbed and produced molecules on the surface and the Q-MSs detect volatile and nonvolatile molecules, respectively. As a result, reaction rates of molecules such as H₂, CO, N₂ and NH₃ on iron or silicate substrate will be obtained as a function of temperature and pressure.

[1] J. Llorca and I. Casanova, *Meteorit. Planet. Sci.* **35**, 841 (2000).

[2] H. G. G. M. Hill, and J. A. Nuth, *Astrobiology* **3**, 291 (2003).

[3] J. A. Nuth, N. M. Johnson, and S. Manning, *The Astrophysical Journal* **673**, L225 (2008).

[4] J. A. Nuth, N. M. Johnson, and S. Manning, *Organic matter in space, Proc. IAU Symp.* **251**, edited by S. Kwok and S. Sandford, Cambridge Univ. Press, NY (2008), pp. 403-408.

[5] J. A. Nuth, Y. Kimura, C. Lucas, F. Ferguson, and N. M. Johnson, *The Astrophysical Journal Letters* **710**, 98 (2010).

[6] Y. Kimura, J. A. Nuth, N. M. Johnson, K. D. Farmer, K. P. Roberts, and S. R. Hussaini, *Nanoscience and Nanotechnology Letters* **3**, 4 (2011).

キーワード: 有機分子, 触媒反応, 原始惑星系

Keywords: Organic molecules, Catalytic reactions, Protoplanetary system

原始惑星系円盤進化にともなうダストの運動と組成分布 Dust movement and chemical evolution of proto-solar disk

永原 裕子^{1*}; 中田 守¹; 小澤 一仁¹
NAGAHARA, Hiroko^{1*}; NAKATA, Mamoru¹; OZAWA, Kazuhito¹

¹ 永原 裕子

¹ Hiroko Nagahara

太陽系の力学的な進化を記述するために構築された惑星形成理論は、系外惑星や系外の円盤の観測によって改良が加えられ、近年まで発展してきた。他方、物質科学的な研究も、地球に飛来する隕石や探査によって得られた月試料、彗星の塵やいとかわの粒子などの分析によって発展してきた。太陽系の形成過程を解明する上で形成初期の情報を保持する物質科学的証拠は、円盤初期の物理過程に制約を与えるが、そのためには化学と物理モデルのカップリングが必要不可欠である。

原始惑星系円盤における物理と化学を統合して理解するため、本研究においては、原始惑星系円盤初期の粒子の化学組成を中心星からの関数として決定し、各粒子の円盤内の物理的移動を追跡することで、円盤内の粒子の総化学組成の時空間変化を調べることが目的とした。

モデルは、化学平衡計算とダスト粒子移流拡散方程式を基本とする。熱力学的平衡計算により、円盤内の各初期位置における凝縮相の組成を決定し、その組成は移動により変化しないものとした。各粒子の運動は一次元定常 α 円盤を仮定し、ラグランジアン法による移流として追跡した。初期に内側に存在する粒子は高温のため揮発性元素に枯渇した組成を持つ一方、外側の粒子は未分化な組成をもつ。粒子は時間とともに、全体としては太陽方向へ移動するが、乱流拡散の効果により円盤外向きの成分も存在する。内側の揮発性元素に枯渇した粒子と外側の揮発性元素を含む粒子との混合を解析した。

計算の結果、以下のことが明らかとなった。(1) 粒子は全体としては太陽方向へ移動するため、円盤内粒子の総化学組成は、各時間において円盤外側ほど未分化となる。(2) 特定の位置についてみると、時間経過とともに未分化な組成となる。(3) 円盤面密度、温度構造をパラメータとして検討した結果、高温の円盤ほど、円盤内側領域の組成が未分化なものに置き換えられるまでの時間が遅くなる。これは高温の円盤ほど分化した化学組成領域が広がるため、外側領域から未分化組成の粒子が移動するのに時間を要するためである。

これらの結果をC型コンドライトの組成と比較したところ、円盤内側からCV, CO, CMの順番に各コンドライトを説明する領域が存在するということがわかった。また本研究により、小惑星帯においてC型コンドライト組成を作り出すためには、初期に高温領域が広く広がった円盤、さらに早期に微惑星形成がおこることが必要であることが明らかとなった。

キーワード: 原始惑星系円盤, 化学組成, ダスト移動, 平衡計算

Keywords: protoplanetary disk, chemical evolution, dust movement, chemical equilibrium

年代サイトメトリーの隕石解剖学への応用 Age-cytometry : new approach for meteorite anatomy

平田 岳史^{1*}; 伊藤 正一¹

HIRATA, Takafumi^{1*}; ITOH, Shoichi¹

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

¹ School of Science, Kyoto University

The chronology for meteorite samples has played an important role to decode the early sequence of the solar system. Among the chronometers based on the radio-active decay of long-lived nuclides, because of the high time resolution of the resulting age data, the U-Pb chronometry has been widely used to define the timing of formation of refractory inclusions or to understand the formation sequence of the chondrite parental body. The high time resolution on the U-Pb chronometers was achieved by the small contribution of the analytical uncertainties in the isotope ratio measurements onto the resulting age data, and also because of the well-defined decay constants for ^{238}U , ^{235}U and ^{232}Th nuclides. Moreover, the U-Pb isotope systematics has further advantages of evaluating of system closure since the sample formation or crystallization of minerals, and therefore, reliability of the resulting age data can be rigorously tested. Using the U-Pb chronometer, the resulting time-resolution can become as small as 0.2 ? 1 Ma range for chondritic materials, but this could not be high enough to understand the planetary formation during the runaway growth or to understand the timing of the core formation. To overcome this, we are trying to measure in-situ $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ ratio from individual minerals by means of combination of two ion collectors. Details of the instrumentation and operational conditions would be demonstrated in this talk.

Cytometry is the quantitative analysis of cells and cell systems. Cytometry measures optical properties of cells, and most often uses fluorescence to measure specific antigen molecules, intracellular ions and DNA/RNA using antibodies, indicator dyes, or nucleic acid-specific probes. Cells may be live or fixed, depending on the application, and individual cells can often be physically sorted. ? Advantage of the cytometry are the analysis speed, detection sensitivity, the ability to measure many parameters simultaneously, and the ability to sort individual cells, and therefore, mechanism or process of elemental metabolism could be precisely evaluated based on the extensive number of cells (e.g., Benfall et al., Science, 2011; Bodenmiller et al., Nature Biotechnology, 2012). This approach can also be applied to understand the solar system evolution based on the numerous number of age data. In recent ten years, we have demonstrated the unique study approach using the distribution pattern of sample ages based on the series of precise age data collected from large number of samples (i.e., age-cytometry) [e.g., Rino et al., PEPI, 2008; Iizuka et al., Geology, 2008; Iizuka et al., Iizuka et al., Chem. Geol., 2009; Iizuka et al., GCA, 2010]. With the high-time resolution age data obtained by present analytical technique using the LA-ICPMS, further precise and quantitative discussion could be made on the solar system evolution through the age-cytometry. The newly developed high-resolution and high-throughput age determination system using a laser ablation-ICP mass spectrometry has a potential to become a significant tool to promote an age-cytometry.

Keywords: meteorite anatomy, cytometry, solar system evolution, multiple collector mass spectrometry, laser ablation-ICPMS, ICP-mass spectrometry

玄武岩質ユークライト Juvinas における ^{147}Sm - ^{143}Nd 年代と ^{146}Sm - ^{142}Nd 年代 ^{147}Sm - ^{143}Nd and ^{146}Sm - ^{142}Nd chronology of a basaltic eucrite, Juvinas

鏡味 沙耶^{1*}; 横山 哲也¹

KAGAMI, Saya^{1*}; YOKOYAMA, Tetsuya¹

¹ 東京工業大学地球惑星科学専攻

¹Dept. Earth and Planetary Sciences, Tokyo Tech

Eucrites are interpreted to have originated from the asteroid 4-Vesta which differentiated into crust and mantle. The chronology of eucrites is important to understand the formation and differentiation of planets/ planetesimals in the early Solar System. The combination of two chronometers, short-lived ^{146}Sm - ^{142}Nd system ($T_{1/2}=6.8\times 10^7\text{yr}$) and long-lived ^{147}Sm - ^{143}Nd ($T_{1/2}=1.06\times 10^{11}\text{yr}$), is useful to decode the thermal history of the eucrite parent body, because they have the same closure temperature [1]. To obtain precise Sm-Nd ages for eucrites and other achondrites, it is indispensable to develop highly precise Nd isotope analysis.

We investigated the ^{147}Sm - ^{143}Nd and ^{146}Sm - ^{142}Nd chronometers for a brecciated basaltic eucrite, Juvinas. We examined samples of whole rock powder (W.R.), 400 mesh grains, plagioclase (Pl), and pyroxene (Px). Plagioclase and pyroxene grains were obtained by handpicking. Samples were dissolved using a mixture of concentrated pure acid (HClO_4 , HF, and HNO_3) and heating at 195 °C. About ten percent of the solution was removed and spiked with ^{149}Sm - ^{145}Nd in order to precisely measure Sm and Nd concentrations by ID-ICP-MS (Thermo X-series II at Tokyo Tech). We separated Nd from the rest of the solution via a four-step column chemistry. Nd isotope ratios in W.R., 400mesh, Pl, and Px were analyzed by TIMS (Thermo TRITON-plus at Tokyo Tech) with the dynamic multicollection method.

The ^{147}Sm - ^{143}Nd mineral isochron diagram of Juvinas, yielded an age of $4610\pm 410\text{Ma}$. In contrast, the ^{146}Sm - ^{142}Nd systematic for Juvinas yielded an initial $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ ratio of 0.0157 ± 0.0074 . This gives $4618^{+63}_{-38}\text{Ma}$ for the age of Juvinas when an initial solar system ratio of $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}=0.0094$ at 4568 Ma is assumed [1]. The self-consistency of the ^{147}Sm - ^{143}Nd and ^{146}Sm - ^{142}Nd ages for Juvinas supports early crust-mantle differentiation on the eucrite parent body as was proposed by previous chronological studies on basaltic eucrites (e.g., Pb-Pb, Al-Mg, Mn-Cr, and Hf-W; [2-5]).

It has been suggested that cumulate eucrites provide internal isochron ages younger than basaltic eucrites due to a longer history in the deep crust or late thermal disturbance during later meteorite bombardment event(s) [6]. Because of the limited Sm/Nd variation in the meteorite components analyzed, the Sm-Nd ages obtained in this study have uncertainties several times larger than those in previous studies [6]. The ^{147}Sm - ^{143}Nd age and the initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratio for Juvinas are consistent with those obtained by the mineral isochrons of three cumulate eucrites within analytical error ($4546\pm 8\text{Ma}$; [6]). However, our ^{146}Sm - ^{142}Nd age is older than the proposed ^{147}Sm - ^{143}Nd age for cumulate eucrites, indicating that the crystallization of basaltic eucrites predates the timing when the Sm-Nd systematics for cumulate eucrites reached a closure temperature. It should be noted that Juvinas is a brecciated basaltic eucrite which may not record a correct Sm-Nd age. Further investigation is required to obtain more precise Sm-Nd ages utilizing unbrecciated basaltic eucrite to reveal the thermal history on the eucrite parent body.

References: [1] N. Kinoshita et al., (2012) *Science*, 335, 1614 [2] S.J.G. Galer and G.W. Lugmair, (1996) *MAPS*, 31, A47. [3] M. Wadhwa et al., (2003) *LPSC XXXIV*, 2055. [4] G.W. Lugmair and A. Shukolyukov, (1998) *GCA* 62, 2863. [5] T. Kleine et al., (2004) *GCA* 68, 2935.

[6] M. Boyet et al., (2010) *EPSL* 291, 172.

アエンデ隕石 Type C CAI の Al-Mg 鉱物アイソクロン Al-Mg mineral isochron of a Type C CAI from Allende

川崎 教行^{1*}; 加藤 千図²; 伊藤 正一³; 伊藤 元雄⁴; 若木 重行⁴; 坂本 尚義¹

KAWASAKI, Noriyuki^{1*}; KATO, Chizu²; ITOH, Shoichi³; ITO, Motoo⁴; WAKAKI, Shigeyuki⁴; YURIMOTO, Hisayoshi¹

¹北海道大学, ²ワシントン大学セントルイス, ³京都大学, ⁴海洋研究開発機構

¹Hokkaido University, ²Washington University in St. Louis, ³Kyoto University, ⁴JAMSTEC

隕石に含まれる CAI (Ca-Al-rich inclusion) は、45.67 億年前に形成された太陽系最古の岩石である (Amelin et al., 2002)。CAI からは、半減期 73 万年で ²⁶Mg へと壊変する消滅核種 ²⁶Al が、多量に含まれていた痕跡が見つかっており (e.g., MacPherson et al., 1995), Al-Mg 相対年代系を適用できる。本研究では、アエンデ隕石の Type C CAI, EK1-04-2 (Ito et al. 2000) の詳細な岩石学的研究と酸素同位体分析, Al-Mg 年代測定を行い, CAI の加熱溶融の年代を求めた。

試料の観察と元素分析, 結晶方位解析は FE-SEM-EDS-EBSD システム (JEOL JSM-7000F; Oxford X-Max 150; Oxford HKL) を用いて行った。酸素同位体分析と Al-Mg 年代測定は SIMS (Cameca ims-1270) で行った。

EK1-04-2 は約 2 mm の大きさの CAI 破砕片で, 主にスピネル, アノーサイト, オリビン, ディオプサイドから成る。二次変質鉱物のネフェリン, ソーダライト, 鉄に富むオージャイトが一部で見られる。EK1-04-2 は, 構成鉱物の量比と化学組成の違いによりコア部とマントル部に分けられる。コア部では, 自形のスピネルが他鉱物の結晶に囲まれている。アノーサイトは自形から半自形を示す。オリビンは半自形から他形を示し, 自形のアノーサイト, スピネルと接する。ディオプサイドは他形を示し, スピネル, オリビンを囲む。したがってコア部の構成鉱物の結晶化順序は, スピネル, アノーサイト, オリビン, ディオプサイドの順となる。マントル部はコア部と同じ鉱物組み合わせだが, スピネルの量がコア部より少なく, 他形を示すスピネルとアノーサイトが見られ, ディオプサイドが Mg に富み Ti に乏しいという特徴の違いがある。

構成鉱物の酸素同位体組成は CCAM ライン上で分布した ($\delta^{18}\text{O} = -44$ から $+9$ パーミル)。スピネルはコア・マントル部両方で ¹⁶O に富む ($\delta^{18}\text{O} \sim -43$ パーミル) 均一な組成をもっていた。一方でアノーサイトはコア・マントル部両方で均一に ¹⁶O に乏しい ($\delta^{18}\text{O} \sim 8$ パーミル)。オリビンとディオプサイドは, コア部とマントル部で異なる組成を示した。コア部のオリビンとディオプサイドは均一な酸素同位体組成を示し, スピネルとアノーサイトの中間の値を示した ($\delta^{18}\text{O} \sim -15$ パーミル) が, マントル部のオリビンとディオプサイドはコア部のものよりも ¹⁶O に乏しくその同位体組成は不均質であった ($\delta^{18}\text{O} = -13$ から -4 パーミル)。つまり, 酸素同位体組成から見ると, この CAI はスピネルの結晶化作用, コア部のオリビンとディオプサイドの結晶化作用, マントル部のオリビンとディオプサイドの結晶化作用に大別され, マントル部のオリビンとディオプサイドとは互いに化学平衡の関係にない。

Al-Mg 分析のアイソクロン図から, コア部のスピネルは $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}_0 = (3.52 \pm 0.15) \times 10^{-5}$ の傾きを持つ線上にプロットされるが, コア部のオリビン, ディオプサイド, アノーサイトは $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}_0 = (5 \pm 5) \times 10^{-7}$ の傾きを持つ線上にプロットされた。この傾きの差は約 460 万年の年代差に相当する。一方で, マントル部のオリビンとディオプサイドはコア部のオリビン, ディオプサイド, アノーサイトからなる直線の下側にプロットされた。

以上の岩石学的組織と酸素同位体分布から, コア部は次のように形成されたと考えられる。¹⁶O に富む組成をもつスピネルを含んだ EK1-04-2 前駆 CAI が部分溶融を経験した。そのメルトと ¹⁶O に乏しい初期太陽系星雲ガスとの間で酸素同位体の交換が起こり, 部分溶融メルトから ¹⁶O に乏しいオリビン, ディオプサイド, アノーサイトが再結晶化した。この部分溶融イベントはスピネル形成から約 460 万年後に起こり, 溶融温度は約 1600K であった。次に, この周りに Al-rich コンドリュールのような ¹⁶O に乏しく $\delta^{26}\text{Mg}_0$ 値の低い物質が少量付着し, 再び部分溶融と固結のイベントを経験した。アノーサイトだけが最も ¹⁶O に乏しい酸素同位体組成をもつのは, この CAI がアエンデ隕石母天体に取り込まれた後に起こった熱変成作用の結果と考えられる。

本研究から, この CAI は原始太陽系円盤中で少なくとも約 460 万年間漂っており, その間に複数回の加熱溶融イベントを経験していたことがわかった。

キーワード: Al-Mg, CAI, SIMS, 酸素同位体, 初期太陽系星雲

Keywords: Al-Mg, CAI, SIMS, oxygen isotopes, solar nebula

LL4-6 普通コンドライト隕石中リン酸塩鉱物の水含有量及び水素同位体組成 Water contents and hydrogen isotopic compositions of phosphate minerals from LL4-6 ordinary chondrites.

柳井 佳穂里¹; 伊藤 正一^{2*}; グリーンウッド ジム³; ラッセル サラ⁴; 坂本 尚義¹

YANAI, Kaori¹; ITOH, Shoichi^{2*}; GREENWOOD, James³; RUSSELL, Sara⁴; YURIMOTO, Hisayoshi¹

¹ 北海道大学自然史科学専攻, ² 京都大学地球惑星科学専攻, ³ ウェズリアン大学地球環境科学専攻, ⁴ ロンドン自然史博物館鉱物学部門

¹Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University,

³Department of Earth and environment Sciences, Wesleyan University, ⁴Department of Earth Sciences, Natural History Museum, London

地球の水の起源は、これまで様々な研究により、複数の供給源が考えられてきた。どの材料物質から供給されたのかを議論する際に、水素同位体組成が指標としてよく用いられている。

彗星は、水の供給源の有力な候補の一つである。オールト雲起源の彗星は分子雲低温領域で形成するアモルファス氷を保存している。分子雲低温領域では、イオン分子交換反応によって重水素に富む氷が形成されるため、多くの彗星は高い D/H 比を持っている。

地球には、彗星以外の地球外物質も飛来する。普通コンドライト隕石は落下隕石の9割を占めるもっともありふれた隕石である。これは、隕石母天体である S 型小惑星が、火星と木星の間にある小惑星帯の中央より内側の軌道を周回しており、他の小惑星と比較して地球に近い軌道を持つためである。普通コンドライト隕石は、全岩の鉄の存在量によって H、L、LL の3種類に分類される。LL コンドライト隕石のうち、あまり熱変成を受けていない Semarkona (LL3.0) は層状ケイ酸塩を含んでいる。この層状ケイ酸塩について、Deloule and Robert (1995) は、他の太陽系物質と比較して高い水素同位体組成 (+4600 ‰? δD ? +3300 ‰) を持つことを示した。また、彼らは、この水素同位体組成の起源が、彗星のような低温領域で形成された氷の値を反映していることを示唆した。S 型小惑星が地球に近い軌道を持っていることから、LL コンドライト隕石の水素同位体組成は、地球近傍領域まで彗星がきたことを裏付ける可能性がある。

そこで普通コンドライト隕石に注目し、比較的熱変成を受けた L コンドライト隕石の Mocs (L5-6) 及び Ensisheim (LL6) に含まれるリン酸塩鉱物(アパタイト及びメリライト)の水素同位体組成を測定した。その結果、Mocs (L5-6) は $\delta D = 0 \pm 100$ ‰で地球の海水と同程度の水素同位体組成を示した。一方、Ensisheim (LL6) は?17000 ‰と非常に高い D/H 比を示した。以上より、普通コンドライト隕石の中でも LL コンドライト隕石は、高い D/H 比を持ち、熱変成度の高い LL コンドライト隕石も D/H 比が大きいと考えられる。しかし、熱変成度の高い普通コンドライト隕石の H₂O 含有量は低い。そのため、バルク分析では吸着水による影響が大きく、他の LL コンドライト隕石も高い D/H 比を持つのかは不明だった。

本研究では、熱変成度の異なる4つの LL コンドライト隕石に含まれるリン酸塩鉱物について、二次イオン質量分析計 (SIMS) を用いた局所同位体分析により地球の水による汚染の影響を少なくして水素同位体組成を測定した。

本研究では、LL4-6 に分類されている自然史博物館所有の普通コンドライト隕石 (Soko-Banja (LL4)、Tuxtuac (LL5)、Bandong (LL6)、Ensisheim (LL6)) の岩石薄片を用いた。リン酸塩鉱物の探索及び定量分析には、熱電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM JEOL JSM 7000-F) 及びエネルギー分散型 X 線検出器 (EDS Oxford INCA Energy) を用いた。また、リン酸塩鉱物の H₂O 定量及び水素同位体分析には、二次イオン質量分析装置 (Cameca ims-1270 SIMS) を用いた。

リン酸塩鉱物の H₂O 含有量は、どのサンプルでも 100 ppm 以下という値を示した。水素同位体組成はいずれも重水素に富んでおり、かつ、サンプル毎に異なっていた。特に Ensisheim (LL6) のリン酸塩鉱物の δD 値は、最大で 23000 ‰という他の太陽系物質と比較しても非常に高い D/H 比を示した。

Soko-Banja (LL4) 及び Tuxtuac (LL5) のリン酸塩鉱物の高い D/H 比は金属鉄と水との酸化反応により生成する水素ガスの散逸により説明可能である。しかしながら、Ensisheim (LL6) 及び Bandong (LL6) のリン酸塩鉱物の非常に大きい D/H 比は、この反応による説明が難しい。したがって、LL6 の水素同位体組成の成因は、変成後に彗星のような他の天体によりもたらされたことを示唆していた。

キーワード: 水素同位体, 二次イオン質量分析計, リン酸塩鉱物, アパタイト

Keywords: Hydrogen isotope, SIMS, phosphate, apatite

異なるCa/Ti比をもつペロブスカイトの酸素拡散挙動 Oxygen diffusion in perovskite with different Ca/Ti ratio

橋口 未奈子^{1*}; 坂口 勲¹; 廣瀬 左京²; 大橋 直樹¹
HASHIGUCHI, Minako^{1*}; SAKAGUCHI, Isao¹; HIROSE, Sakyō²; OHASHI, Naoki¹

¹(独)物質・材料研究機構, ²(株)村田製作所

¹National Institute for Materials Science (NIMS), ²Murata Manufacturing Co., Ltd.

<はじめに> 炭素質コンドライト隕石中のCa, Alに富む難揮発性包有物(CAI)は、太陽系で最も古い年代を示す岩石であり、メリライト、スピネル、アノーサイト、ペロブスカイト(CaTiO₃)などの鉱物から構成される。CAI鉱物は、三酸素同位体図上において質量に依存しない傾き1の直線に沿う分別を示す[Clayton et al. (1973)]ことから、初期太陽系内の酸素同位体環境の情報を保存していると考えられ、議論が行われている[Yurimoto et al. (1998); Itoh and Yurimoto (2003); Katayama et al. (2012); Park et al. (2012)]。そして、CAI鉱物は、星雲中や隕石母天体上で熱による変成を経験していると考えられるため、鉱物の酸素拡散挙動を理解する必要がある。

ペロブスカイトは他のCAI鉱物よりも数桁大きい酸素拡散係数を示す[Gautason and Muehlenbachs (1993); Ryerson and McKeegan (1994); Sakaguchi and Haneda (1996)]。そのため、ペロブスカイトの酸素同位体組成は、CAI鉱物の酸素拡散挙動を理解する手がかりとなる[Ito et al. (2004); Park et al. (2012)]。しかし、ペロブスカイトの酸素拡散係数の報告例は少なく、また、先行研究の報告値には約1桁の違いがある。本研究では、酸素拡散挙動を変化させる要因としてペロブスカイトのCa/Ti比に着目し、Ca/Ti比の異なるペロブスカイトの酸素拡散係数を求めるため、¹⁸Oをトレーサーとしたガス-固体間の同位体拡散実験を行った。

<実験手法> 高純度のCaCO₃, TiO₂粉末を出発物質とし、Ca/Ti比が0.098-1.002の混合粉末を作成した。部分安定化ジルコニア(PSZ)ボールを用いたボールミル粉碎を行った後、粉末をシート状に成形し、大気中1350℃で2時間焼成し、Ca/Ti比の異なるペロブスカイト多結晶を得た。但し、ボールミル粉碎時にZrO₂が混入する可能性があるため、Ca/Ti比は粉末混合時から約0.001-0.0015ずれると考えられる。

試料は、機械研磨による鏡面仕上げ後、研磨ダメージを除去するため、大気中1200℃で1時間アニールを行った。さらに、¹⁸O₂ガス中において、750-1050℃温度下で数時間アニールさせ、二次イオン質量分析装置(Cameca ims-4f)を用いて¹⁸O濃度プロファイルを取得し、酸素拡散係数を求めた。

<結果と議論> Tiに富むペロブスカイト多結晶では、再表面から始まる拡散(拡散A)、数100nmの深さから始まる拡散(拡散B)の存在が確認された。再表面と数100nmにおける二次イオン像において、¹⁸O⁻は粒子状に分布しており、2つの拡散はどちらも体積拡散であると考えられる。Caに富むペロブスカイトでは、このような2つの拡散パスは見られなかった。拡散A, Bどちらにおいても、ペロブスカイトの酸素体積拡散係数はCa/Ti比によって異なることが分かった。950℃大気圧下における拡散係数は、Ca/Ti比を1.002として焼成した試料では 7×10^{-10} cm²/s, Ca/Ti比を0.098として焼成した試料では、 7×10^{-13} cm²/s(拡散A), 1×10^{-11} cm²/s(拡散B)であり、全ての試料の拡散係数は、先行研究の報告値[Gautason and Muehlenbachs (1993); Sakaguchi and Haneda (1996)]より大きい値であった。

炭素質コンドライト隕石のCAIにおいて、¹⁶Oに乏しいペロブスカイト[Ito et al. (2004)]と¹⁶Oに富むペロブスカイト[Park et al. (2012)]が報告されている。前者は、熱変成で酸素同位体組成が変化したものであると考えられ、一方、後者は熱変成を逃れたものであると考えられている。拡散係数の大きさから、ペロブスカイトの酸素同位体組成は、CAIが最終的に経験した熱履歴を反映していると考えられ、本研究の結果から、熱拡散によってペロブスカイトの酸素同位体組成が変動するタイムスケールは、これまで考えられていたよりも短時間である可能性がある。また、ペロブスカイトの酸素拡散挙動を理解するためにはCa/Ti比を調べる必要があることが分かった。

今後、NanoSIMSを用いた分析を行い、ペロブスカイトのCa/Ti比が酸素拡散挙動を変化させるメカニズム、およびTiに富むペロブスカイトに2つの拡散(A, B)が見られた原因を解明していきたいと考えている。

キーワード: ペロブスカイト, 酸素拡散
Keywords: Perovskite, Oxygen diffusion

低い Al/Mg 比を示す FUN ヒボナイト包有物の発見 Newly identified hibonite-bearing FUN inclusions with low Al/Mg ratios

福田 航平^{1*}; 比屋根 肇¹; 佐々木 翔吾¹; 三河内 岳¹; 藤谷 涉²; 高畑 直人³; 佐野 有司³; 森下 祐一⁴
FUKUDA, Kohei^{1*}; HIYAGON, Hajime¹; SASAKI, Shogo¹; MIKOUCHI, Takashi¹; FUJIYA, Wataru²; TAKAHATA,
Naoto³; SANO, Yuji³; MORISHITA, Yuichi⁴

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² マックスプランク化学研究所, ³ 東京大学大気海洋研究所, ⁴ 静岡大学大学院理学研究科
¹Graduate School of Science, The Univ. of Tokyo, ²Max Planck Institute for Chemistry, ³AORI, The Univ. of Tokyo, ⁴Graduate
School of Science, Shizuoka Univ.

難揮発性包有物の一種である FUN(Fractionation and Unknown Nuclear effects) やヒボナイト (CaAl₁₂O₁₉) 包有物は、カルシウムやチタンの安定同位体に異常を示すものや消滅核種 ²⁶Al の壊変起源である ²⁶Mg の過剰が確認されないものが存在する。安定同位体に異常を示すことから、これらの包有物は同位体均一化が完了していない時期、つまりは初期太陽系の進化過程における最初期段階に形成したことが伺える。また、²⁶Al の痕跡が確認されないことは、これらの包有物が、恒星起源の ²⁶Al が太陽系に持ち込まれる前、もしくは太陽系内の ²⁶Al の分布が均一化される前に形成された可能性を示唆する。従って、FUN 包有物やヒボナイト包有物に関する研究は、太陽系最初期の進化史を紐解く上で重要である。

本研究では太陽系最初期の物質進化、特に同位体均一化プロセスに制約を与えることを目的とし、Murchison 隕石から分離した3つのヒボナイト包有物に対して二台の二次イオン質量分析計 (Cameca ims-1270, NanoSIMS 50) を用いたマグネシウム、カルシウム、チタン、および酸素同位体分析を行った。Al-Mg および Ca, Ti 同位体分析の結果、大きな質量依存同位体分別 (~55 ‰/amu) と初生 ²⁶Al/²⁷Al 比がゼロ、さらに Ca および Ti の安定同位体に有為な異常 (~1%) をもつ、FUN ヒボナイト包有物を3つ (MC037, MC040, MC003) 発見した。これはつまり3つの包有物が物質混合過程継続中に形成した可能性を示す結果である。また、本研究において見つかった FUN 包有物中のヒボナイトは、従来報告されていたそれに比べて Al/Mg 比が非常に小さい。特に MC040 に関しては報告されている中でも最大級の同位体分別を示したのにも関わらず、Al/Mg 比はそれらに比べて1~2桁小さい。これは、従来報告されていた FUN ヒボナイト包有物に比べ、3つの FUN 包有物の前駆物質がより Mg に富んでいた可能性を示唆する。また、酸素同位体組成は $\Delta^{17}\text{O} = \sim -23\text{‰}$ の質量依存同位体分別直線上にプロットされた。従って、3つの包有物の前駆物質は一般的な難揮発性包有物である CAI と同等の組成 ($\delta^{17,18}\text{O} = \sim -50\text{‰}$) を持っていたことが明らかとなった。さらに、組織観察の結果、急冷された構造を示すものがあり、形成時の加熱・冷却過程に新たな制約を与える可能性がある。FUN 包有物の形成過程には現段階でも不明な点が多いが、本研究によって前駆物質の組成ならびに同位体異常の程度、また加熱・冷却過程についてさらなる多様性が確認された。

キーワード: FUN 包有物, ヒボナイト, 二次イオン質量分析計, マグネシウム同位体, カルシウムおよびチタン同位体, 酸素同位体

Keywords: FUN inclusion, hibonite, ion microprobe, Mg isotopes, Ca and Ti isotopes, oxygen isotopes

NWA 3118 (CV) 隕石 igneous rim 中の O-16 に富むオリビン O-16-rich olivine in igneous rim from NWA 3118 (CV)

松田 望^{1*}; 坂本 直哉²; 坂本 尚義³
MATSUDA, Nozomi^{1*}; SAKAMOTO, Naoya²; YURIMOTO, Hisayoshi³

¹ 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻, ² 北海道大学創成研究機構, ³ 北海道大学理学研究院自然史科学部門
¹Natural History Sciences, Hokkaido University, ²CRIS, Hokkaido University, ³Natural History Sciences, Hokkaido University

隕石中の主要構成物である難揮発性包有物 (CAI) およびコンドリュールは、質量に依存しない酸素同位体異常を持つ (Clayton, 1993). 一般に CAI は O-16 に富み、コンドリュールは O-16 に乏しいと考えられてきた. 近年, CR2 コンドライト隕石のコンドリュールリムから O-16 に富むオリビン粒子の存在が報告され始めており (Takeda et al., 2002; Nagashima et al., 2013), コンドリュール形成場に存在していたコンドリュール前駆物質の酸素同位体の情報を保持している可能性が示唆される. また, コンドリュールリムの O-16 に富むオリビンは CR2 以外にもどれくらい分布しているのか知られていない. 本研究では, 岩石学的記載および同位体顕微鏡を用いた酸素同位体イメージングにより CV3 コンドライト隕石のコンドリュールリムの O-16 に富む物質の分布を明らかにすることを目的とした.

試料には, NWA 3118 (CV3) 中のコンドリュールを用いた. 組織観察および化学組成分析は FE-SEM-EDS (JEOL JSM-7000F; Oxford X-Max 150) を, 結晶方位解析には EBSD システム (Oxford HKL) を用いた. 酸素同位体イメージは同位体顕微鏡 (Cameca ims-1270 + SCAPS) を用いた.

観察したコンドリュールは, 直径約 1.4 ミリメートルの Mg-rich (タイプ I) porphyritic コンドリュールである. コンドリュールは Mg に富むオリビン, low-Ca 輝石および長石質なメソスタシスで構成されている. コンドリュールリムは火成作用を経験したと考えられる岩石学的特徴を示し, 最大 400 マイクロメートルの幅を持ち, コンドリュール全体を囲んでいる. コンドリュールリムは Fe に富むオリビンが主成分鉱物であり, low-Ca 輝石, High-Ca 輝石および硫化鉱物が存在する. この Fe に富むオリビン粒子は Fe-Mg の化学組成ゾーニングが認められ, 隕石母天体上で起こった変成作用により Fe 成分が固体拡散によって Mg と交換したものと考えられる.

酸素同位体イメージングの結果, リム中に O-16 に富むオリビン粒子を 7 個発見した. サイズは, 10-30 マイクロメートルであった. さらに, O-16 に富む領域は粒子全体ではなく, 一部分だけであり, O-16 に乏しいオリビンに囲まれていることが分かった. また, 酸素同位体の不均質分布と化学組成分布は一致していなかった. これらの観察結果は, O-16 に富むオリビンを核として O-16 に乏しいオリビンがオーバーグロースしたことを示す.

CV コンドライト隕石のコンドリュールリムにも O-16 に富むオリビンが存在することから, コンドリュール形成領域に O-16 に富む物質および O-16 に乏しい物質の両方が存在していたことが示唆される.

キーワード: コンドリュールリム, コンドリュール, 酸素同位体組成, 炭素質コンドライト, SIMS
Keywords: chondrule rim, chondrule, oxygen isotopes, carbonaceous chondrite, SIMS

コンドリュールの内部組織とその成因 Internal structure of chondrules and their possible origin

高橋 栄一^{1*}; 中本 泰史¹
TAKAHASHI, Eiichi^{1*}; NAKAMOTO, Taishi¹

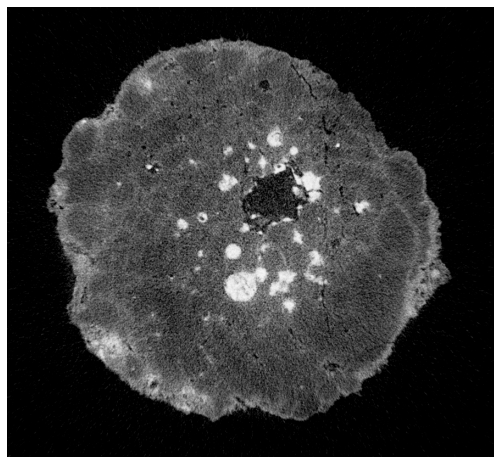
¹ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻
¹Earth & Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

In order to clarify 3D shapes and internal structure of chondrules in Allende chondrite, we have separated 180 chondrules grains and investigated them with X-ray CT apparatus (Scan Xmate-D180RSS270) recently installed at the Museum of Natural History, Tohoku University (Tsuda et al., JPGU 2013). We also developed an optical device to measure 3D shape of chondrules or other spherical objects (Nishida et al. JPGU 2013). Our results revealed that chondrules shapes show wide distribution consisting of true spheres, prolate-spheres and oblate-spheres. Chondrules with porphyritic textures distribute in all shape categories. Chondrules with barred olivine texture (quenched from super-heated melt) show a distribution between true sphere and oblate-shape. Implication of the 3D shapes and internal texture of chondrules are consistent with the shock-wave heating model (e.g., Miura & Nakamoto, 2002, 2008).

Due to the density contrast, textures of Fe-FeS phase are most easily observed by X-ray tomography. By melting, coagulation and growth of Fe-FeS phase occur in chondrules. In some chondrules, coagulation resulted in mini-core formation (driven by surface energy minimization, see Fig.1). It is suggested that duration of heating episodes could be estimated by coagulation textures of Fe-FeS. If chondrules were formed by shock heating mechanism (e.g., Miura & Nakamoto, 2002, 2008), separation of molten silicate and coagulated Fe-FeS droplets would have taken place during acceleration and slow down of chondrules. Accordingly, significant chemical fractionation took place by dynamic processes during chondrules formation.

In X-ray CT images, many chondrules are surrounded by 50-200 micron thick rims. Coagulation and growth of Fe-FeS grains are observed in chondrules-rims as well as inside of chondrules indicating that temperature may have exceeded ~1000C (eutectic point in the Fe-FeS) in the chondrule-rims. The common appearance of growth texture of Fe-FeS grains supports high-temperature origin of chondrule-rims rather than metasomatic origin. Clear textural distinction between chondrules and their ambient rims may correspond with presence or absence of melting in silicates. Most abundant element that volatilized below 1000C is sulfur. It is suggested that sulfur would have acted as a glue to coagulate dust particles onto molten droplets (chondrules) during shock heating episodes.

キーワード: 隕石, コンドリュール, 組織, 起源, X線トモグラフィー
Keywords: meteorite, chondrule, texture, origin, X-ray CT



加熱・急冷実験による溶融微小隕石の再現 Artificial cosmic spherules produced by heating and quenching experiments

権藤 貴明^{1*}; 磯部 博志¹
GONDO, Takaaki^{1*}; ISOBE, Hiroshi¹

¹ 熊本大学大学院自然科学研究科理学専攻

¹ Grad. Sch. Sci. Tech., Kumamoto Univ.

隕石には、我々人類が地球上で得られる最も古い、かつ最も始原的な惑星物質が含まれている。隕石のうちセンチメートルサイズ以下の微小な粒子を特に、微小隕石 (MMs: micrometeorites) という。地球に飛来する微小隕石の総量は、隕石物質よりも圧倒的に多く、年間約3万トンが地球に落下集積しており、そのバリエーションも非常に豊富である。そのため、微小隕石は太陽系の始原的物質の研究を行う上で非常に重要である。微小隕石は、地球に飛来する際、大気圏において急激に加熱され、その後急冷される。その熱履歴は、微小隕石の速度、入射角及び質量に依存する。

地表に到達する通常の隕石は、加熱された部分はアブレーションによって失われ、溶融皮殻より内側の岩石内部は加熱の影響を受けていないため母天体の情報を保持している。しかし、微小隕石では粒子が非常に小さいために、加熱の影響が粒子内部に及んでいる可能性がある。そのため、採集された微小隕石内部がどの程度の加熱の影響を受けているのかを知ることは、地球落下前の微小隕石本来の性質を知る上で重要である。

そこで、本研究では、大気加熱による溶融を受けたと考えられる典型的な微小隕石の粒径である、直径 100 μm 程度の粒子について、大気突入の際の加熱・冷却過程の再現を試みた。実験には、Allende 隕石 (CV3)、Murchison 隕石 (CM2)、Zag 隕石 (H コンドライト) を用いた再現実験を行った。そして、それら実験生成物と天然の微小隕石とを比較し加熱による微小隕石への影響と、その起源物質についての検討を行った。

実験の結果、それぞれの出発物質ごとでそれぞれ異なるバリエーションに富む粒子が観察された。実験生成物の観察においては、完全に溶融し球形になった粒子 (微小隕石の中で特に cosmic spherules と呼ばれるもの) に相当する球形の粒子に注目し観察を行った。それぞれ隕石物質を用いた実験において Cryptocrystalline S-type spherules や Barred olivine spherules, Porphyritic olivine spherule など天然の cosmic spherules で報告されている組織に非常に似た粒子の再現に成功した。これにより、地球軌道近傍に存在する惑星間微小物質について、その起源を推定することが可能である。

キーワード: 微小隕石, 炭素質コンドライト, H コンドライト, 大気加熱, コスミックスフェルール
Keywords: micrometeorite, carbonaceous chondrite, H chondrite, atmospheric heating, cosmic spherule

コンドリュール及びCAI微細組織の再現実験: 還元ガス浮遊法によるアプローチ Experimental reproduction of microtextures of chondrules and CAIs by reducing-gas levitation technique

瀬戸 雄介^{1*}; 市村 隼¹; 松野 淳也²; 高橋 竜平²; 土山 明²; 小原 真司³

SETO, Yusuke^{1*}; ICHIMURA, Shun¹; MATSUNO, Junya²; TAKAHASHI, Ryohei²; TSUCHIYAMA, Akira²; KOHARA, Shinji³

¹ 神戸大学・院・理, ² 京都大学・院・理, ³ 高輝度光科学研究センター

¹Kobe Univ. Sci., ²Kyoto Univ. Sci., ³JASRI

Chondrules are the most abundant component in chondrites. They are mm-sized round (or irregularly) shaped particles mainly composed of silicates, which formed by the rapid cooling of droplets of molten or partially molten rock in space before they accreted. They show unique and diverse internal micro-textures (e.g., porphyritic olivine, barred olivine, radial pyroxene, etc.), even if they have same bulk compositions. These internal textures, therefore, should reflect not only starting material compositions, but also nebular conditions, such as gas species and their partial pressures, heating and cooling rate. CAIs are another major component in chondrites, which are also known to show the evidence of molten and quenching textures. The conditions of chondrule formation, however, remain poorly constrained, because the reproduction of the chondrule formation processes in a laboratory is experimentally difficult, especially in terms of container-less arrangement and reducing (low- fO_2) ambient. In the present study, we conducted gas-levitation and laser heating experiments in order to reproduce micro-textures of chondrules and CAIs, and constrain their formation conditions.

As starting materials, we used (i) natural olivine (FO_{90}) from San Carlos, USA, (ii) matrices of Murchison CM meteorite, and (iii) mixed compounds of melilite ($Ca_2Al_2SiO_7$) + spinel ($MgAl_2O_4$) which are analogue to CAIs. The molten-quenched droplets of these samples were obtained using the gas-levitation and laser-heating experiments, which avoided both contamination of the molten samples and heterogeneous nucleation by crucible surfaces, at SPring-8 BL04B2. 1-2 mm-sized droplets were heated by a continuous-wave CO_2 laser, and were levitated in 96% Ar + 4% H_2 gas to achieve reducing ambient. The temperature during heating was monitored by a pyrometer. Surfaces and internal textures of the recovered samples were analyzed using SEM-EDX and -EBSD (JEOL, JSM-6480LAI and JSM-7100F).

(i) As a result of experiments using San Carlos olivine, olivine was re-crystallized under any condition. They show micro-porphyritic texture consisting of fine grained (1 to 5 μm) olivine, which are equal in composition to the starting material. Magnetite (Fe_3O_4) or hematite (Fe_2O_3) was completely absent, which suggests the low fO_2 (at least MFQ buffer) was maintained during the present experiments. (iii) The recovered sample of Murchison CM chondrite shows barred-olivine like texture. The platy (10 μm thickness) olivine crystals (Fa_{20-40}) are embedded in a FeO-SiO₂-rich glass. Idiomorphic fine (1 μm) magnetite are also observed in the glass. EBSD analyses revealed that most of the olivine plates are normal to b-axis, and the crystallographic orientations in a parallel platelet domain are identical. (iii) As a result of experiments using melilite and spinel compounds, dendritic spinel was always crystallized from surfaces to core irrespective of sample size and cooling rates, and they are embedded in Al-rich glass phase. The demonstrations of the present study show that reducing-gas levitation experiments is a powerful technique to simulate the molten-quenched texture of early solar materials.

キーワード: コンドリュール形成, 溶融急冷組織, 結晶成長, 無容器加熱法, 棒状オリビン

Keywords: Chondrule formation, Molten-quenched texture, Crystal growth, Containerless heating, Barred olivine

NWA1232 CO3 隕石中の熱変成度の異なる岩片を含む岩相 A unique lithology in the NWA 1232 CO3 chondrite containing clasts of different meta- morphologic grades

松本 恵^{1*}; 留岡 和重²; 瀬戸 雄介²; 山本 由紀子²; 梅原 まり子²; 三宅 亮³; 浜根 大輔⁴

MATSUMOTO, Megumi^{1*}; TOMEOKA, Kazushige²; SETO, Yusuke²; YAMAMOTO, Yukiko²; UMEHARA, Mariko²; MIYAKE, Akira³; HAMANE, Daisuke⁴

¹ 神戸大学研究基盤センター, ² 神戸大学大学院理学研究科, ³ 京都大学大学院理学研究科, ⁴ 東京大学物性研究所

¹CSREA, Kobe Univ., ²Graduate School of Science, Kobe Univ., ³Graduate School of Science, Kyoto Univ., ⁴ISSP, Tokyo Univ.

Northwest Africa 1232 (NWA 1232) is a CO3 carbonaceous chondrite consisting of three lithologies (A, B, and C) that went through different thermal histories [1,2]. Kiriishi et al. [3] found that lithology A contains many small clasts (100-400 micron in diameter) scattering throughout the lithology. These small clasts typically consist of one chondrule surrounded by matrix and show little evidence of thermal metamorphism. Such unique lithology has not been known in other CO3 chondrites and potentially provides new insights into the formation of CO3 chondrites. Here we report the results of detailed mineralogical and petrological study of NWA 1232. The study was performed using SEM-EDS, TEM (STEM)-EDS, EPMA, and SR-XRD.

The thin section of NWA 1232 studied consists of lithologies A (738 mm²), B (624 mm²), and C (196 mm²) that are separated by sharp boundaries. In lithology C, olivine phenocrysts in type I chondrules have relatively homogeneous compositions (Fa₃₋₁₃) and exhibit weak Fe-Mg zoning; these correspond to metamorphic grade 3.4. The matrix consists mainly of fine grained (100-500 nm in diameter) olivine that is relatively homogeneous in composition (~Fa₆₀). In lithology B, olivine phenocrysts are more Fe-rich (Fa₁₉₋₄₂) and exhibit distinct Fe-Mg zoning; these correspond to metamorphic grade 3.7. The matrix is mainly composed of relatively coarse-grained (>500 nm in diameter) olivine that is very homogeneous (~Fa₄₀).

In contrast, chondrules and matrix in lithology A exhibit considerable chemical and textural diversities. Olivine phenocrysts in chondrules vary widely in composition from Fa₁ to Fa₄₃. Most of Mg-rich olivine phenocrysts in Mg-rich chondrules show almost no Fe-Mg zoning; these are similar to those in CO 3.0 chondrites. Their surrounding matrix consists mainly of very fine-grained Mg-Si-Fe-rich amorphous material. On the other hand, most of Fe-rich phenocrysts in Fe-rich chondrules show distinct Fe-Mg zoning and their surrounding matrix consists mainly of coarse-grained (>500 nm in diameter) Fe-rich (~Fa₄₀) olivine; these are similar to those in highly metamorphosed CO 3.7 chondrite. There are also many other chondrules whose olivine phenocrysts have compositions intermediate between the Mg-rich and Fe-rich olivines described above. The matrix surrounding these chondrules mainly consist of fine-grained (100-500 nm in diameter) Fe-rich olivine similar to those mildly metamorphosed CO chondrites.

The chemical and textural heterogeneities observed in lithology A cannot be explained by thermal metamorphism of a single lithology. The results suggest that lithology A is composed of many clasts that underwent various degrees of thermal metamorphism in different locations of the parent body. The results further imply that CO chondrites had once experienced various degrees of thermal metamorphism in different locations in the parent body and subsequently went through extensive brecciation and mixing.

References: [1] Kiriishi and Tomeoka (2008), JMPS, 103, 161?165. [2] Umehara et al. (2009), JAMS Annual Meeting (abstract). [3] Kiriishi et al. (2009), JAMS Annual Meeting (abstract).

キーワード: CO chondrite, thermal metamorphism, brecciation, clast, chondrule, matrix

Keywords: CO chondrite, thermal metamorphism, brecciation, clast, TEM, SR-XRD

Allende 隕石の水熱変成実験：隕石母天体の水質環境の解明を目指して Hydrothermal alteration experiments of the Allende meteorite

飯国 恒之^{1*}; 留岡 和重¹; 瀬戸 雄介¹
IIKUNI, Tsuneyuki^{1*}; TOMEOKA, Kazushige¹; SETO, Yusuke¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科

¹ Graduate school of Science, Kobe University

はじめに: 炭素質コンドライトは、化学的・年代学的に最も始原的な物質であると考えられる一方で、それらの多くは隕石母天体上で水や熱による変成を受けた痕跡を残している。特に水と岩石の相互作用は微惑星の初期物質進化を支配した重要な変成作用と考えられている。水質変成によって生成される二次鉱物は隕石の化学的タイプごとに異なり、このことは隕石母天体の水質環境(温度、変成期間、pH、水/岩石比、酸素分圧など)の違いを反映していると考えられる。これまで、炭素質コンドライトの主要構成鉱物であるカンラン石や輝石に関しては、水質変成実験が行われ、溶液種や pH と生成鉱物の関係について報告されている #1-#2。一方、実際の炭素質コンドライトを用いた研究例 #3 は少ない。本研究では、炭素質コンドライトの中でも水による変成程度が低い CV3 タイプの Allende 隕石を出発物質として、炭素質コンドライト母天体を模擬した条件下で、水熱変成実験を行った。

実験: 出発物質として Allende 隕石をブロック状 (2.5 mm × 2.5 mm × 6 mm) にカットしたものを用いた。反応溶液は過去の研究例 #4 を参考にして、H₂O (pH 7)、 3.1×10^{-6} N-NaOH (pH 8.5)、 1.0×10^{-4} N-NaOH (pH 10)、1N-NaOH (pH 14) を用いた。溶液/岩石体積比 (W/R) は母天体環境として考えうる 0.5 #5, 2, 8 とした。試料容器としてステンレス製の耐圧容器に封入した PTFE 容器のダブルカプセル (外容器: 25 ml, 内容器: 1 ml) を用いた。外容器に塩酸と等しいモル量のマグネジウムおよび鉄を導入し、H₂ ガスを発生させることで試料室内を還元雰囲気にした。変成実験は、すべて温度 200 °C、圧力約 15 気圧 (200 °C での水の飽和蒸気圧)、時間 168 時間の条件下で行った。回収試料は、放射光 X 線回折装置 (SR-XRD) を用いて結晶相同定を行い、走査型電子顕微鏡 (SEM-EDX) を用いて微細組織の観察および組成分析を行った。

結果と考察: pH 7 かつ W/R:0.5 の条件を除いたすべての条件でマトリックス中にサーペンティンが生成していることが確認された。サーペンティンはマトリックス中のオリビンの隙間を充填するように生成しており、pH が高くなるほどサーペンティンの生成量が大きくなる傾向が見られた。また、強塩基 (pH 14) かつ低 W/R 比 (0.5) の条件ではスメクタイトの生成も確認された。ほぼすべての条件で、試料表面に Calcite (CaCO₃) が生成しており、H₂O (pH 7) を用いた実験でのみ Anhydrite (CaSO₄) が生成していた。Allende 隕石を出発物質として用いた本研究の結果は、カンラン石や輝石を出発物質として用いた過去の研究と比べて、比較的低温かつ中性溶液条件でも十分に含水鉱物化が進行することを示している。

#1 Ohnishi and Tomeoka (2007) MPS, 42, 49-61. #2 Iishi and Han (2000) Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Monatshefte 2:49-59. #3 Jones and Brearley (2006) GCA, 70, 1040-1058. #4 Zolensky et al. (1989) Icarus, 78, 411-425. #5 Clayton and Mayede (1998) GCA, 63, 2089-2104.

キーワード: 炭素質コンドライト, 水熱変成実験, 含水鉱物, Allende

Keywords: carbonaceous chondrite, hydrothermal experiments, hydrated minerals, Allende

電子線ホログラフィーによるフランボイダルマグネタイトの磁場構造と生成過程の 解明 Electron Holography Reveals Nanometer Scale Magnetic Structure of Framboidal Mag- netite and its Formation Process

木村 勇気^{1*}; 佐藤 岳志²; 中村 智樹¹; 中村 教博¹; 野澤 純³; 塚本 勝男¹; 山本 和生⁴
KIMURA, Yuki^{1*}; SATO, Takeshi²; NAKAMURA, Tomoki¹; NAKAMURA, Norihiro¹; NOZAWA, Jyun³; TSUKAMOTO,
Katsuo¹; YAMAMOTO, Kazuo⁴

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ² (株) 日立ハイテクノロジーズ, ³ 東北大学金属材料研究所, ⁴ ファインセラミックスセンター

¹Tohoku University, ²Hitachi High-Technologies Corporation, ³Tohoku University, ⁴Japan Fine Ceramics Center

Small solar system bodies were formed as agglomerates of dust and ices 4.6 billion years ago. Several million years after asteroid formation [1], the ice melted due to radioactive heating inside the larger asteroids [2] and/or highly energetic impacts [3]. Then, water plays several major roles in the chemistry of asteroids, both in mineralization and in the formation of organic compounds. Currently, bulk liquid water no longer exists in meteorites. We see only the signature of water in ancient asteroids as veins of hydrothermally deposited minerals [4] or water trapped in salt crystals [5] in meteorites. The Tagish Lake meteorite, which is a unique Type 2 carbonaceous chondrite, has a signature of aqueous process in the matrix that is abundant micrometer-sized polyhedral particles of magnetite [6]. The framboids are three-dimensionally ordered colloidal crystals of magnetite nanoparticles. The uniformity of the size distribution and the similar morphology of the magnetite nanoparticles in each of the colloidal crystals suggest that they were formed through homogeneous nucleation from a highly supersaturated isolated solution in a single nucleation event.

Here we show evidence of how magnetite nanoparticles assembled into periodic structures based on a nanometer scale paleomagnetic method using electron holography in an examination of the framboidal magnetite in the Tagish Lake carbonaceous chondrite [7]. An attractive force such as magnetism never contributes to the formation of colloidal crystals [8], but the repulsive force caused by the surface charge of the magnetite is able to work. To overcome the repulsive force, the density of magnetite nanoparticles in a solution must be sufficiently high in an isolated solution as a water droplet parches in microgravity. We used electron holography to visualize the magnetization of the meteoritic minerals for the first time and found that magnetite grains in the framboid have no external magnetic force, i.e., they have a flux-closure vortex structure, which allowed the formation and preservation of the colloidal crystals. We conclude that these framboids formed in tiny water droplets with pH of 7-12 containing ions such as Ca²⁺ and Mg²⁺ at levels of 10⁻¹⁴-10⁻¹⁵ mol m⁻², just before exhaustion of water during thermal alteration in a hydrous asteroid.

[1] Fujiya, W., Sugiura, N., Hotta, H., Ichimura, K. & Sano, Y. Evidence for the late formation of hydrous asteroids from young meteoritic carbonates. *Nature Communications* **3**, 627 (2012).

[2] Endress, M., Zinner, E. & Bischoff, A. Early aqueous activity on primitive meteorite parent bodies. *Nature* **379**, 701-703 (1996).

[3] Rubin, A. F. Collisional facilitation of aqueous alteration of CM and CV carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **90**, 181-194 (2012).

[4] Tomeoka, K. Phyllosilicate veins in a CI meteorite: evidence for aqueous alteration on the parent body. *Nature* **345**, 138-140 (1990).

[5] Zolensky, M. E. *et al.* Asteroidal water within fluid inclusion-bearing halite in an H5 chondrite, Monahans (1998). *Science* **285**, 1377-1379 (1999).

[6] Nozawa, J. *et al.* Magnetite 3-D Colloidal Crystals Formed in the Early Solar System 4.6 Billion Years Ago, *Journal of the American Chemical Society* **133**, 8782-8785(2011).

[7] Kimura, Y. *et al.* Vortex magnetic structure in framboidal magnetite reveals existence of water droplets in an ancient asteroid, *Nature Communications*, **4** (2013) 2649 doi: 10.1038/ncomms3649.

[8] Philipse, A. P. & Maas, D. Magnetic colloids from magnetotactic bacteria: chain formation and colloidal stability. *Langmuir* **18**, 9977-9984 (2002).

キーワード: マグネタイト, 電子線ホログラフィー, タギシュレイク隕石
Keywords: Magnetite, Electron holography, Tagish Lake meteorite

C-XANES analyses of carbonaceous solid inclusions from Monahans halite C-XANES analyses of carbonaceous solid inclusions from Monahans halite

癸生川 陽子^{1*}; Zolensky Michael²; Kilcoyne David³; Rahman Zia⁴; Fries Marc²; Cody George⁵
KEBUKAWA, Yoko^{1*}; ZOLENSKY, Michael²; KILCOYNE, David³; RAHMAN, Zia⁴; FRIES, Marc²; CODY, George⁵

¹北海道大学 大学院理学研究院 自然史科学専攻 地球惑星システム科学, ²NASA Johnson Space Center, ³Lawrence Berkeley National Laboratory, ⁴Jacobs-Sverdrup, ⁵Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington

¹Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, ²NASA Johnson Space Center, ³Lawrence Berkeley National Laboratory, ⁴Jacobs-Sverdrup, ⁵Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington

Monahans meteorite (H5) contains fluid inclusion-bearing halite (NaCl) crystals [1]. Microthermometry and Raman spectroscopy showed that the fluid in the inclusions is an aqueous brine and they were trapped near 25°C [1]. Their continued presence in the halite grains requires that their incorporation into the H chondrite asteroid was post metamorphism [2]. Abundant solid inclusions are also present in the halites. The solid inclusions include abundant and widely variable organics [2]. Analyses by Raman microprobe, SEM/EDX, synchrotron X-ray diffraction and TEM reveal that these grains include macromolecular carbon similar in structure to CV3 chondrite matrix carbon, aliphatic carbon compounds, olivine (Fo₉₉₋₅₉), high- and low-Ca pyroxene, feldspars, magnetite, sulfides, lepidocrocite, carbonates, diamond, apatite and possibly the zeolite phillipsite [3]. Here we report organic analyses of these carbonaceous residues in Monahans halite using C-, N-, and O- X-ray absorption near edge structure (XANES).

Approximately 100 nm-thick sections were extracted with a focused ion beam (FIB) at JSC from solid inclusions from Monahans halite. The sections were analyzed using the scanning transmission X-ray microscope (STXM) on beamline 5.3.2.2 at the Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory for XANES spectroscopy. C-XANES spectra of the solid inclusions show micrometer-scale heterogeneity, indicating that the macromolecular carbon in the inclusions have complex chemical variations. C-XANES features include 284.7 eV assigned to aromatic C=C, 288.4-288.8 eV assigned to carboxyl, and 290.6 eV assigned to carbonate. The carbonyl features obtained by C-XANES might have been caused by the FIB used in sample preparation. No specific N-XANES features are observed. Various degrees of 1s-σ*exciton shown in the C-XANES spectra indicate that the solid inclusions contain macromolecular carbon which experienced various degree of thermal processing. The natures of the macromolecular carbon in the solid inclusions observed by C-XANES are consistent with the previous studies showing that the solid inclusions have not originated from Monahans parent body [1-3].

References: [1] Zolensky et al. 1999. Science 285: 1377-1379. [2] Fries et al. 2011. 74th MetSoc #5390. [3] Zolensky et al. 2013. 76th MetSoc #5200.

Keywords: C-XANES, Halite, Carbon, Chondrite, Organic matter

イトカワレゴリス粒子の3次元構造：月レゴリス粒子との比較 3D shapes of Itokawa regolith particles: comparison with lunar regolith particles

土山明^{1*}; 松島 亘志²; 松本 徹³; 中野 司⁴; 松野 淳也¹; 島田 玲³; 上杉 健太郎⁵; 竹内 晃久⁵; 鈴木 芳生⁵; 大竹 真紀子⁶; 中村 智樹⁷; 上相 真之⁶; 矢田 達⁶; 西泉 邦彦⁸
TSUCHIYAMA, Akira^{1*}; MATSUSHIMA, Takashi²; MATSUMOTO, Toru³; NAKANO, Tsukasa⁴; MATSUNO, Junya¹; SHIMADA, Akira³; UESUGI, Kentaro⁵; TAKEUCHI, Akihisa⁵; SUZUKI, Yoshio⁵; OHTAKE, Makiko⁶; NAKAMURA, Tomoki⁷; UESUGI, Masayuki⁶; YADA, Toru⁶; NISHIIZUMI, Kunihiko⁸

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 筑波大学システム情報工学研究科, ³ 大阪大学大学院理学研究科, ⁴ 産総研, ⁵ スプリング8, ⁶ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁷ 東北大学大学院理学研究科, ⁸ カリフォルニア大学宇宙科学研究所
¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Graduate School of Systems and Information Engineering, ³Graduate School of Science, Osaka University, ⁴AIST/GSJ, ⁵JASRI/SPring-8, ⁶JAXA/ISAS, ⁷Graduate School of Science, Tohoku University, ⁸Space Sciences Laboratory, University of California

Regolith particles were returned from the surface of asteroid Itokawa by the Hayabusa spacecraft. The sample analysis elucidated a variety of surface processes on the asteroid (e.g., [1]): (1) Formation of regolith by impacts of small objects, with selective escape of the finest-scale particles. (2) Implantation of solar wind into the uppermost particle surfaces and formation of space-weathering rims. (3) Grain abrasion, probably due to seismic-induced particle motion. Processes (5) and (6) might have been repeated. (7) Final escape of particles from the asteroid by impact within the past 8 million years (1-3 million years [3]).

During the course of the analysis, 3D size and shape features of the Itokawa particles were obtained by SR-based x-ray microtomography to understand the origin and evolution of the regolith particles on Itokawa's surface [2,3]. In particular, the particle shape distribution with respect to their three-axial ratios was obtained and compared with that of fragments formed by high-speed impact in laboratory experiments [4,5] and of lunar regolith samples [6]. The 3D shapes of the lunar samples have been examined by tomography [6] but not grain-by-grain as performed for the Itokawa samples. In addition, the procedure for measuring the three axial lengths was different between the regolith particles and the impact fragments: the former was obtained from 3D external particle shapes by ovoid approximation [2,3,6], while the latter by bounding box method using a calliper [4,5]. In order to make strict comparison between them, lunar regolith particles were examined by the same method as the Itokawa particles, and the three axial lengths were measured from the tomography data by bounding box method that was newly developed in the present study.

The 3D shapes of 70 particles from 105-250 μm sieved fraction of Descartes highland (60501) and 74 particles from <1 mm sieved fraction of Mare Tranquillitatis (10084) were obtained by microtomography at BL47XU of SPring-8. Furthermore, the 3D shapes of new 24 Itokawa particles (3 of them are from Dr. M. Meier, personal communication) were also examined in addition to the previous 48 particles [3]. The three axial lengths were measured in the orders of short to long and long to short axes to compared with the data of [3] and [4], respectively. The shape distribution in a Zingg diagram was compared using the Kolmogorov-Smirnov test.

The shape distribution of the Itokawa particles cannot be distinguished from that of the impact fragments of [4] but can be distinguished from that of [3]. This may suggest that the Itokawa particles resulted from mechanical disaggregation, as a response to impacts with a specific condition. In contrast, the shape distribution of the lunar regolith particles can be distinguished from that of the Itokawa particles and the impact fragments although lunar regolith is the product of impact on the lunar surface. The lunar particle shapes are more equant than the others. The both lunar samples examined are matured (Is/FeO = 80 and 78 for 60501 and 10084, respectively [7]). These regolith particles should become equant from the shapes similar to the impact fragments by mechanical disaggregation or abrasion due to repeated impacts during a long residence time in the regolith layer although a specific process for the shape change is not known.

[1] Tsuchiyama (2013) Elements, 10: in print. [2] Tsuchiyama et al. (2011) Science, 333: 1125. [3] Tsuchiyama et al. (2013) Meteor. & Planet. Sci., 1-16. doi: 10.1111/maps.12177. [4] Fujiwara et al. (1978) Nature 272: 602. [5] Capaccioni et al. (1984) Nature 308: 832. [6] Katagiri (2010) Proc. 12th Internat. Conf. Engin., Sci., Constr., Operat. in Challeng. Environ., 254-259. [7] Morris et al. (1978) Proc. Lunar Planet. Sci. Conf., 9th, 2287.

キーワード: はやぶさ計画, 粒子形状, スプリング8, X線CT, アポロ計画, 衝突

Keywords: Hayabusa mission, particle shape, SPring-8, x-ray tomography, Apollo mission, impact

小惑星イトカワのレゴリス粒子の表面微細構造から考察するレゴリスの宇宙風化過程 Surface micromorphology of regolith particles from Asteroid Itokawa: Implication for space weathering of regolith

松本 徹^{1*}; 土山 明²; 三宅 亮²; 野口 高明³; 中村 智樹⁴; 中村 美千彦⁴; 松野 淳也²; 島田 玲¹; 上杉 健太郎⁵; 中野 司⁶
MATSUMOTO, Toru^{1*}; TSUCHIYAMA, Akira²; MIYAKE, Akira²; NOGUCHI, Takaaki³; NAKAMURA, Tomoki⁴; NAKAMURA, Michihiko⁴; MATSUNO, Junya²; SHIMADA, Akira¹; UESUGI, Kentaro⁵; NAKANO, Tsukasa⁶

¹ 阪大. 理. 宇宙地球科学, ² 京大. 理. 地球惑星科学, ³ 茨城大. 理. 理学, ⁴ 東北大. 理. 地学, ⁵ 高輝度光科学研究センター, ⁶ 産業技術総合研究所

¹Osaka University, ²Kyoto University, ³Ibaraki University, ⁴Tohoku University, ⁵JASRI/Spring-8, ⁶GSJ/AIST

惑星間空間にさらされた大気のない天体表面では、主に微小隕石の衝突と太陽風の照射により、表面の光学物性が変わり反射スペクトルが変化する。これらの現象は宇宙風化と呼ばれ、シリケート天体ではナノ鉄微粒子の生成が原因と考えられ、観測から天体表面の物質的情報を得ることを難しくさせている。小惑星表面においても、太陽風照射・微小隕石衝突による宇宙風化が考えられているが [1]、具体的な宇宙風化の進行過程を理解するためには小惑星サンプル分析が不可欠である。2010年 S 型小惑星イトカワ表層からのレゴリス粒子 (小惑星表層の微細粒子) を回収した探査機はやぶさが地球に帰還した。イトカワ粒子の初期分析により、太陽風の打ち込みの証拠や、粒子表面に主に太陽風照射に起因するナノ鉄微粒子を含む宇宙風化リムが観察された [2-4]。一方で、一部の粒子外形は丸みを帯び、その表面微細構造をもち小惑星表層で起こるとされる摩耗作用を受けた構造が観察されている [5][6]。本研究では、イトカワ粒子の表面モルフォロジーに注目した。特に粒子表面構造の系統的な分類・解釈を行うとともに、宇宙風化リムの観察を行うことで、小惑星表層のレゴリス粒子の活動と、小惑星の宇宙風化過程との関連性を明らかにすることを試みた。まず、19 個のイトカワ粒子について X 線マイクロトモグラフィ (CT) による 3 次元外形の評価・走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) による表面微細構造の観察を行った。その結果、レゴリス粒子表面は、レゴリス粒子生成時もしくは生成後に破断した面、レゴリス粒子形成前の matrix/regolith breccia 内の空隙での蒸発・凝縮により生成した面に分類できることが明らかとなった。また CT・FE-SEM 分析から、これらの表面の種類に関係なく、摩耗作用を受けた丸みを帯びた表面が存在することが分かった。続いて、1 つのイトカワ粒子に対して透過型電子顕微鏡 (TEM/STEM) を用いた宇宙風化リムの断面構造観察を行い、FE-SEM にて観察した表面構造との比較を行った。TEM/STEM で観察した宇宙風化リム内部には空隙が存在し、空隙の一部は表面を押し上げて、大きさ数十 nm のプリスター (水ぶくれ状の) 構造を形成していた。この構造は FE-SEM 観察によって表面の凸状構造として認識できることが明らかになった。プリスターを伴うリムはイトカワ粒子の宇宙風化リムのうち、最も長時間太陽風に暴露され形成したリムと考えられており (10^3 - 10^4 年 [4])、粒子の表面観察のみで粒子表面の宇宙風化の程度を判断できることを示した。本研究では、粒子表面のプリスター分布から小惑星表層のプロセスと関連した S 型小惑星の宇宙風化プロセスについて考察した。従来 S 型小惑星の宇宙風化プロセス (スペクトル変化) は太陽風照射 (10^6 年) とそれに続く微小隕石衝突 (10^9 年) の 2 つの異なるタイムスケールで進行すると提案されていた [7]。宇宙風化を受けたイトカワ表面のレゴリス層の年代も 10^6 年程度である [8]。一方で、イトカワ粒子の宇宙風化リムの発達は、 10^3 - 10^4 年程度で進行すると考えられる。このタイムスケールの不一致を本研究の観察結果から考察した。まずプリスター分布と粒子の丸みに相関性がないことから、摩耗過程は、太陽風照射ではなく、地震震動による粒子同士の機械的摩耗の可能性が高く、宇宙風化リムの形成よりも長いタイムスケールで起こる現象であると考察した。機械的摩耗は宇宙風化リムの剥離を引き起こすと考えられる。一方でレゴリス粒子の破碎による宇宙風化表面の更新、レゴリス粒子のかき混ぜ・移動を示唆するプリスター分布の不均一性が観察された。イトカワの宇宙風化のタイムスケールを考えると、個々のレゴリス粒子の局所的な表面に太陽風照射によって宇宙風化リムが 10^3 - 10^4 年程度で発達しても、イトカワ表層でのプロセス (レゴリス粒子の破碎、摩耗、かき混ぜなど) により、イトカワ全体を考えたときのスペクトルの変化は徐々に進行し、最も遅い場合で 10^6 年程度で起こるといった描像が考えられる。[1] Clark B. E. (2002) Asteroid, 585-599. [2] Nagao K. et al. (2011) Science, 333, 1128-1131. [3] Noguchi T. et al. (2011) Science, 333, 1121-1125. [4] Noguchi T. et al. (2013) Met. Planet. Sci. 27, 1-27 [5] Tsuchiyama A. et al. (2011) Science, 333, 1125-1128. [6] Matsumoto T. et al. (2013) LPSC XLIV, 1441. [7] Vernazza et al. (2009) Nature, 458, 993-995. [8] Busemann et al. (2013) Hayabusa 2013: Symposium of Solar System Materials.

キーワード: イトカワ, レゴリス, 宇宙風化

Keywords: Itokawa, regolith, space weathering

磁気体積力による並進運動を用いた隕石微粒子の抽出と同定 Extraction and Identification of Primitive Grains Driven by Magnetic Volume Force.

久好 圭治^{1*}; 植田 千秋¹
HISAYOSHI, Keiji^{1*}; UYEDA, Chiaki¹

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

¹Institute of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

これまで地球科学の諸分野では、磁性鉱物を抽出・同定する手段として、磁場勾配力が用いられてきた。しかしこの動作原理は、試料に働く磁気体積力が重力に比して十分大きい時に成立するため、磁鉄鉱、Fe-Ni合金等、自発磁化をもつ一部の物質でだけで有効であると考えられてきた。

周知のように始原的隕石に代表される惑星始原物質は、起源の異なる多様な粒子の集合体であるため、SIMSや顕微ラマンなど様々なマイクロプローブ技術を駆使して研究が進められている。しかし、集合体表面のin-situ分析で、構成粒子をもれなく把握できる保証は必ずしもない。そのため精密分析の前段階として、隕石を構成する個々の粒子を分離・識別することが望まれるが、そのための有効な手法は確立していない。

前回までに私たちは、磁場勾配力による並進運動を利用して、自発磁化を有さない一般の物質の磁化を測定する方法を確立し、これに基づく物質同定の方法を提案した。具体的には微小重力条件下で、磁場強度が単調減少する空間に反磁性粒子を解放し、それらが磁場ゼロの方向へ並進する速度を解析することで、磁化率を検出した。上記の運動は磁気体積力に由来するため、磁場分布が同一の場合、磁場の外での終端速度は粒子質量に依存せず、物質固有の磁化率のみに依存する。従ってこの終端速度を測定することで、質量計測なしに磁化率が検出できる。

上記のセットアップで、異種粒子の集団を磁場勾配中の一点で開放した場合、磁場の外で粒子は物質の種類ごとに別々の集団に分離して並進することが期待される。さらに集団ごとの速度から磁化率を検出し文献値と比較することにより、物質の種類を非破壊で識別することができる [1-3]。

上記の原理に基づき、今回、無機物質 vs 有機物質、および反磁性体 vs 常磁性体の分離・識別を試みた。具体的には、無機物質としてグラファイト、SiCおよびコランダム、有機物質として、ポリプロピレン、ポリスチレン、ポリエチレンの粒子混合物を準備し、その分離を行った。粒子は50-100 μmの大きさである。一方、反磁性体 vs 常磁性体の分離では、反磁性体のグラファイト、ビスマスおよび合成フォルステライトと、常磁性体のサンカルロスオリビンの粒子を分離することができた。

微小重力は前回同様、室内型の小型落下シャフトを用いて発生させた。落下距離は1.8m、微小重力継続時間は約0.5秒である。実験装置は30×30×20cmの直方体の落下ボックス内に配置した。それらの装置は、NdFeB磁石製の磁気回路(B < 0.8T)、電動アクチュエーターを装備した真空チャンバー、試料ホルダー解放信号受信装置、試料ホルダーコントローラー、電池、撮影用HVビデオカメラで構成される。

磁気分離の適応範囲はこれまでの自発磁化を有する一部の物質に限られていたが、今回の計測により一般の固体物質に拡張される展望が得られた。有機化学・生化学の分野ではクロマトグラフィの技術を用いて、有機分子の混合物を分子量ごとに分離する方法が確立している。無機物質でもこれと同様の過程が確立すれば、始原的隕石の分析のみならず固体天体表土のその場分析等への展開が考えられる。

Reference

- [1] K. Hisayoshi, S. Kanou and C. Uyeda : Phys.:Conf. Ser., 156 (2009) 012021.
- [2] K. Hisayoshi, C. Uyeda, K. Kuwada, M. Mamiya and H. Nagai, : Phys.:Conf. Ser., 327 (2011) 012058.
- [3] C. Uyeda, K. Hisayoshi, and S. Kanou : Jpn.

キーワード: 磁気放出, 非破壊同定, 磁気抽出, 微小重力, 並進運動, 磁気体積力

Keywords: magnetic ejection,, nondestructive identification, magnetic extraction, microgravity, translational motion, magnetic volume force

「月惑星探査来る十年」第三段階の総括 Summay of the third stage of Next Decade Initiatives for Lunar Planetary Explorations

渡邊 誠一郎^{1*}

WATANABE, Sei-ichiro^{1*}

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科

¹Dept. of Environmental Studies, Nagoya University

「月惑星探査来る10年」の検討活動は、第三段階の最終工程にある。講演では、第三段階の主旨と経緯を報告する。これまで、中大型/小型ミッション、あるいは海外ミッションへの参加などの多様な形態の計画を配置した中期ビジョン（今後20年程度）の立案と、そのビジョンの中核となる次期フラグシップ・ミッションの具体化、さらにそれに向けて惑星科学コミュニティが一丸となる態勢の構築をめざして検討が進められてきた。検討の過程で、(1) その場年代計測装置による月惑星年代学探査、(2) 火星着陸機・ローバー生命探査を主とする複合科学探査計画、(3) ソーラー電力セイル探査機によるトロヤ群小惑星および宇宙赤外背景放射観測の3つがフラグシップ・ミッション候補として提案された。これら3つのミッション提案は、それぞれ、既存のプリプロジェクトもしくはワーキンググループ段階にある月着陸探査機 SELENE-2 計画、火星着陸探査機 MELOS 計画、およびソーラー電力セイル計画と密接な関係があり、それらとの関係を整理することが第三段階委員より求められた。その結果、(1) については SELENE-2 とは連携するものの独立な提案とされたが、(2) と (3) については既存のワーキンググループの提案と同じものとされた。この3つの提案のミッション・コンセプト案が提出され、第三段階委員との間で何回かのやりとりを行いながらそのポリッシュアップが続けられている。講演ではこうした第三段階の経緯と評価について紹介したい。

2013年9月に宇宙科学研究所により宇宙科学ロードマップが作成され、宇宙政策委員会です承された。ロードマップでは、日本の宇宙科学が取り組むべき課題として、(1) 宇宙・物質・空間は何故できたのかの解明、(2) 太陽系と生命はどのように生まれて来たかの解明、(3) 探査機、輸送システム等の宇宙工学技術の先導および革新、の3つが挙げられたが、特に後者2つは月惑星探査に強く関わる。具体的な進め方としては、イプシロンロケット高度化等を活用した低コスト高頻度なミッションを実現すべく、探査機の小型化・高度化技術等に取り組むとし、太陽系探査科学分野では、「最初の10年間を機動性の高い小型ミッションによる工学課題克服・技術獲得と先鋭化したミッション目的を立て、10年後以降の大型ミッションによる本格探査に備える」としている。

この宇宙科学ロードマップにおける月惑星探査の進め方は、月惑星探査来る10年が目指す中型クラスのフラグシップ・ミッションとは一見相容れないもののように見える。しかし、限られた宇宙科学予算の中で月惑星探査を進めていくには思い切った探査機の軽量化とユニークでコンパクトな搭載機器の開発が不可欠である。目的を先鋭化させた小型ミッションをうまく活用して技術開発や軽量化を進め、10年後以降のフラグシップ・ミッションにつなげるという戦略を採ることで、月惑星探査来る10年での検討を具体化させていくことができるはずである。講演では、こうした点についても議論したい。

キーワード: 惑星科学, 太陽系探査, 将来計画

Keywords: planetary science, Solar System exploration, Future missions

地球電磁気圏飛翔体探査計画の検討 A status report of future geospace satellite projects

三好 由純^{1*}; 寺田 直樹²; 藤本 正樹³
MIYOSHI, Yoshizumi^{1*}; TERADA, Naoki²; FUJIMOTO, Masaki³

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 東北大学大学院理学研究科, ³ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
¹STEL, Nagoya University, ²Graduate School of Science, Tohoku University, ³ISAS/JAXA

In this presentation, we report several plans for future geospace exploration projects including magnetosphere and ionosphere, and discuss a possible roadmap for the future mission.

キーワード: 将来計画, 太陽地球系科学, 地球電磁気圏探査
Keywords: future mission, solar-terrestrial physics, geospace exploration

MELOS1 火星着陸生命探査計画 MELOS1 Mars Exploration for Life-Organism Search

佐藤 毅彦^{1*}; 久保田 孝¹; 藤田 和央¹; 山岸 明彦²; 宮本 英昭³; はしもと じょーじ⁴; 千秋 博紀⁵; 白井 寛裕⁶; 小松 吾郎⁷; 出村 裕英⁸; 石上 玄也⁹; 尾川 順子¹; 岡田 達明¹
SATO, Takehiko^{1*}; KUBOTA, Takashi¹; FUJITA, Kazuhisa¹; YAMAGISHI, Akihiko²; MIYAMOTO, Hideaki³; HASHIMOTO, George⁴; SENSU, Hiroki⁵; USUI, Tomohiro⁶; KOMATSU, Goro⁷; DEMURA, Hirohide⁸; ISHIGAMI, Genya⁹; OGAWA, Naoko¹; OKADA, Tatsuaki¹

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 東京薬科大学, ³ 東京大学, ⁴ 岡山大学, ⁵ 千葉工業大学, ⁶ 東京工業大学, ⁷ ダヌンツィオ大学, ⁸ 会津大学, ⁹ 慶應義塾大学

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²Tokyo University of Pharmacy and Life Sciences, ³University of Tokyo, ⁴Okayama University, ⁵Chiba Institute of Technology, ⁶Tokyo Institute of Technology, ⁷Universita' d'Annunzio, ⁸Aizu University, ⁹Keio University

火星探査は理学的価値、工学的価値、そして探査としての価値をほぼ等分にもつ点でユニークであり、人類のフロンティアを拡大してゆく上で重要なマイルストーンである。本講演は「来たる10年」のミッションコンセプトとしてのものであるから、理学的価値を中心に工学的価値をも含めて議論する。MELOS1は火星生命の直接検出を目指し、着陸機(ローバー) + クルーズステージという簡潔な構成でチャレンジを行うものである。Curiosityの成功で息を吹き返した米国の火星探査があり、欧露のExoMarsミッションがあり、われわれが目指す2020年代に外国の周回機が火星を回っていて通信リレーを頼れるとする仮定は、無理なことではない。

ローバーは60kg級で、それに生命探査顕微鏡と環境調査のための気象測器搭載するというのがベースラインである。生命探査顕微鏡については別講演で詳しく述べられるはずであるが、地球の実験室で実施する「最も感度の高い」手法、すなわち細胞を染色し励起光を当てて蛍光を顕微鏡観察する。これにより、バイキング着陸船の実験より3桁高い感度の生命検出実験を行う計画である。地球外生命をもし見つけることができれば、それは科学史上最大の発見となり得るだろう。広大で変化に富む火星地表、これまで7回の着陸は類似した環境の地点であり、得られた火星生命可能性に関する知見はごく限定的といえる。流水地形やメタン放出の疑われる泥火山地形など、生命発見に最も高効率と考えられる場所は、前人未踏の探査対象であり、高精度着陸、新型生命検出装置を備え、こうした場所に降り立っての生命探査を世界に先駆けて行う。本講演では検討の進捗状況を報告するとともに、日本の将来計画の中における火星着陸探査の位置づけなど、広い視野をもった議論を行いたい。

キーワード: 火星, 探査, 着陸, 生命, ローバー

Keywords: Mars, exploration, landing, life, rover

その場年代計測装置による月惑星年代学探査 Lunar chronological mission based on the in-situ geochronology instruments

諸田 智克^{1*}; 杉田 精司²; 長 勇一郎²; 三浦 弥生²; 渡邊 誠一郎¹; 大竹 真紀子³; 小林 直樹³; 唐牛 讓³; 古本 宗充¹; 本田 親寿⁴; 杉原 孝充⁵; 石原 吉明³; 石橋 高⁶; 荒井 朋子⁶; 武田 弘²; 寺田 健太郎⁷; 鎌田 俊一⁸; 佐伯 和人⁷; 小林 進悟⁹; 亀田 真吾¹⁰; 吉岡 和夫³; 岡崎 隆司¹¹; 並木 則行⁶; 小林 正規⁶; 大野 宗祐⁶; 千秋 博紀⁶; 和田 浩二⁶; 橘 省吾⁸; 田中 智³; 向井 利典³
MOROTA, Tomokatsu^{1*}; SUGITA, Seiji²; CHO, Yuichiro²; MIURA, Yayoi N.²; WATANABE, Sei-ichiro¹; OHTAKE, Makiko³; KOBAYASHI, Naoki³; KAROUJI, Yuzuru³; FURUMOTO, Muneyoshi¹; HONDA, Chikatoshi⁴; SUGIHARA, Takamitsu⁵; ISHIHARA, Yoshiaki³; ISHIBASHI, Ko⁶; ARAI, Tomoko⁶; TAKEDA, Hiroshi²; TERADA, Kentaro⁷; KAMATA, Shunichi⁸; SAIKI, Kazuto⁷; KOBAYASHI, Shingo⁹; KAMEDA, Shingo¹⁰; YOSHIOKA, Kazuo³; OKAZAKI, Ryuji¹¹; NAMIKI, Noriyuki⁶; KOBAYASHI, Masanori⁶; OHNO, Sohshuke⁶; SENSHU, Hiroki⁶; WADA, Koji⁶; TACHIBANA, Shogo⁸; TANAKA, Satoshi³; MUKAI, Toshifumi³

¹名古屋大, ²東京大, ³宇宙航空研究開発機構, ⁴会津大, ⁵海洋研究開発機構, ⁶千葉工大, ⁷大阪大, ⁸北海道大, ⁹放医研, ¹⁰立教大, ¹¹九州大

¹Nagoya Univ., ²Univ. Tokyo, ³JAXA, ⁴University of Aizu, ⁵JAMSTEC, ⁶Chiba Institute of Technology, ⁷Osaka Univ., ⁸Hokkaido Univ., ⁹NIRS, ¹⁰Rikyo Univ., ¹¹Kyushu Univ.

日本における今後の月惑星探査を力強く推進するためには、一連の探査計画において共通の柱となる理学目標の設定が必須であることは言うまでもない。惑星科学が目指す一つのゴールは、太陽系で起こったとされる様々なイベントの有無と相互の因果関係を解明し、太陽系形成から現在に至る歴史を滑らかにつなぐことである。このような観点から我々は月惑星年代学を柱として、太陽系進化史の解明を目指したその場年代測定機器を用いた探査計画を提案する。

本提案は月面着陸によるその場年代測定にもとづいて月面クレータ記録に絶対的時間軸を入れることにより、太陽系内側の天体衝突史を復元するものである。現状、岩石試料の欠落のために39億年前以前と過去30億年間の天体衝突史が不確定であるが、本提案では下記の太陽系力学進化に関する問題の解明の重要性と国外ミッションとの競合性・相補性を考慮し、特に過去30億年の天体衝突史の復元を対象とする。

(A) 月の熱的進化史の復元による月形成モデルの検証

月は地球型惑星形成の最終段階に生じたとされる「巨大衝突」の実体に迫りうる唯一無二の天体である。巨大衝突仮説の予測によると月は全溶融から始まったとされる。その場合、高温の初期状態はその後の熱進化を大きく左右し、月は20億年以上もの長期間、マントル溶融域を保持できたと考えられる。一方で、クレータ年代学で決定された月のマグマ噴出年代から見積もられるマントル溶融域の保持期間は、クレータ年代学のモデルに大きく依存し、衝突率一定モデルでは約25億年もの間保持されていたことになり、月が高温でつくられたことを強く示唆するが、衝突率減少モデルに従うと15億年程度であり、初期の高温状態を必要としない。本提案では、衝突史の復元によってクレータ年代学の高精度化を達成し、マントル溶融域が長期間保持されたかを検証することで、月の初期温度状態を決定する。

(B) 小天体のサイズ分布進化の復元

惑星から現在の太陽系小天体への力学進化は、巨大惑星の形成と大移動の歴史を知る上での鍵であり、太陽系形成から現在の太陽系構造へとつながる第一級の重要問題である。小天体の力学進化過程を探る上で重要な情報は小天体のサイズ分布である。メインベルト天体の観測から100?1000kmサイズの天体数が卓越している事が知られているが、これがもともとの微惑星形成時の特徴的なサイズを反映しているものか、現在の太陽系小天体が経験している衝突カスケードによる副産物であるのかはよく分かっていない。本提案では月表面に見られる太陽系天体衝突の時間変化から小天体質量の減少速度を初めて観測的に定量化し、衝突破壊強度などの基礎量をおさえることで、衝突カスケードが100kmサイズ天体の分布まで影響しているかを評価し、小天体のサイズ分布の問題に決着をつける。

更に本探査で獲得されるその場年代決定技術や試料選別のスキーム、月面移動地質調査技術の経験は、将来の月面サンプルリターン計画や火星探査計画に継承されるものである。

キーワード: 月惑星探査, 月, 年代学, クレータ, K-Ar 年代測定

Keywords: Lunar and Planetary explorations, Moon, chronology, crater, K-Ar dating

月着陸探査におけるその場K-Ar年代計測の可能性: 月試料からの示唆 Applicability of a laser-ablation in-situ K-Ar dating method on the Moon: insights from lunar samples

長 勇一郎^{1*}; 三浦 弥生²; 諸田 智克³; 杉田 精司⁴
CHO, Yuichiro^{1*}; MIURA, Yayoi N.²; MOROTA, Tomokatsu³; SUGITA, Seiji⁴

¹ 東京大学地球惑星科学専攻, ² 東京大学地震研究所, ³ 名古屋大学, ⁴ 東京大学複雑理工学専攻
¹Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ³Nagoya University, ⁴Department of Complexity Science and Engineering, University of Tokyo

We have been developing an in-situ K-Ar isochron dating method for future landing missions. Potassium-argon ages are measured with the combination of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and mass spectrometry using a quadrupole mass spectrometer (QMS). In our previous studies, we reported that isochron ages for gneiss samples with 30% accuracy and 10-20% precision.

However, such experimental results using test samples do not guarantee the applicability of our LIBS-QMS isochron method for actual rock samples on planetary surfaces. Depending on geologic units, the types of rocks and K concentration vary greatly on planetary surfaces.

Thus, we assess the capability of our in-situ K-Ar dating method taking the petrologic properties including K abundance and possible age range of the lunar surfaces into account. First, we examined the global maps of K obtained with the Gamma Ray Spectrometers onboard remote sensing satellites. We found that the concentrations of K and Ar of KREEPy materials are well above the detection limits of our LIBS-QMS approach. Then, the elemental compositions and textures of KREEP basalt were investigated. We found that Si-rich glasses contained in mesostasis are measurable with K-Ar dating on the Moon because of the high K concentration (~7 wt%), while other minerals (i.e., pyroxene, olivine, and plagioclase) contain virtually no K. Since the textures of these samples were heterogeneous at the scale of laser spot (~500 microns), the "isochron" ages would be obtained by measuring the different portions containing K-bearing phases in various ratios.

The major problem concerning in-situ K-Ar dating is partial ⁴⁰Ar loss due to thermal events after crystallization. This suggests that K-Ar dating only yields the lower limit for the real crystallization age. Furthermore, brecciation by impacts and contamination by solar wind will inhibit accurate in-situ dating. In order to avoid such problems and obtain meaningful age data by in-situ dating, we aim to measure fresh impact melt rocks exposed by a very recent (tens of Ma) impact on the Aristillus crater floor.

Finally, we evaluated how our method can constrain the absolute chronology models of the Moon and Mars based on the precisions of age measurements achieved by this study. For example, the absolute age of impact melt rocks in Aristillus crater, whose ages correspond to the "missing ages" of the current lunar crater chronology model (i.e., between 3.0 Ga and 0.1 Ga), would be measured with ~20% precision when the K concentration of the glass in KREEP basalt is assumed. Then, our method would be able to discriminate the constant flux model [Neukum, 1983] and the decreasing flux model [Hartmann et al., 2007]. The implications of in-situ dating in Aristillus crater include refining the crater chronology model, determining the age of the youngest mare basalts, and understanding the dynamical evolution of the asteroids in the last three billion years.

キーワード: その場年代計測, K-Ar 法, 月試料, 来る 10 年

ソーラー電力セイルによる木星トロヤ群小惑星探査 Exploration of Jovian Trojan asteroids by Solar Power Sail

中村 良介¹; 関根 康人^{2*}; 松浦 周二³; 矢野 創³; 森 治³; ソーラーセイル ワーキンググループ³
NAKAMURA, Ryosuke¹; SEKINE, Yasuhito^{2*}; MATSUURA, Shuji³; YANO, Hajime³; MORI, Osamu³; SOLAR SAIL,
Working group³

¹ 産業技術総合研究所, ² 東京大学, ³ 宇宙航空研究開発機構

¹ AIST, ² Universit of Tokyo, ³ JAXA

原始太陽系円盤を構成していた初期物質を探るためには、惑星形成時の熱変成の影響を免れた小惑星・彗星・惑星間塵といった小天体の研究が不可欠である。なかでも木星のラグランジュ点付近に存在するトロヤ群小惑星は、小惑星と彗星の間をつなぐ天体であり、原始太陽系円盤の物質分布や微惑星の成長・移動プロセスを調べる上で重要なターゲットである。本稿では、日本が世界に先駆けて実証したソーラー電力セイル技術を用いたトロヤ群小惑星探査ミッションを提案する。この探査は(1)トロヤ群小惑星の詳細な物質組成や熱史・衝突史を調べることで、その起源と進化を明らかにする(2)惑星間塵の空間分布を測定することで、彗星・小惑星からの生成率や軌道進化に関する理解を深め、その結果を他の惑星系に応用する(2)惑星間塵の影響の少ない小惑星帯以遠からの宇宙赤外線背景放射観測によって、宇宙初期に形成された第一世代の星を調べる、という科学目標をあわせ持つ、惑星科学・天文学・宇宙工学の融合ミッションである。ミッション検討の進行に伴い、ターゲット候補となる天体が理学・工学双方の観点から絞り込まれてきた。こうした候補天体の特性を明らかにするための地上観測や、搭載機器についての検討進捗を報告する。

キーワード: 木星, トロヤ群, 小惑星, 探査, ソーラーセイル

Keywords: Jupiter, Trojan, asteroids, exploration, Solar Sail

惑星科学会における小型惑星探査計画の検討状況 Current status of mission study for small scale planetary exploration in JSPS

荒川 政彦^{1*}
ARAKAWA, Masahiko^{1*}

¹ 神戸大学大学院理学研究科
¹ Graduate School of Science, Kobe University

昨年夏のイプシロンロケット1号機の打ち上げ成功を受けて、今後、このロケットを用いた小型衛星の打ち上げと宇宙科学の推進が期待されている。日本惑星科学会では、これまで「月惑星探査の来る10年」の活動を通して今後のフラッグシップ探査ミッションの立案を目指してきたが、この中・大型ミッションに加えて、イプシロンロケットを用いた小型の惑星探査ミッションも視野に入れた活動も必要となってきた。惑星科学会の将来計画専門委員会（委員長：荒川政彦）では、昨年夏に副会長からの要請を受け、小型惑星探査ミッションのあるべき姿とその具体例について小型惑星探査WGの中で意見交換を行ってきた。その議論のまとめは、<https://www.wakusei.jp/~shourai/wiki/epsilon/>にあるので、興味のある方はご覧頂きたい。一方、昨年9月に出されたJAXAの宇宙科学ロードマップでは、惑星科学会に関連深い太陽系科学探査は、次のように位置づけられることになった：「太陽系探査科学分野は、最初の約10年を機動性の高い小型ミッションによる工学課題克服・技術獲得と先鋭化したミッション目的を立て、10年後以降の大型ミッションによる本格探査に備える」。このような背景のもと、本学会では、イプシロン搭載宇宙科学ミッションに対してどのように取り組んで行くかを2013年秋季講演会時の運営委員会及び総会で議論した。その結果、3つの論点からこの小型惑星探査についての検討を行うこととなった。まず第1の論点は、(1)イプシロンロケットを用いた小型惑星探査はコミュニティに必要かという点である。これは多くの学会員のコンセンサスを得る必要があるので、機会ある毎に議論を積み重ねることとなった。第2の論点は、(2)次の10年間の太陽系探査に対してイプシロンロケットを用いた小型惑星探査を中心に据えた時、我々はどのような探査を提案するのかという点である。第3の論点は、(3)年度内にも公募が行われるイプシロンロケット3号機に対して、我々はどのように取り組んだら良いかという点である。(2),(3)に関しては、今後、学会主催のシンポジウムを開催し、さらに内容をつめる必要があればWGを立ち上げて検討を行うことになった。

キーワード: イプシロンロケット, 小型惑星探査
Keywords: Epsilon rocket, small scale planetary exploration

Sprint-A(EXCEED)の経験から学んだこと This is what I learned from the development of EXCEED

吉川 一朗^{1*}
YOSHIKAWA, Ichiro^{1*}

¹ 東京大学
¹University of Tokyo

小型科学衛星初号機として開発を続けてきた Sprint-A/EXCEED が昨年とうとう打ち上げに成功した。
開発の実働はたった5年である。惑星観測はきわめて順調であり、現在は木星、金星の大気の観測を続けている。
EXCEEDの開発の始まりから、観測開始に至るまでの経緯を元に、次の飛翔体計画の準備についてお話ししたい。

キーワード: スプリントエー, 極端紫外光, 惑星大気
Keywords: Sprint-A, EUV, Planetary airglow

深宇宙探査技術実験機 DESTINY Deep Space Explorer DESTINY

川勝 康弘^{1*}
KAWAKATSU, Yasuhiro^{1*}

¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
¹ ISAS/JAXA

DESTINY which stands for "Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage" is a mission candidate for the next space science small program. The next mission is planned to be decided in 2014, and the select one is scheduled to be launched in 2018.

As illustrated in the Figure, DESTINY will be launched by an Epsilon launch vehicle and firstly placed into a low elliptical orbit, where then its altitude raised by the use of ion engine. When the orbit raising reaches the Moon, DESTINY subsequently is injected into transfer orbit for L₂ Halo orbit of the Sun-Earth system by using lunar gravity assist. Upon arrived at L₂ Halo orbit, DESTINY will conduct its engineering experiment as well as scientific observations for at least a half year. If conditions permit, DESTINY will leave L₂ Halo orbit, and transfer to the next destination.

On the way to L₂ Halo orbit, DESTINY will conduct demonstration and experiment on key advanced technologies for future deep space missions. Major items of the technology demonstration are listed as follows.

1) High energy mission by Epsilon rocket.

We investigate appropriate rocket configurations and flight path designs, and evaluate the performance of Epsilon rocket to insert spacecrafts into high energy orbits. It provides basic data of Epsilon rocket application to deep space missions.

2) Ultra-Lightweight solar panel.

In order to generate large electric power to run μ 20 ion engine, "Ultra-Lightweight Solar Panel", which is under development at JAXA, is applied and its performance is evaluated. This solar panel is estimated to achieve power to mass ratio at least double to conventional ones. Future application is expected in outer planet probes (JMO, MELOS) or probes with large ion engines.

3) Large scale ion engine μ 20.

DESTINY is inserted into an elliptical orbit and reaches to a Halo orbit by its own orbital maneuver. For this maneuver, a large ion engine (μ 20) which is under R&D at JAXA will be adopted and its performance is evaluated. This ion engine has thrust five times as much as μ 10 used by Hayabusa and will be expected to be applied to large probes such as SOLAR-D or Hayabusa Mk2.

4) Advanced thermal control.

In order to manage large amount of heat generated by the large ion engine, advanced thermal control techniques by way of Loop Heat Pipe will be adopted.

5) Orbit determination under low thrust operation.

DESTINY will reach to Halo orbit by running ion engine over long duration. In order to reduce burdens to shut down the ion engine each time of orbit determinations, orbit determination under ion engine operation is conducted and its performance is evaluated.

6) Automatic/autonomous onboard operation.

In order to increase the efficiency of operation, autonomous and highly functioned spacecraft management system is developed demonstrated on board. This technique is expected to be adopted especially in the deep space missions usually operated under severe communication condition.

7) Halo orbit transfer and maintenance.

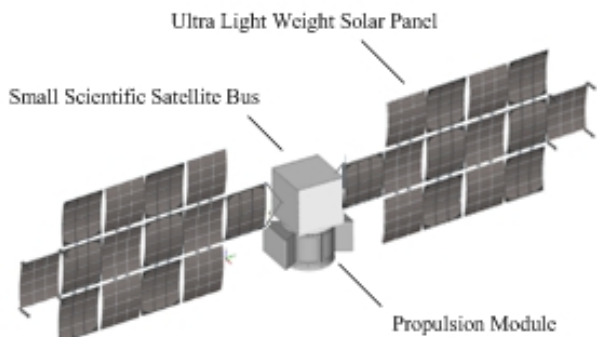
DESTINY will reach to Halo orbit and maintains the orbit more than one period. In order to reduce the risks of Halo orbit insertion and suppress the amount of orbital maneuvers, the orbit control technique using dynamical system theory is used and its operability is evaluated. This technique will be adopted in SPICA, which will be operated in Halo orbit.

DESTINY itself is an engineering experiment probe which destines L₂. However, its mission profile is naturally applied to lunar missions and escape missions by forking the profile at the lunar encounter. Moreover, the spacecraft's high astronautic performance makes its application to other launch method attractive, such as dual launch with GEO satellite or another deep space probe. The significance of DESTINY from the point of its opening new opportunities for low-cost deep space mission is discussed in the presentation as well.

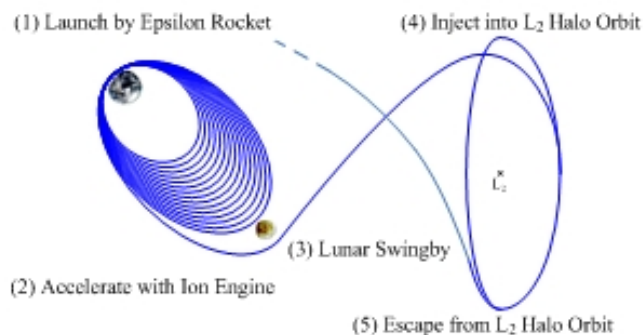
PPS26-09

会場:418

時間:4月30日 11:30-11:45



DESTINY Overview



Mission Profile

小型月着陸実験”SLIM”の構想とその概要 Introduction of SLIM, a small and pinpoint lunar lander

坂井 真一郎^{1*}; 澤井 秀次郎¹; SLIM WG¹
SAKAI, Shin-ichiro^{1*}; SAWAI, Shujiro¹; SLIM, Working group¹

¹ 宇宙航空研究開発機構

¹ ISAS/JAXA

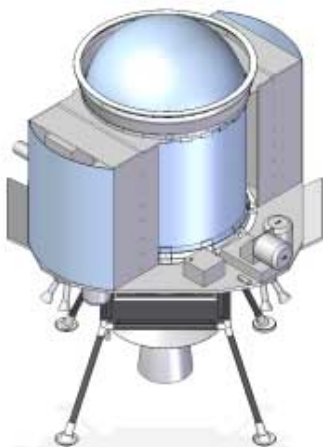
小型実験機”SLIM”は、重力環境下でのピンポイント着陸技術を月面着陸により技術実証することを目的とする、500kg級小型探査機である。月面や火星への着陸については、世界的には既にミッション例があるが、これらの着陸はおよそ数kmオーダーの精度での着陸であり、基本的には安全な場所を選んだ上での着陸であった。一方で、「SELENE」探査機などを好例として、近年では月・惑星についての科学観測が高精度化しており、これに伴って科学的関心を集める特定の場所などが特定されるようになってきている。一つの例は、SLIMが現在ターゲットの一つとしている”マリウス丘の縦穴”などであり、この縦穴の内部構造を探査により調べるためには、その近傍数100m以内に着陸することが必要になると考えられている。”SLIM”ではこのような背景から、従来kmオーダーだった着陸精度を、100mオーダーに飛躍的に高精度化することを目的とし、そのために必要な要素技術開発を行ってこれらを実際の月面着陸により実証することを目的としている。また同時に”SLIM”は、近年の宇宙機小型化の流れを踏まえて、イプシロンロケットで実現可能な小型探査機としての実現をも目指している。このような”SLIM”実現のために必要となる要素技術は、まずピンポイント着陸実現のための航法誘導制御技術であり、具体的には、カメラ画像によるクレーター抽出・照合のための画像照合航法技術や、着陸レーダー技術、障害物の検知と回避技術などが該当する。その他にも、特に探査機小型化の要請から、小型軽量な着陸衝撃吸収システムや、高性能な推進系、探査機重量の削減のためのタンクと主構造の一体化、薄膜太陽電池セルなどの採用による電源システムの小型化など、多くの技術開発も行っている。従来から、SLIMワーキンググループの活動の中で各大学の研究者などにも多数参加頂きながら、これら要素技術についての研究開発を既に進めて来ており、その成果が探査機の姿としてまとまりつつある。その成果は既に、3号機目のイプシロンロケットミッションとしての提案に至ったところである。

SLIM実証実験機の実現は、本来の目的である「ピンポイント着陸技術の実証」というマイルストーンの達成としても重要なものである。それと同時に、将来の「イプシロンロケットによる探査ミッション」実現についても、特に小型・軽量なシステムを実現する上での要素技術が複数実証される予定である点でも、大きな意義を有しているものと考えている。

講演においては、上記で述べたSLIMの意義・目的と、その検討活動の一環で行われている多数の工学研究の例とその成果、これらを踏まえた探査機システム成立性の状況などをご報告させて頂き、併せて、SLIMをベースとした時に、将来のイプシロンロケットによる小型探査ミッションについてどのような展望が見えてくるのか、議論させて頂く予定である。

キーワード: 月惑星探査, 月面着陸, 着陸誘導航法制御, ピンポイント着陸, イプシロンロケット

Keywords: Moon and Planetary survey, Lunar landing, Guidance and Navigation for landing, Precise landing, Epsilon Rocket



小型宇宙科学衛星を使ったペネトレータ惑星内部構造観測システムの実証ミッション Proposal for Demonstration of Penetrator Technology by Small Satellite and Epsilon Launch Vehicle

白石 浩章^{1*}; 山田 竜平²; 石原 吉明¹; 小川 和律¹; 岡元 太郎³; 竹内 希⁴; 石原 靖⁵; 村上 英記⁶; 田中 智¹; 小林 直樹¹; 早川 雅彦¹; 早川 基¹; 新谷 昌人⁴; 後藤 健¹; 水野 貴秀¹; 石井 信明¹; 津田 雄一¹; 羽生 宏人¹; 梯 友哉¹; 石村 康生¹; 徳留 真一郎¹

SHIRAISHI, Hiroaki^{1*}; YAMADA, Ryuhei²; ISHIHARA, Yoshiaki¹; OGAWA, Kazunori¹; OKAMOTO, Taro³; TAKEUCHI, Nozomu⁴; ISHIHARA, Yasushi⁵; MURAKAMI, Hideki⁶; TANAKA, Satoshi¹; KOBAYASHI, Naoki¹; HAYAKAWA, Masahiko¹; HAYAKAWA, Hajime¹; ARAYA, Akito⁴; GOTO, Ken¹; MIZUNO, Takahide¹; ISHII, Nobuaki¹; TSUDA, Yuichi¹; HABU, Hiroto¹; KAKEHASHI, Yuya¹; ISHIMURA, Kosei¹; TOKUDOME, Shinichiro¹

¹ 独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所太陽系科学研究系, ² 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, ³ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, ⁴ 東京大学地震研究所, ⁵ 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域, ⁶ 高知大学理学部応用理学科

¹Department of Solar System Sciences, Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, Japan, ²National Astronomical Observatory of Japan, RISE project, ³Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ⁴Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ⁵IFREE, JAMSTEC, ⁶Department of Applied Science, Faculty of Science, Kochi University

ペネトレータとは小型軽量の高速貫入型観測プローブのことであり、固体表面をもつ月や固体惑星上に1回のロケット打上げで多点観測ネットワークを実現するための有効な手段を提供する。これまでも国内外でペネトレータの開発が行われ、惑星探査プロジェクトへの応用が数多く提案されてきた。このことは固体惑星の多点観測によって実現される地震観測網による内部構造探査や軟着陸では到達困難な地域でのその場観測等、ペネトレータ技術がもたらす将来の科学観測の広がりへの期待を示すものである。しかし、その特性からも明らかなように惑星表面への貫入衝撃に耐えられる搭載機器の開発が最も大きな技術的ハードルである。加えて、ペネトレータによるネットワーク観測を実現するためには、

- ・周回衛星からの分離・投下・設置技術
- ・ペネトレータ-周回衛星間の通信技術
- ・長期間・多点・同時観測を行う運用技術

なども必須の開発課題である。旧 LUNAR-A プロジェクトでは月内部構造を地球物理学的手法で観測するためにこれらの工学技術を設計・開発して様々な地上試験を行ってきたが、飛翔実証を行うには至らなかった。そこで既存の開発技術を継承したペネトレータモジュールを再製造(新規開発を一部含む)するとともに、月周回衛星からの投下設置技術とペネトレータの観測運用技術を実証することで将来の本格的なネットワーク観測につなげることを目指すことが小型科学衛星ミッションへの提案目的である。

打上げロケットとしては、イプシロンロケット標準型に新規開発する4段キックステージを追加して月遷移軌道へのペイロード重量を増加させる。小型月探査機は月周回投入後、略円軌道上でペネトレータモジュールを分離・投下して、データリレーのための軌道変更を行う。一方、分離投下されたペネトレータモジュールは軌道離脱モータの噴射によって周回速度成分をキャンセルした後、高度約25kmからの自由落下中に90度の姿勢変更をしてから速度約300m/sec以下で月面を覆うレゴリス層に2~3mの深さまで潜り込む。ペネトレータ本体にはLUNAR-A計画において開発された地震計と熱流量計のほか、加速度計や傾斜計を搭載して貫入設置後に科学観測を実施する。月の内部、特に、浅部の物理的・熱的構造に関する知見を得ることを目的とする。例えば、ペネトレータ搭載地震計の観測中に月の夜側で起こる隕石衝突発光現象を地上望遠鏡で捉えることができれば、震源位置と発生時刻が精度良く決まったイベントとして地殻や浅部マンテルの構造を調べるために利用することができる。一方、熱流量についてはアポロ着陸点やルナ着陸点とは異なる地質ユニットに設置して観測することができれば地殻を構成する元素の割合や月全体の難揮発性元素の存在度を推定する手がかりとなる。

本発表では小型月探査機概念検討、ペネトレータ搭載機器の観測目標と運用計画の概要について紹介する。

キーワード: 小型科学衛星, イプシロンロケット, ペネトレータ, 地震計, 熱流量計
Keywords: small satellite, Epsilon rocket, penetrator, seismometer, heat flow probe

来る10年の総括・将来ミッションの展望 Lunar and planetary explorations in a coming decade: Summary of 4 years and problems remained

並木 則行^{1*}; 小林 直樹²; 出村 裕英³; 大槻 圭史⁴

NAMIKI, Noriyuki^{1*}; KOBAYASHI, Naoki²; DEMURA, Hirohide³; OHTSUKI, Keiji⁴

¹ 千葉工業大学, ²JAXA 宇宙科学研究本部固体惑星科学研究系, ³ 会津大学, ⁴ 神戸大学

¹PERC/Chitech, ²Department of Planetary Science, ISAS, ³The University of Aizu, ⁴Kobe University

日本惑星科学会将来惑星探査検討グループでは、惑星探査の長期的な展望を検討し、将来ミッション計画を提案する報告書の作成を目指している。この検討活動は惑星科学のコミュニティが、惑星科学会会員、非会員を問わず、自らの責任において将来像を描いていく作業である。

我が国の惑星探査科学の長期的な成功・発展のためには、科学的視点に立った探査計画の立案のみならず、人材育成や関連基礎研究の推進を含め、惑星探査科学を強力に推進する体制の確立を、惑星科学コミュニティとして益々強化して行くことが不可欠であり急務である。個々の研究者はもちろん、コミュニティ全体が強い意志で自律的かつ主体的に探査を推進していくことが求められている。長期ビジョンの策定を開始するにあたり、我々は以下の5点を検討方針の要点と考えた。

(A) 惑星科学コミュニティの力量を自覚し、2017年から2027年までの惑星探査将来計画を自主的に検討することを目的とする。

(B) 惑星科学の第一級の科学(“トップサイエンス”)を抽出するとともに、観測機器提案・ミッション機器提案を募って、コミュニティが支えるミッションを創成する。

(C) 作業は三段階に分けて行う。第一段階ではトップサイエンスを抽出し、第二段階ではミッション提案と観測器提案を科学的重要性に基づいて統合・改良し、第三段階ではミッション提案と観測器提案の実現性評価を行う。

(D) 各段階で学会・シンポジウム等での中間報告を繰り返して、広く意見聴取を図る。

(E) 他の宇宙科学関連学会・コミュニティとの連携を図る。

2010年から開始した検討は、トップサイエンスを議論する第一段階、ミッション提案と観測機器提案の科学目標を評価する第二段階を経て、ミッション提案の実現性を評価する第三段階に移行した。2012年9月14-15日にはセッション別分科会を開催し、「月惑星の構造と進化の比較学」と「生命に至る宇宙物質の進化学」という2つの大テーマにそって、13の個別提案の集約を図った。この分科会では冒頭で集約の方針を議論し、(i)「10年に一度の中型ミッション」をフラッグシップミッションと呼ぶこと、(ii)政策型ミッション、小型ミッションを排除しないが、「来たる10年」第三段階ではフラッグシップミッションに集中すること、を定めた。この結果、3つのグループにまとめられたミッションコンセプトの最終報告を行い、コミュニティの評価をおおぐ。

キーワード: 月, 惑星, 探査, 将来計画

Keywords: moon, planets, exploration, road map

PPS26-13

会場:418

時間:4月30日 12:30-12:45

来たる10年パネルの取り組み Approach of the next decade panel

出村 裕英^{1*}
DEMURA, Hirohide^{1*}

¹ 会津大学
¹University of Aizu

来たる10年パネルの議論をまとめる。

キーワード: 惑星科学, 宇宙科学, 将来計画, 探査, イプシロンロケット, 宇宙航空研究開発機構
Keywords: Planetary Science, Space Science, Future Planning, Exploration, Epsilon Launch Vehicle, JAXA

月惑星熱流量の精密測定に向けての測定プローブの開発と評価 Development and evaluation of heat flow probe for the precise measurement of lunar and planetary heat flow

堀川 大和^{1*}; 田中 智²; 坂谷 尚哉¹; 滝田 隼³
HORIKAWA, Yamato^{1*}; TANAKA, Satoshi²; SAKATANI, Naoya¹; TAKITA, Jun³

¹ 総合研究大学院大学, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 東京大学

¹The Graduate University for Advanced Studies, ²Japan Aerospace Exploration Agency, ³The University of Tokyo

月惑星熱流量を精密に測定することは固体天体のバルク組成や熱史を議論する上で重要である。熱流量をその場で観測するために、1~数 m の深さに埋設可能な高速貫入プローブ (ペネトレータ) が開発された。しかし、耐衝撃性や軽量化を重視した結果、熱流量計がペネトレータ構体表面上に搭載されているため、熱流量測定値はペネトレータとレゴリスの熱伝導率の違いによるプローブ周囲の温度擾乱に影響されやすく不確定性を持つ。

本研究では、温度擾乱の影響が少ない位置で熱流量を 10% 以内の精度で観測可能なニードルプローブの伸展機構を開発することを提案する。温度擾乱を避けるために、測温点はペネトレータ本体からできるだけ遠い位置に設置する必要がある。ニードルプローブの先端部分で紛体の熱伝導率を推定する理論解はすでに得られているが、実際にニードルプローブの先端部分でレゴリスの熱伝導率を測定する研究はまだなされていない。我々は試作プローブを開発し、真空下でレゴリス模擬物質としてのガラスビーズの熱伝導率測定精度を評価した。

試作プローブはステンレス管にヒーター線と K 型熱電対を挿入してエポキシ樹脂で固定したセンサーである。試作プローブの全長はペネトレータ本体への搭載性を考慮して 10cm とした。ガラスビーズの熱伝導率は月地下 1~数 m の熱伝導率と同じ約 0.02W/m/K となるように、圧力を 200Pa 付近でコントロールした。ガラスビーズを入れた容器の中央にニードルプローブを設置し、その周囲に比較測定のための線加熱法による 3 本のセンサーを配置した。

試作プローブによって理論解に基づいて得られた熱伝導率は 0.0165W/m/K で、線加熱法による熱伝導率の平均値は 0.0207W/m/K であった。プローブによる熱伝導率測定精度は約 31% となった。しかし、理論解の仮定条件は、例えばプローブの直径やプローブとサンプル間の接触熱抵抗、プローブ軸方向の熱リーク等の点で、実際のプローブの特性とは異なるため、プローブによる熱伝導率は理論解から直接推定することができない。そこで我々は実際のプローブの特性を取り入れた数値モデルで伝熱解析を行い、得られた温度プロファイルから試作プローブによる熱伝導率を推定した。理論解の条件を取り入れた伝熱解析による温度プロファイルと理論解による温度プロファイルとの整合性は確認している。

伝熱解析の結果、プローブによる熱伝導率は 0.0212W/m/K、熱伝導率測定精度は約 3% となり、要求精度の約 5% 以内を満たした。将来、我々の伸展プローブを使用して、月惑星表層レゴリスのその場熱伝導率観測を行うために、事前に伝熱解析を用いて適切な熱伝導率に対してプローブによる測定精度を求めておく必要がある。

キーワード: 熱流量, 熱伝導率, 月, 惑星, ペネトレータ, ニードルプローブ

Keywords: heat flow, thermal conductivity, moon, planet, penetrator, needle probe

ジオスペース探査ERGプロジェクト ERG project

三好由純^{1*}; 高島健²; 浅村和史²; 塩川和夫¹; 関華奈子¹; 小路真史¹; 篠原育²; 平原聖文¹; 東尾奈々²; 松本晴久²; 笠原慧²; 三谷烈史²; 笠羽康正³; 松岡彩子²; 小嶋浩嗣⁴; 藤本正樹²; 小野高幸³
MIYOSHI, Yoshizumi^{1*}; TAKASHIMA, Takeshi²; ASAMURA, Kazushi²; SHIOKAWA, Kazuo¹; SEKI, Kanako¹; SHOJI, Masafumi¹; SHINOHARA, Iku²; HIRAHARA, Masafumi¹; HIGASHIO, Nana²; MATSUMOTO, Haruhisa²; KASAHARA, Satoshi²; MITANI, Takefumi²; KASABA, Yasumasa³; MATSUOKA, Ayako²; KOJIMA, Hirotsugu⁴; FUJIMOTO, Masaki²; ONO, Takayuki³

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 宇宙航空研究開発機構, ³ 東北大学大学院理学研究科, ⁴ 京都大学生存圏研究所
¹STEL, Nagoya University, ²JAXA, ³Graduate School of Science, Tohoku University, ⁴RISH, Kyoto University

The ERG (Exploration of energization and Radiation in Geospace) is Japanese geospace exploration project. The project focuses on relativistic electron acceleration mechanism of the outer belt in the context of the cross-energy coupling via wave-particle interactions. The project consists of the satellite observation team, the ground-based network observation team, and integrated-data analysis/simulation team. The ERG satellite will be launched in FY2015. Comprehensive instruments for plasma/particles, and field/waves are installed in the ERG satellite to understand the cross-energy coupling system. In the ERG project, several ground-network teams join; magnetometer networks, radar networks, optical imager networks, etc. Cooperative observations between the in-situ satellite and ground-based observations are important. Some simulation codes including both macro-scale phenomena and micro-physics are developed in Japan, which are very helpful quantitatively to understand the observational results and to incorporate the observations. In this presentation, the overview of the projects will be presented and possible collaborations with other geospace satellite missions as well as the ground-based observations will be discussed.

キーワード: ERGプロジェクト, 内部磁気圏, 将来計画

Keywords: ERG project, inner magnetosphere, future mission

磁気圏擾乱に伴う磁気異常帯での超高層大気現象 Upper Atmosphere phenomena in Geomagnetic Anomaly Region in association with Magnetosphere Disturbances

巻田 和男^{1*}
MAKITA, Kazuo^{1*}

¹ 拓殖大学
¹Takushoku University

Since 1999, we continuously study/observe upper atmosphere phenomena in Geomagnetic Anomaly Region (South Atlantic Anomaly: SAA) by using several equipments and obtained several interesting results. We show several remarkable phenomena in SAA on the basis of imaging riometer data and CCD imager data obtained at Southern Space Observatory (SSO; 29.4S, 307E) in Brazil and other stations.

(1) Particle precipitation in SAA seems to be related with polar disturbances. From imaging riometer data, enhancement of Cosmic Noise Absorption (CNA) occurs simultaneously with magnetic disturbances in polar region. On the other hand, CNA at Kakioka imaging riometer can be also seen during polar disturbance (not so frequently observed). It may suggest that particle precipitations are occurred in association with substorm at Kakioka as well as SAA.

(2) In sometimes, strong CNA is observed in association with sharply decreasing of electron flux (GOES satellite data) after moderate polar disturbance period. It may indicate that injection and drifting of electrons after polar disturbances precipitate in SAA during this period.

(3) It is well known that VLF waves trigger precipitation of radiation belt particles.

Although the longitudinal difference is 94 degrees (6 hours local times) between Syowa Station, Antarctica and SSO, CNA at SSO is nearly simultaneously observed with VLF emissions at Syowa Station. It may suggest that particles are more easily precipitating and observed in SAA through the wave particle interactions in radiation belt.

(4) Static multiple bands are singularly observed at SSO. The characteristics of static multiple bands are different from atmospheric gravity waves. They are fixed at the ground and rotate with earth rotation. This phenomena is very seldom and looks like occurs in winter season. The luminosity of these phenomena are not clear but less than 150R like airglow level..

We almost finished to construct South America Riometer Network (SARINET; 7 stations) and hope to collect data continuously during one solar cycle.

キーワード: 南大西洋磁気異常, 宇宙雑音吸収, イメージングリオメータ, 放射線帯, 大気光

Keywords: South Atlantic Geomagnetic Anomaly, Cosmic noise absorption, Imaging riometer, Radiation belt, Airglow



South America Riometer Net work(SARINET)

Loss of geosynchronous relativistic electrons by EMIC waves during quiet geomagnetic conditions

Loss of geosynchronous relativistic electrons by EMIC waves during quiet geomagnetic conditions

KIM, Khan-hyuk^{1*} ; HYUN, Kiho¹ ; LEE, Ensang¹ ; LEE, Dong-hun¹
KIM, Khan-hyuk^{1*} ; HYUN, Kiho¹ ; LEE, Ensang¹ ; LEE, Dong-hun¹

¹School of Space Research, Kyung Hee University, Gyeonggi, Korea.

¹School of Space Research, Kyung Hee University, Gyeonggi, Korea.

We have examined relativistic electron flux losses at geosynchronous orbit under quiet geomagnetic conditions. Two 3-day periods, from 11 to 13 October and from 29 November to 1 December, in 2007 were chosen for analysis because geomagnetic conditions were very quiet (3-day average of $K_p < 1$) and significant losses of geosynchronous relativistic electrons were observed. During both intervals, there were no geomagnetic storm activities. Thus, the loss processes associated with geomagnetic field modulations caused by ring current buildup can be excluded. The flux of geosynchronous relativistic electrons with energy > 2 MeV shows typical diurnal variations with a maximum near noon and a minimum near midnight for each day. The flux level of the daily variation gradually decreased from first day to third day for each 3-day period. The total magnetic field strength (Bt), however, is relatively constant for each day. Unlike electron flux decreases, the flux of protons with energy between 0.8 and 4 MeV adiabatically responds to the daily variation of Bt. That is, there is no significant decrease of the proton flux when the electron flux decreases. During both 3-day periods, well-defined electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves were detected at geosynchronous spacecraft. Low-altitude polar orbiting spacecraft observed the precipitation of energetic electrons and protons in the interval of EMIC waves enhancement. From these observations, we suggest that the EMIC waves are a major factor to control the electron flux decrease under quiet geomagnetic conditions.

キーワード: Relativistic electron flux, geosynchronous orbit, EMIC waves

Keywords: Relativistic electron flux, geosynchronous orbit, EMIC waves

Characteristics of dayside SAPS structures observed by the SuperDARN Hokkaido radar Characteristics of dayside SAPS structures observed by the SuperDARN Hokkaido radar

西谷 望^{1*}; 堀 智昭¹; 永野 浩貴¹
NISHITANI, Nozomu^{1*}; HORI, Tomoaki¹; NAGANO, Hiroki¹

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

Sub-Auroral Polarization Streams (SAPS) are intense westward ionospheric flows in the subauroral ionosphere, and considered to be generated as a result of magnetosphere-ionosphere coupling during relatively disturbed periods. SAPSs are usually located in the evening to midnight sector, but occasionally it extends to earlier magnetic local times close to local noon. Owing to limitation of the observation techniques, no detailed studies of its local time extent have been made so far. In this study we use the data from the SuperDARN Hokkaido radar, one of the midlatitude SuperDARN radars located at the lowest geomagnetic latitude, to discuss the detailed characteristics of dayside SAPS, with focus on their relation to solar wind and geomagnetic parameters.

キーワード: dayside, SAPS, SuperDARN, Hokkaido radar, magnetosphere, ionosphere
Keywords: dayside, SAPS, SuperDARN, Hokkaido radar, magnetosphere, ionosphere

Pc3-4によるEMIC波動振幅の増幅 Amplification of EMIC waves by Pc3-4 waves

野村 麗子^{1*}; 桂華 邦裕²; 寺本 万里子⁴; Kletzing Craig³
NOMURA, Reiko^{1*}; KEIKA, Kunihiko²; TERAMOTO, Mariko⁴; KLETZING, Craig³

¹IGEP, TU Braunschweig, ²名古屋大学太陽地球環境研究所, ³宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ⁴Department of Physics and Astronomy, The University of Iowa

¹IGEP, TU Braunschweig, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ³Japan Aerospace Exploration Agency, ⁴Department of Physics and Astronomy, The University of Iowa

Electromagnetic ion cyclotron (EMIC) wave is one of the key phenomena for the dynamics of high energy electrons in the radiation belt, since EMIC waves can scatter particles and make them precipitate into the ionosphere from the inner magnetosphere. The EMFSIS of Van Allen Probes observed the proton-band EMIC wave with the frequencies 2-6Hz at ~ 3 RE in the GSM coordinates at 1110-1140UT on 29 June 2013. It was during the recovery phase of the magnetic storm started on 27 June. This event has significant enhancements of wave amplitudes up to ~ 10 nT at 1123 and 1130UT. At these times, the magnetic field variations in the Pc3-4 range are also observed. We present the relation between amplitudes of EMIC waves and Pc3-4 wave occurrences, and discuss the amplification mechanism of EMIC waves by ULF waves with longer periods.

Keywords: EMIC waves, Pc3-4

Study of Pc1 pearl structures observed at multi-point ground stations at Russia, Japan and Canada

Study of Pc1 pearl structures observed at multi-point ground stations at Russia, Japan and Canada

JUN, Chae-woo^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; SCHOFIELD, I.²; CONNORS, M.²; PODDELSKY, I.³; SHEVTSOV, B.³
JUN, Chae-woo^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; SCHOFIELD, I.²; CONNORS, M.²; PODDELSKY, I.³; SHEVTSOV, B.³

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, Japan, ²Center for Science, Athabasca University, Athabasca, Canada, ³Institute of Cosmophysical Research and Radiowave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khatanga, Russia
¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, Japan, ²Center for Science, Athabasca University, Athabasca, Canada, ³Institute of Cosmophysical Research and Radiowave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khatanga, Russia

We have investigated possible generation mechanisms of pearl structures of Pc1 geomagnetic pulsations using ground-based multi-point induction magnetometers at Athabasca in Canada, at Magadan in Russia and at Moshiri in Japan. During 3-years of observation (January 1, 2009 to December 31, 2011), we found two Pc1 pulsations with similar dynamic spectrum shapes at three stations simultaneously. For the case 1, which occurred on April 8, 2010, Pc1 pulsations were clearly identified at the three stations in the frequency range of 0.4 to 1.2 Hz. Coherence between the two stations was high ($r > 0.8$). The cross-correlation of the upper envelope of Pc1 waves between the ATH and the MGD, which indicates amplitude modulation of Pc1 due to pearl structures, was also high ($r > 0.8$). In some time interval during the case 1, however, correlation decreased down to 0.5. The case 2 occurred on April 11, 2010 in the frequency range of 0.2 to 0.8 Hz showed that the coherence and cross-correlation between ATH and MGD were both high ($r > 0.8$) throughout the event. The high coherence indicates that the Pc1 pulsations observed at these different stations were propagated from the same source region. However, in case 1, the Pc1 pearl structures were slightly different for different stations. The case 1 showed polarization angle variation depending on frequencies, while the case 2 does not show such dependence, suggesting that the case 1 has a spatially-distributed ionospheric source at high latitudes. In order to understand these different features of Pc1 pearl structures, we made two model calculations of Pc1 pearl structures under the different conditions. One model is that the Pc1 waves come from a north-south extended ionospheric source region with slightly different frequencies at different latitudes. This source distribution, causes the Pc1 pearl structure by beating during the duct propagation in the ionosphere. The other model is that the Pc1 waves with different frequencies are mixed at the point source in the ionosphere, assuming that the pearl structures were already made in the magnetosphere. The Pc1 from the point source shows an identical waveform among the different stations. On the other hand, the Pc1 from distributed source region shows slightly different waveforms at different stations. This result suggests that the distributed source region is able to create the different Pc1 pearl structures at different stations through the beating, as observed for the case 1. We conclude that the Pc1 pearl structures are created by both magnetospheric processes and ionospheric beating processes before they reach the ground-based magnetometer at low latitudes.

キーワード: Pc1 pulsation, Pearl structures, multi-point ground observations
Keywords: Pc1 pulsation, Pearl structures, multi-point ground observations

Gradual Diffusion and Punctuated Enhancements of Highly Relativistic Electrons: Van Allen Probes Observations

Gradual Diffusion and Punctuated Enhancements of Highly Relativistic Electrons: Van Allen Probes Observations

BAKER, Daniel N.^{1*}

BAKER, Daniel N.^{1*}

¹University of Colorado Boulder

¹University of Colorado Boulder

The dual-spacecraft Van Allen Probes mission has provided a new window into megaelectron Volt (MeV) particle dynamics in the Earth's radiation belts. Observations (up to $E \sim 10$ MeV) show clearly the behavior of the outer electron radiation belt at different time scales: months-long periods of gradual inward radial diffusive transport and weak loss being punctuated by dramatic flux changes driven by strong solar wind transient events. Analysis of multi-MeV electron flux and phase space density (PSD) changes during March 2013 are presented in the context of the first year of Van Allen Probes operation. This March period demonstrates the classic signatures both of inward radial diffusive energization as well as abrupt localized acceleration deep within the outer Van Allen zone ($L \sim 4.0 \pm 0.5$). This reveals graphically that both "competing" mechanisms of multi-MeV electron energization are at play in the radiation belts, often acting almost concurrently or at least in very rapid succession. It also shows in remarkable ways how the coldest plasmas in the magnetosphere intimately control the most highly energetic particles.

キーワード: Van Allen Probes, Radiation belts, Solar wind, Electron energization

Keywords: Van Allen Probes, Radiation belts, Solar wind, Electron energization

Particle Acceleration in Kinetic Eigenmodes from the Van Allen Probes Particle Acceleration in Kinetic Eigenmodes from the Van Allen Probes

CHASTON, Christopher^{1*}; BONNELL, John²; WYGANT, John³; KLETZING, Craig⁴; MOZER, Forrest²; BALE, Stuart²; KURTH, William⁴; HOSPARDARSKY, George⁴; KERSTEN, Kris³; BRENNEMAN, Aaron³; SMITH, Charles⁵; MACDONALD, Elizabeth⁶

CHASTON, Christopher^{1*}; BONNELL, John²; WYGANT, John³; KLETZING, Craig⁴; MOZER, Forrest²; BALE, Stuart²; KURTH, William⁴; HOSPARDARSKY, George⁴; KERSTEN, Kris³; BRENNEMAN, Aaron³; SMITH, Charles⁵; MACDONALD, Elizabeth⁶

¹School of Physics, University of Sydney, Sydney, NSW, Australia, ²Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, CA, USA, ³School of Physics and Astronomy, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, ⁴Department of Physics and Astronomy, University of Iowa, Iowa City, IA, USA, ⁵Department of Physics and IEOS, University of New Hampshire, Durham, NH, USA, ⁶Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA

¹School of Physics, University of Sydney, Sydney, NSW, Australia, ²Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, CA, USA, ³School of Physics and Astronomy, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, ⁴Department of Physics and Astronomy, University of Iowa, Iowa City, IA, USA, ⁵Department of Physics and IEOS, University of New Hampshire, Durham, NH, USA, ⁶Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA

The Van Allen Probes have revealed the presence of a broad spectrum of narrow scale Alfvén eigenmodes in the inner magnetosphere during geomagnetic storms. Here we use observations from the Van Allen Probes to build a reduced MHD model for these waves in a dipolar geomagnetic field. This model is then used to explore the manner through which particles may be accelerated in these wavefields. Test particle simulations show that the narrow perpendicular scale and parallel electric fields carried by these waves lead to the violation of the 1st and 2nd adiabatic invariants for ions. This can drive the heating of the thermal ion population to multi-keV temperatures and the acceleration of a small fraction of these particles to energies exceeding 100 keV. This process has obvious implications for the storm time ring current, but also for the acceleration/loss of radiation belt electrons.

キーワード: Particle acceleration, Alfvén waves, van allen probes, field lines resonances, ring current, radiation belts
Keywords: Particle acceleration, Alfvén waves, van allen probes, field lines resonances, ring current, radiation belts

Van Allen Probes 衛星による内部磁気圏での酸素イオントラスの観測 Van Allen Probes observations of oxygen torus in the inner magnetosphere

能勢 正仁^{1*}; 桂華 邦裕²; Kletzing C. A.³; Smith C. W.⁴; MacDowall R. J.⁵; Kurth W. S.³; De Pascuale S.³
NOSE, Masahito^{1*}; KEIKA, Kunihiro²; KLETZING, C. A.³; SMITH, C. W.⁴; MACDOWALL, R. J.⁵; KURTH, W. S.³; DE
PASCUALE, S.³

¹ 京都大学・理学研究科, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ アイオワ大学・宇宙物理学部, ⁴ ニューハンプシャー大学・EOS 研究所, ⁵ NASA ゴダードスペースセンター

¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ³Department of Physics and Astronomy, University of Iowa, ⁴Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, University of New Hampshire, ⁵NASA Goddard Space Flight Center

The oxygen torus is found in the deep inner magnetosphere as enhancements of O^+ ion density in a limited L range. It was first reported by Chappell [1982] who used the DE-1/RIMS instrument. Horwitz et al. [1984, 1986] showed that the O^+ density sometimes becomes comparable to or exceeds the H^+ density at $L=3-4$. Following studies revealed that the oxygen torus is observed just inside the plasmasphere at all local time with higher occurrence frequency in the late evening and morning sectors. A recent study by Nosé et al. [2010] cast a new light on the oxygen torus as a one of essential factors of O^+ -rich ring current generation. They proposed that thermal O^+ ions preexisting in the oxygen torus are locally and nonadiabatically accelerated by fluctuations associated with dipolarization in the deep inner magnetosphere and contribute to ring current O^+ ions. Therefore investigation of the oxygen torus is important to understand the dynamics of ions of ionospheric origin in the inner magnetosphere.

We study the oxygen torus, using the magnetic field and plasma wave data obtained by the Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) instrument onboard the Van Allen Probes. We examine a few events on the dawnside in which toroidal standing Alfvén waves appear clearly. From the frequency of the toroidal waves, the magnetospheric local mass density (ρ) is estimated by solving the MHD wave equation for realistic models of the magnetic field and the field line mass distribution. We also estimate the local electron number density (n_e) from the plasma wave spectrograms by identifying narrow-band emission at the upper-hybrid resonance frequency. Assuming the quasi-neutral condition of plasma, we infer the local average ion mass (M) by ρ/n_e . It is found that M is generally less than 4 amu in the plasma trough, while it shows an enhancement of >6 amu near the plasmopause. This indicates an existence of the oxygen torus in the vicinity of the plasmopause. We will present the result and discuss possible formation mechanisms of the oxygen torus. Possible contribution of the oxygen torus to the formation of the O^+ -rich ring current will be also discussed.

Akebono observations of EMIC waves in the slot region of the radiation belts Akebono observations of EMIC waves in the slot region of the radiation belts

坂口 歌織^{1*}; 笠原 禎也²; 小路 真史³; 大村 善治⁴; 三好 由純³; 長妻 努¹; 熊本 篤志⁵; 松岡 彩子⁶
SAKAGUCHI, Kaori^{1*}; KASAHARA, Yoshiya²; SHOJI, Masafumi³; OMURA, Yoshiharu⁴; MIYOSHI, Yoshizumi³; NA-
GATSUMA, Tsutomu¹; KUMAMOTO, Atsushi⁵; MATSUOKA, Ayako⁶

¹ 情報通信研究機構, ² 金沢大学総合メディア基盤センター, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ⁴ 京都大学生存圏研究所, ⁵ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ⁶ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

¹National Institute of Information and Communications Technology, ²Information Media Center, Kanazawa University, ³Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ⁴Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ⁵Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, ⁶Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

We present a unique observation of electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves in the deep inner magnetosphere at $L = 2.5-5$ made by the Akebono satellite at altitudes of 3,300-8,700 km. The mode conversion, i.e., L mode (He⁺ band)→R mode (He⁺ band)→L mode (O⁺ band) was clearly identified from the equator to high latitudes. In addition, we found rising tone structures, recently identified as EMIC triggered emissions, which could lead to bursty precipitation of relativistic electrons. First, we estimated the ion composition ratio (H⁺, He⁺, O⁺) = (83%, 16%, 1%) from polarization analysis. Second, we estimated minimum resonant electron energies with the observed EMIC waves and triggered emissions to be 1-10 MeV. The satellite trajectory during the wave observation was primarily through the slot region of electron radiation belts. The collocation implies possible contribution of EMIC waves to formation of the slot region of radiation belts after a magnetic storm.

Keywords: EMIC wave, slot region of the radiation belt, mode conversion, triggered emission, ion composition ratio, Akebono satellite

サブストーム発生時のプラズマシートにおける酸素イオンの加速と輸送過程 Oxygen ion acceleration and transport in the near-Earth plasma sheet during an isolated substorm

中山 洋平^{1*}; 海老原 祐輔¹; 田中 高史²
NAKAYAMA, Yohei^{1*}; EBIHARA, Yusuke¹; TANAKA, Takashi²

¹ 京都大学生存圏研究所, ² 九州大学 宙空環境研究センター

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto university, ²SERC, Kyushu University

Rapid enhancements of energetic ions during a substorm are one of the unsolved issues in the inner magnetospheric research (<7 Re). Previously, two distinct processes have been suggested to explain the enhancements. The first one is transport from the near-earth plasma sheet, and the other one is local acceleration. To test the both process, we performed test particle simulation under the electric and magnetic fields that are self-consistently obtained by the global MHD simulation developed by Tanaka et al. (2010, JGR). Oxygen ions are released in the lobe region with an interval of 1 minutes. The distribution function in the lobe is assumed to be drifting Maxwellian. The temperature is assumed to be 20 eV, the density is 105 cm⁻³, and the parallel velocity is given by the MHD simulation. In total, a few hundreds of millions of particles are traced. Each test particle carries the real number of particles in accordance with the Liouville theorem. After tracing particles, we reconstruct 6-dimensional phase space density of the oxygen ions, as well as the directional differential number flux so as to be able to make a direct comparison with in-situ satellite observations. Just after a substorm onset, the differential flux of the ions is rapidly enhanced in the energy range from 50 to 150 keV at radial distance R greater than 7 on the nightside in the equatorial plane. The region of the enhanced flux propagates duskward, then to dayside because of grad-B and curvature drift of the ions. We also plotted energy versus time spectrograms of the differential flux at a fixed position to make a direct comparison with the CRRES satellite observation. At 7.2 Re and at 22.4 MLT, the ion flux is suddenly enhanced about 10 minutes after the onset. The enhancement appears first at 120 keV, followed by lower energy as time proceeds. The energy-time dispersion is similar to that observed by CRRES [Fu et al., 2002]. The steepness of the energy-time dispersion depends on the source location of the ions. After a while, a high energy ion flux appears first, followed by that at lower energies. This is called a drift echo, arising from the ions that encircled the Earth by the grad-B and curvature drift. We will discuss the acceleration processes in more detail, the role of pre-existing ions, and the total kinetic energy of the oxygen ions and its dependence on the source distribution function in terms of the ring current development.

Reference:

Fu, S. Y., Q. G. Zong, T. A. Fritz, Z. Y. Pu, and B. Wilken, Composition signatures in ion injections and its dependence on geomagnetic conditions, *J. Geophys. Res.*, 107(A10), 1299, doi:10.1029/2001JA002006, 2002.

Tanaka, T., A. Nakamizo, A. Yoshikawa, S Fujita, H. Shinagawa, H. Shimizu, T. Kikuchi, and K. K. Hashimoto, Substorm convection and current system deduced from the global simulation, *J. Geophys. Res.* 115, A05220, doi:10.1029/JA014676, 2010.

サブストーム時に現れる過遮蔽状態について：グローバルMHDシミュレーションによる考察
On the formation of overshielding triggered by a substorm onset: Global MHD simulation study

海老原 祐輔^{1*}; 田中 高史²; 菊池 崇³
EBIHARA, Yusuke^{1*}; TANAKA, Takashi²; KIKUCHI, Takashi³

¹ 京都大学生存圏研究所, ² 九州大学名誉教授, ³ 名古屋大学名誉教授

¹RISH, Kyoto University, ²Emeritus Professor, Kyushu University, ³Emeritus Professor, Nagoya University

The dawn-dusk convection electric field is a significant driver of transport of charged particles in the inner magnetosphere. When the dawn-disk convection electric field is enhanced, the ring current is developed, and the plasmasphere is shrunk. Ground-based observations have shown that, sometimes, the polarity of the convection electric field is reversed after a substorm onset. The presence of the dusk-dawn electric field is called an overshielding condition. Here, we demonstrate that the overshielding condition can appear after a substorm onset on the basis of a global MHD simulation. Immediately after the substorm onset manifested by a sudden decrease in the AL index and auroral brightening, the plasma pressure is enhanced in the inner magnetosphere. The simulated magnetic field on the ground shows a negative excursion in the polar cap, a positive excursion at auroral latitudes, and a negative excursion at sub-auroral latitudes at dusk. At noon and at equator (0 MLAT), the eastward electrojet starts to decrease just after the onset, and the westward electrojet appears about 10 min after the onset. All these variations are consistent with the observations. We discuss generation mechanisms, evolution of the overshielding condition in the ionosphere and the magnetosphere, and the redistribution of the charged particles trapped in the inner magnetosphere during the overshielding condition on the basis of the simulation solving drift transport equations.

斜め伝搬コーラス放射における非線形波動粒子相互作用 Nonlinear wave particle interactions in oblique whistler-mode chorus emissions

ナン デイビッド²; 大村 善治^{1*}
NUNN, David²; OMURA, Yoshiharu^{1*}

¹ 京都大学生存圏研究所, ² サザンプトン大学
¹RISH, Kyoto University, ²ECS School, Southampton University

The highly nonlinear phenomena of VLF chorus and triggered VLF emissions are of great interest due to their role in electron heating and precipitation, and are widely believed to be due to nonlinear cyclotron resonance between the narrow band wavefield and the anisotropic energetic electron population (\sim keV), the dominant mechanism being identified as nonlinear phase trapping. Considerable advances have been made in the theory and numerical simulation by assuming parallel (ducted) propagation [Nunn et al., 1997, 2009; Omura et al., 2008, 2009; Omura and Nunn, 2011]. Here we address the important issue of nonlinear wave particle interaction in oblique VLF wavefields. The treatment is of necessity non self-consistent. The narrow band wavefield is arbitrarily, but here chosen to be a CW field or a sophisticated model of a VLF chorus element based upon the theory of Omura et al. [2008, 2009]. We develop the electron equations of motion and then by backward trajectory integration compute resonant particle distribution function, resonant currents and thus local nonlinear growth rates. This may be done for any resonance order n and any field. As shown in Omura et al. [2008] nonlinear trapping for $n=1$ cyclotron resonance gives rise to a phase space hole in distribution function at the trap. Such a hole is also noted at higher order resonances (e.g. $n=2$) for sufficient wave amplitude and obliquity. For $n=1$ we find a marked saturation effect due to adiabatic effects, growth maximising at about 25pT and 2000km from the equator. For moderate obliquity $\vartheta < 20$ degrees the $n=1$ resonance is relatively unaffected but growth rolls off sharply at high obliquity. For the $n=0$ resonance for obliquity $\vartheta > 20$ degrees nonlinear trapping may occur giving a peak in phase space density. As trapped electrons are moving away from the equator adiabatic effects do not occur and maximum damping rates are at \sim 6000kms and at obliquities \sim 55 degrees. For the lower band rising chorus element model maximum $n=1$ growth is close to the equator, but maximum $n=0$ damping is found at the top of the frequency band at \sim 10000km downstream. Due to the coincidence of group and resonance velocities particles may be trapped near the equator and dragged a long way before detraping.

References

- Nunn, D., Y. Omura, H. Matsumoto, I. Nagano, and S. Yagitani (1997), The numerical simulation of VLF chorus and discrete emissions observed on the Geotail satellite using a Vlasov code, *J. Geophys. Res.*, 102, 27,083-27,097.
- Nunn, D., O. Santolik, M. Rycroft, and V. Trakhtengerts (2009), On the numerical modelling of VLF chorus dynamical spectra, *Ann. Geophys.*, 27, 2341-2359.
- Y. Omura, Y. Katoh, and D. Summers (2008), Theory and simulation of the generation of whistler-mode chorus, *J. Geophys. Res.*, 113, A04223.
- Y. Omura, M. Hikishima, Y. Katoh, D. Summers, and S. Yagitani (2009), Nonlinear mechanisms of lower band and upper band VLF chorus emissions in the magnetosphere, *Journal Geophysical Research*, 114, A07217.
- Omura, Y., and D. Nunn (2011), Triggering process of whistler mode chorus emissions in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 116, A05205.

キーワード: ホイッスラー波, 内部磁気圏, 波動粒子相互作用, シミュレーション, 非線形, コーラス放射
Keywords: whistler wave, wave-particle interaction, simulation, nonlinear, inner magnetosphere, chorus emissions

双極子磁場中でEMICトリガードエミッションによって引き起こされた相対論的電子のマイクロバースト
Relativistic electron microbursts induced by EMIC triggered emissions in the dipole magnetic field

久保田 結子^{1*}; 大村 善治¹
KUBOTA, Yuko^{1*}; OMURA, Yoshiharu¹

¹ 京都大学生存圏研究所

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

We perform test particle simulations of relativistic electrons interacting with electromagnetic ion cyclotron (EMIC) triggered emissions with rising-tone frequencies. We assume that the geomagnetic field is dipole because EMIC triggered emissions and radiation belt electrons are observed in the inner magnetosphere [1]. EMIC triggered emissions are generated by energetic protons injected into the inner magnetosphere and drifting westwards in the longitudinal direction. We study trajectories of relativistic electrons drifting eastwards interacting with EMIC triggered emissions over different longitudinal ranges. When relativistic electrons in the radiation belt interact with EMIC triggered emissions, some of them are trapped by a wave potential and efficiently guided down to lower pitch angles. Repeated interactions result in scattering of relativistic electrons into the loss cone [2]. Counting relativistic electrons which fall into the polar region, we find that half of the relativistic electrons interacting with EMIC triggered emissions are precipitated. We derive conditions of kinetic energies and pitch angles for efficient precipitation of relativistic electrons.

References

- [1] Pickett, J. S., et al. (2010), Cluster observations of EMIC triggered emissions in association with Pc1 waves near Earth's plasmapause, *Geophys. Res.*, 37, L09104.
[2] Omura, Y., and Zhao, Q., (2013), Relativistic electron microbursts due to nonlinear pitch-angle scattering by EMIC triggered emissions, *J. Geophys. Res.*, 118, 5008-5020.

Investigating the upper and lower energy cutoffs of EMIC-wave driven precipitation events Investigating the upper and lower energy cutoffs of EMIC-wave driven precipitation events

HENDRY, Aaron^{1*} ; RODGER, Craig¹ ; CARSON, Bonar¹ ; CLILVERD, Mark² ; RAITA, Tero³
HENDRY, Aaron^{1*} ; RODGER, Craig¹ ; CARSON, Bonar¹ ; CLILVERD, Mark² ; RAITA, Tero³

¹University of Otago, New Zealand, ²British Antarctic Survey, UK, ³SGO, Sodankyla, Finland

¹University of Otago, New Zealand, ²British Antarctic Survey, UK, ³SGO, Sodankyla, Finland

For some time theoretical modelling has shown that electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves should play an important role in the loss of relativistic electrons from the radiation belts, through precipitation of the electrons into the polar ionosphere. However, there are limited direct experimental observations of relativistic electron precipitation occurring, despite the indirect evidence for its importance.

Relativistic electron resonance takes place through "anomalous resonance" where the electron overtakes the wave. Until recently, it was thought that EMIC wave scattering interactions were limited to electrons with energies greater than 1-2 MeV. Recent theoretical modelling [Omura et al., JGR, 2012] has suggested that this lower limit may be as small as 100 keV when considering EMIC waves more like those experimentally observed (i.e. non-constant frequency which ramps with time on one second timescales). Using data from the POES satellites we confirm the presence of lower energy (<1 MeV) electron precipitation most likely driven by EMIC waves.

We report on a continuing study that determines the typical flux impacting the ionospheric D-region during EMIC-driven precipitation events, and the effect this has on ionospheric conditions. We examine a very large set of EMIC-driven electron precipitation events detected using data from the POES satellite constellation [Carson et al., JGR, 2013] and determine the typical precipitating electron and proton fluxes.

As part of this study, we investigate the response of the MEPED instruments on-board the POES satellites to better characterise the EMIC-driven precipitation. Using the results of a previously reported Monte-Carlo simulation of the MEPED electron and proton telescopes [Yando et al., JGR, 2011], we characterise the typical energy range and flux for both the precipitating electrons and protons observed in these events. We go on to show that such events will produce very significant D-region changes detectable using the ground-based Antarctic-Arctic Radiation-belt (Dynamic) Deposition - VLF Atmospheric Research Consortium (AARDDVARK) worldwide VLF receiver network.

キーワード: EMIC waves, electron precipitation, POES spacecraft, AARDDVARK, radiation belts, particle precipitation
Keywords: EMIC waves, electron precipitation, POES spacecraft, AARDDVARK, radiation belts, particle precipitation

Plasmaspheric Content as Revealed by Spaceborne GPS Observations Plasmaspheric Content as Revealed by Spaceborne GPS Observations

TSAI, Ho-fang^{1*}; CHOU, Min-yang¹; CHEN, Chao-yen²; LIN, Charles¹; LIU, Jann-yenq²
TSAI, Ho-fang^{1*}; CHOU, Min-yang¹; CHEN, Chao-yen²; LIN, Charles¹; LIU, Jann-yenq²

¹Dept. of Earth Sciences, National Cheng Kung University, Taiwan, ²Institute of Space Science, National Central University, Taiwan, ³National Space Organization, Taiwan

¹Dept. of Earth Sciences, National Cheng Kung University, Taiwan, ²Institute of Space Science, National Central University, Taiwan, ³National Space Organization, Taiwan

The FORMOSAT-3/COSMIC (F3/C) mission has been operating for more than seven years. The F3/C low earth orbit (LEO) satellites receive the signals from the global positioning system (GPS) for sounding of the atmosphere and the ionosphere of the earth, including the plasmasphere. The plasmasphere above ionosphere acts like a reservoir; it takes plasma from the ionosphere by day, stores it in a loss-free environment, and returns it to the ionosphere at night. For the non-radio occultation observation of the F3/C, we study the morphology of the plasmaspheric electron content (PEC) derived from F3/C raw observation data, which includes the diurnal variations of the time-series PEC, two-dimensional distribution and the interaction with the ionosphere.

キーワード: plasmasphere, FORMOSAT-3/COSMIC, GPS
Keywords: plasmasphere, FORMOSAT-3/COSMIC, GPS

Polarization and occurrence statistics of VLF/ELF chorus waves at sub-auroral latitudes at Athabasca, Canada.
Polarization and occurrence statistics of VLF/ELF chorus waves at sub-auroral latitudes at Athabasca, Canada.

MARTINEZ CALDERON, Claudia^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; MIYOSHI, Yoshizumi¹; OZAKI, Mitsunori²; SCHOFIELD, Ian³; CONNORS, Martin³
MARTINEZ CALDERON, Claudia^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; MIYOSHI, Yoshizumi¹; OZAKI, Mitsunori²; SCHOFIELD, Ian³; CONNORS, Martin³

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, Japan, ²Kanazawa University, Kanazawa, Japan, ³Athabasca University, Athabasca, Canada

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, Japan, ²Kanazawa University, Kanazawa, Japan, ³Athabasca University, Athabasca, Canada

Chorus waves are whistler-mode emissions in the very low frequency (VLF) range that are one of the most intense and common natural emissions. They are generated in the inner magnetosphere at the geomagnetic equator and follow the geomagnetic field lines into the ionosphere and the ground. They are believed to be *one of the major contributions to the acceleration and scattering of radiation belt particles* (e.g., Inan et al., 1982; Omura et al., 2007). Consequently we are interested in the *spatial and temporal motion of the acceleration region of radiation belt electrons*, which might be directly linked to the motion of the Ionospheric footprints of VLF/ELF waves.

For a period of 9 days, from February 17 to 25, 2012, the VLF-CHAIN campaign observed VLF/ELF emissions at sub-auroral latitudes using two loop antennas at Athabasca (MLAT=61.31, L=4.3) and Fort Vermillion (MLAT=64.51, L=5.4), Canada.

Several interesting features of chorus emissions have been observed such as quasi-periodic emissions, falling-tone and rising-tone chorus, as well as *Bursty-Patch* emissions. We have applied polarization and spectral analysis to make **the first comprehensive study of the physical properties of VLF/ELF chorus waves at sub-auroral latitudes**. Combining these analyses with a triangulation method we have also identified the location and motion of the Ionospheric exit points of these various types of chorus waves.

Furthermore, after September 24, 2012, continuous measurements of VLF/ELF waves with a sampling rate of 100 kHz have been made at Athabasca. Based on this data we show in this presentation the preliminary results of a one-year statistical analysis of frequency and occurrence rate of VLF/ELF chorus waves at sub-auroral latitudes.

キーワード: VLF, Chorus Waves, Polarization analysis, Ionospheric exit point, Sub-auroral latitudes

Keywords: VLF, Chorus Waves, Polarization analysis, Ionospheric exit point, Sub-auroral latitudes

Nonlinear analysis of magnetospheric wave-particle interactions Nonlinear analysis of magnetospheric wave-particle interactions

SUMMERS, Danny^{1*} ; TANG, Rongxin² ; OMURA, Yoshiharu³
SUMMERS, Danny^{1*} ; TANG, Rongxin² ; OMURA, Yoshiharu³

¹Memorial University of Newfoundland, St John's, Canada, ²Nanchang University, China, ³Kyoto University, Japan
¹Memorial University of Newfoundland, St John's, Canada, ²Nanchang University, China, ³Kyoto University, Japan

The dynamics of the Earth's radiation belts are largely controlled by wave-particle interactions. Gyro-resonant whistler-mode chorus - electron interactions can generate relativistic (MeV) electrons in the outer zone during magnetic storms. Whistler-mode waves can pitch-angle scatter electrons and induce precipitation loss from the inner magnetosphere. Here we analyze the growth of magnetospheric whistler mode waves with particular emphasis on the nonlinear growth phase. We show that nonlinear wave growth can only take place over a restricted parameter space. We examine the conditions under which chorus wave growth can take place, and discuss how the results can be compared with computer simulations and experimental observations.

キーワード: wave-particle interactions, whistler-mode waves, radiation belts, nonlinear cyclotron resonance, chorus wave growth
Keywords: wave-particle interactions, whistler-mode waves, radiation belts, nonlinear cyclotron resonance, chorus wave growth

EUV 撮像データを用いた地球プラズマ圏密度分布の抽出 Retrieval of plasmaspheric He⁺ density field-aligned distributions from EUV imaging data

桂華 邦裕^{1*}; Brandt Pontus C.²; Toigo Anthony²; Robert DeMajistre²
KEIKA, Kunihiro^{1*}; BRANDT, Pontus C.²; TOIGO, Anthony²; ROBERT, Demajistre²

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² ジョンズホプキンス大学応用物理学研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory

1 価のヘリウムイオン (He⁺) は極端紫外線 (EUV) を散乱させるため、地球プラズマ圏を構成する He⁺ によって散乱された太陽 EUV を遠隔観測することで、地球プラズマ圏を撮像することができる。本研究では、Forward modeling 手法を用いて、EUV 撮像データから地球プラズマ圏 He⁺ 密度の空間分布を抽出する。特に、磁力線方向の密度分布が精度良く抽出できるかどうかを調査する。Forward modeling 手法には、L 値と磁気緯度の関数となるようにパラメータ化されたモデルを用いる。モデル精度を評価するために、(1) パラメータ化された密度分布の 1 例と、(2) 電離圏プラズマ圏物理モデルの結果、を模擬観測データとしてモデルに適用する。

キーワード: プラズマ圏, ヘリウムイオン密度, 内部磁気圏, プラズマ最充填, Forward modeling

Keywords: Plasmasphere, Helium ion density, Inner magnetosphere, Plasma refilling, Forward modeling

あけぼの衛星のPWS観測データによるプラズマ圏構造の太陽活動による変動 Solar-cycle variation of the plasmasphere observed from the Akebono PWS data

長谷川 周平^{1*}; 三好 由純¹; 北村 成寿¹; 桂華 邦裕¹; 小路 真史¹; 熊本 篤志²; 町田 忍¹
HASEGAWA, Shuhei^{1*}; MIYOSHI, Yoshizumi¹; KITAMURA, Naritoshi¹; KEIKA, Kunihiro¹; SHOJI, Masafumi¹; KU-
MAMOTO, Atsushi²; MACHIDA, Shinobu¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Department of Geophysics, Graduate School of Science, To-
hoku University

プラズマ圏は電離圏起源の冷たいプラズマが宇宙空間に湧き上がって形成される領域であり、地磁気活動に応じてその構造が変化することが知られている。プラズマ圏の密度分布は多くの衛星で観測されているものの、1太陽活動周期以上にわたる連続観測は例がなく、太陽活動に応じてどのような変化をしているかはよくわかっていない。本研究では、20年間のあけぼの衛星のPWS観測によるプラズマ圏電子密度データから、プラズマ圏電子密度構造の太陽活動依存性を調べた。また、磁力線に沿った密度構造が $N_e = N_{e0}(LR_E/R)^\alpha$ に従うと仮定し、高度4000 km以上、磁気静穏時のデータに対して、 α と赤道上の密度 N_{e0} の太陽活動による変動を求めた。その結果、内部プラズマ圏 ($L=2.1-2.3$)では、太陽周期において密度構造はほぼ一定で $N_{e0} \approx 2000 \text{ cm}^{-3}$ 、 $\alpha = 0-1$ となり、一方、外部プラズマ圏 ($L=4.2-4.7$)では、密度構造が太陽活動によって大きく変化し、太陽活動極小期では $N_{e0} \sim 200 \text{ cm}^{-3}$ 、 $\alpha = 0-1$ となり、太陽活動極大期では $N_{e0} \sim 30 \text{ cm}^{-3}$ 、 $\alpha = 2-3$ となった。

プラズマ圏の電子密度の磁力線に沿った分布については、拡散平衡モデル、無衝突モデルが知られている。あけぼの衛星から導出された沿磁力線方向の密度分布とモデルとを比較したところ、内部プラズマ圏の密度構造は、拡散平衡モデルで説明される分布に近いことが示された。一方、外部プラズマ圏については、太陽活動極小期には拡散平衡モデルで説明される分布に近く、一方太陽活動極大期には無衝突モデルで説明される分布に近いことがわかった。

キーワード: プラズマ圏, 電子密度, あけぼの衛星, 太陽周期

Keywords: plasmasphere, electron density, akebono satellite, solar-cycle

あけぼの衛星を用いた内部磁気圏 EMIC 波動の統計解析 Statistical analysis of EMIC waves in the inner magnetosphere from the Akebono observations

加藤 佑一^{1*}; 三好 由純¹; 坂口 歌織²; 笠原 禎也³; 桂華 邦裕¹; 北村 成寿¹; 小路 真史¹; 長谷川 周平¹; 熊本 篤志⁴; 塩川 和夫¹

KATO, Yuichi^{1*}; MIYOSHI, Yoshizumi¹; SAKAGUCHI, Kaori²; KASAHARA, Yoshiya³; KEIKA, Kunihiro¹; KITAMURA, Naritoshi¹; SHOJI, Masafumi¹; HASEGAWA, Shuhei¹; KUMAMOTO, Atsushi⁴; SHIOKAWA, Kazuo¹

¹ 太陽地球環境研究所, ² 情報通信研究機構, ³ 金沢大学総合メディア基盤センター, ⁴ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Japan, ²National Institute of Information and Communications Technology, ³Information Media Center, Kanazawa University, ⁴Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

内部磁気圏で観測される電磁イオンサイクロトロン (EMIC) 波動は、リングカレントイオンおよび放射線帯の相対論的電子のピッチ角散乱を引き起こす。CRRES や THEMIS、AMPTE 衛星等によって、EMIC 波動の空間分布は研究されてきたが、緯度方向の分布についての研究はほとんどされていない。本研究はこれまで、1989 年から内部磁気圏を観測している Akebono 衛星の大量のデータにたいして、EMIC 波動を自動的に抽出するアルゴリズムを開発し、EMIC 波動分布を調査することで、プラズマ圏内部でも EMIC 波動が定常的に発生することを明らかにした。現在、この EMIC イベントのデータベースを基に、EMIC 波動発生時に同時観測した密度データを用いて、プラズマ周波数と電子サイクロトロン周波数の割合 f_p/f_c と、イオンの共鳴エネルギーについての解析を行っている。本発表では、2 太陽活動周期における EMIC 波動の空間分布の変化、および観測された EMIC 波動と共鳴するイオンエネルギー等の考察を行った結果について報告する。

キーワード: 電磁イオンサイクロトロン, EMIC 波動, 統計解析, 内部磁気圏

Keywords: Electromagnetic Ion Cyclotron, EMIC wave, Statistical analysis, inner magnetosphere

地上磁場観測から得られた Pc1 地磁気脈動の分散関係 Dispersion relation of Pc1 geomagnetic pulsations using ground-magnetometer observations

野村 麗子^{1*}; Plaschke Ferdinand²; 成田 康人²; Glassmeier Karl-Heinz¹; 藤田 茂³; Mann Ian⁴
NOMURA, Reiko^{1*}; PLASCHKE, Ferdinand²; NARITA, Yasuhito²; GLASSMEIER, Karl-heinz¹; FUJITA, Shigeru³;
MANN, Ian⁴

¹IGEP, TU Braunschweig, ²Space Research Institute Austrian Academy of Sciences, ³気象庁気象大学校, ⁴University of Alberta
¹IGEP, TU Braunschweig, ²Space Research Institute Austrian Academy of Sciences, ³Meteorological College, Japan Meteorological Agency, ⁴University of Alberta

サブオーロラ帯の地上磁場で観測される Pc1 地磁気脈動 (Pc1) は、プラズマ圏境界面付近で励起したイオンサイクロトロン波動が電離圏まで伝搬するためだと考えられている。電離圏に到達した波動は、電子密度勾配によって生じる電離圏ダクト中にペダーセン・ホール電流を流し、アルベン波動と磁気音波を生成する。その波動による磁場変動が地上磁場によって Pc1 として観測される。

電離圏ダクト中における Pc1 波動の伝搬については、波動の減衰の周波数依存性、極性の水平空間分布や分散関係等がこれまでモデル計算によって示されてきた。そのうち特に、波動の伝搬に寄る減衰や波動の極性については、これまで地上観測を用いて観測的に明らかにされてきた。しかしながら、Pc1 波動の分散関係は観測実証が行われたことがなかった。本発表では、2011年5月27日にカナダの CARISMA 磁力計チェーンで観測された Pc1 波動について、Wave telescope 解析法の適用から得られた Pc1 波動の分散関係を示す。

キーワード: Pc1, EMIC waves, dispersion relation, ionospheric duct

Keywords: Pc1, EMIC waves, dispersion relation, ionospheric duct

A Brief History of Collaborative Study on Equatorial MLT Dynamics using Meteor and MF Radars in Indonesia

A Brief History of Collaborative Study on Equatorial MLT Dynamics using Meteor and MF Radars in Indonesia

TSUDA, Toshitaka^{1*} ; DJAMALUDDIN, Thomas² ; YATINI, Clara² ; BUDIYONO, Afif² ; VINCENT, Robert³ ; REID, Iain³
TSUDA, Toshitaka^{1*} ; DJAMALUDDIN, Thomas² ; YATINI, Clara² ; BUDIYONO, Afif² ; VINCENT, Robert³ ; REID, Iain³

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, ²Indonesian National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN), ³Department of Physics, University of Adelaide

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, ²Indonesian National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN), ³Department of Physics, University of Adelaide

In the tropics active cumulus convection generates various atmospheric waves, such as Kelvin waves, planetary waves, tides, and gravity waves. The wave energy and momentum are transported upward through propagating of these waves. Wave-mean flow interactions are crucially important for understanding of dynamical processes in the equatorial atmosphere, including the formation of peculiar long-term variations such as quasi-biennial oscillation (QBO) and semi-annual oscillation (SAO) in both the stratosphere and the MLT (mesosphere and lower thermosphere) region (70-120 km).

We constructed a total of five meteor and medium frequency (MF) radars in Indonesia since 1992 under close collaboration between RISH, LAPAN and the University of Adelaide. The MLT radar network has been expanded in India, Central and Eastern Pacific, and China. These radars have clarified the behavior of atmosphere dynamics in the MLT region. This paper gives an overview of our collaborative studies as well as highlights of scientific achievements using the MLT radar network

キーワード: mesosphere and lower thermosphere, equatorial atmosphere, atmospheric waves, meteor radar, medium frequency radar, Indonesia

Keywords: mesosphere and lower thermosphere, equatorial atmosphere, atmospheric waves, meteor radar, medium frequency radar, Indonesia

Atmospheric Waves in the MLT: A Review Atmospheric Waves in the MLT: A Review

VINCENT, Robert^{1*}
VINCENT, Robert^{1*}

¹University of Adelaide
¹University of Adelaide

Through their efficient transfer of energy and momentum, atmospheric waves propagating up from the lower atmosphere play an important role in determining the structure of the Mesosphere/Lower Thermosphere (60-100 km). A wide range of wave types are involved, with periods ranging from minutes to days. Here we review developments in our understanding of wave coupling and impacts on the MLT, with an emphasis on developments in the past decade.

キーワード: MLT Dynamics, Gravity Waves, Atmospheric Tides, Planetary Waves
Keywords: MLT Dynamics, Gravity Waves, Atmospheric Tides, Planetary Waves

MLT 領域での nonmigrating tide のふるまいについて Behavior of non-migrating tides in the MLT region

三好 勉信^{1*}; 藤原 均²
MIYOSHI, Yasunobu^{1*}; FUJIWARA, Hitoshi²

¹九州大学, ²成蹊大学
¹Kyushu University, ²Seikei University

It is well established that non-migrating tides have significant amplitudes in the mesosphere and lower thermosphere (MLT). Using a general circulation model that contain the region from the ground surface to the upper thermosphere, behavior and excitation sources of non-migrating tides are examined. In this study, behaviors of the westward moving semidiurnal tide with zonal wavenumber 1 (SW1), the semidiurnal tide with zonal wavenumber 0 (S0) and the diurnal tide with zonal wavenumber 0 (D0) are examined in detail. There are two main sources for non-migrating tides. One is latent heat release due to the cumulus convection in the troposphere. The other is the nonlinear interaction between the migrating tide and the stationary planetary wave in the middle atmosphere. Our results indicate that the amplitudes of SW1, S0 and D0 are enhanced when the stationary planetary wave in the stratosphere and mesosphere is active. This means that SW1, S0 and D0 are mainly excited by the nonlinear interaction between the migrating tide and the stationary planetary wave. Furthermore, we discuss excitation sources of other non-migrating tides, such as the eastward moving diurnal tide with zonal wavenumber 3 (DE3) and the eastward moving semidiurnal tide with zonal wave number 2 (SE2).

キーワード: 大気潮汐波, 大気大循環モデル
Keywords: Tides, General Circulation Model

Long-term observations of MLT zonal wind variations in relation to stratospheric zonal winds over low-latitudes
Long-term observations of MLT zonal wind variations in relation to stratospheric zonal winds over low-latitudes

GRANDHI, Kishore kumar^{1*} ; KARANAM, Kishore kumar² ; SINGER, Werner¹ ; ZULICKE, Christoph¹ ; S, Gurubaran³ ; GERD, Baumgarten¹ ; RAMKUMAR, Geetha² ; S, Sathishkumar⁴ ; RAPP, Markus⁵
GRANDHI, Kishore kumar^{1*} ; KARANAM, Kishore kumar² ; SINGER, Werner¹ ; ZULICKE, Christoph¹ ; S, Gurubaran³ ; GERD, Baumgarten¹ ; RAMKUMAR, Geetha² ; S, Sathishkumar⁴ ; RAPP, Markus⁵

¹Leibniz Institute of Atmospheric Physics, University of Rostock, Kuhlungsborn, Germany, ²Space Physics Laboratory, Vikram Sarabhai Space Center, Trivandrum, India, ³Indian Institute of Geomagnetism, Navi Mumbai, India, ⁴Equatorial Geophysical Research Laboratory, Indian Institute of Geomagnetism, Tirunelveli, India, ⁵German Aerospace Center Institute of Atmospheric Physics (IPA), Oberpfaffenhofen, Wessling, Germany

¹Leibniz Institute of Atmospheric Physics, University of Rostock, Kuhlungsborn, Germany, ²Space Physics Laboratory, Vikram Sarabhai Space Center, Trivandrum, India, ³Indian Institute of Geomagnetism, Navi Mumbai, India, ⁴Equatorial Geophysical Research Laboratory, Indian Institute of Geomagnetism, Tirunelveli, India, ⁵German Aerospace Center Institute of Atmospheric Physics (IPA), Oberpfaffenhofen, Wessling, Germany

Long-term observations from medium-frequency and meteor radars (1993-2012) and rocket soundings (1979-1990 and 2002-2007) are used to study mesosphere lower thermosphere (MLT) zonal wind variations in relation to the stratospheric winds over Northern low-latitudes. The combined dataset provide a complete height profile of amplitude of semiannual oscillation (SAO) up to 100 km, with an exception around 75-80 km. The SAO signal has maxima around 50 km and 82 km and a minimum around 65 km. The MLT zonal winds show remarkable inter-annual variability during spring equinox and much less during fall equinox. Zonal wind mesospheric spring equinox enhancements (MSEE) appear with a periodicity of 2-3 years suggesting a modulation by the quasi-biennial oscillation, which we identified with the strength of stratospheric westward winds. Out of 20 years of observations, the stratospheric westward winds are strong during 11 years (non-MSEE) and weak during 9 years. Six of these years show large MLT winds (MSEE) and 3 years (1999, 2004 and 2006) show small MLT winds (missing-MSEEs). These unexpected small winds occur in years with global circulation anomalies as identified with strong sudden stratospheric warmings and an early spring transition of zonal winds, along with a minor enhancement in the tidal amplitudes.

キーワード: MLT winds, MSAO, Meteor radar, MF radar, QBO
Keywords: MLT winds, MSAO, Meteor radar, MF radar, QBO

The saturation of gravity waves traveling from the lower to the upper atmosphere observed by the MU radar and understood
The saturation of gravity waves traveling from the lower to the upper atmosphere observed by the MU radar and understood

加藤 進^{1*}; 津田 敏隆¹; 山本 衛¹; 中村 卓司²

KATO, Susumu^{1*}; TSUDA, Toshitaka¹; YAMAMOTO, Mamoru¹; NAKAMURA, Takuji²

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ²National Polar Research Institute)

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ²National Polar Research Institute)

The MU radar of Kyoto University was constructed in 1984. One of the main purpose of the radar construction is to observe atmospheric gravity waves particularly to find how gravity waves saturate in traveling from the lower atmosphere to the upper atmosphere. In the 1980s Matsuno, Geller and others put forwards an idea suggesting that the gravity wave saturation may release momentum for driving the mesosphere general circulation. Their idea is based on rocket and satellite global- observation of winds and temperature varying peculiarly with seasons in the mesosphere.

Our MU radar observation has been successful in proving the gravity wave momentum release to be in a good agreement with the required quantity for the mesosphere general circulation. Also our success of precise measurements of the saturated gravity wave power spectrum strongly supports to explain the gravity wave saturation idea in terms of a simple theory based on the linear or monochromatic gravity wave theory by Hines in 1960.

Our theory on the basis of our MU radar observation shows that the gravity wave saturation is attained for each gravity wave in amplitude reaching the phase speed due to a balance between the increasing amplification expected by the linear theory and non-linear braking effects. We can consider that the original gravity wave dispersion relation is maintained upon the saturation.

Gravity waves should experience a number of such saturations before reaching the thermosphere on the way.

Ducted Concentric Gravity Wave Observed by IMAP/VISI Associated with Super Typhoon Haiyan

Ducted Concentric Gravity Wave Observed by IMAP/VISI Associated with Super Typhoon Haiyan

PERWITASARI, Septi^{1*}; SAKANOI, Takeshi¹; YAMAZAKI, Atsushi²; OTSUKA, Yuichi³; HOZUMI, Yuta⁴; AKIYA, Yusuke⁴; SAITO, Akinori⁴; SUZUKI, Shin³
PERWITASARI, Septi^{1*}; SAKANOI, Takeshi¹; YAMAZAKI, Atsushi²; OTSUKA, Yuichi³; HOZUMI, Yuta⁴; AKIYA, Yusuke⁴; SAITO, Akinori⁴; SUZUKI, Shin³

¹PPARC, Tohoku University, ²JAXA/ISAS, ³STEL, Nagoya University, ⁴Geophysics Dept., Kyoto University

¹PPARC, Tohoku University, ²JAXA/ISAS, ³STEL, Nagoya University, ⁴Geophysics Dept., Kyoto University

Although the convection activity in the troposphere is generally accepted as one of important source of gravity waves in the mesosphere and lower thermosphere, however it is still uncertain how these waves can reach these regions and what types of waves are generated. For decades, the study of gravity waves has been classified into two categories; first is that the waves travel directly from the source and the second is that the waves are ducted or trapped. Many studies tried to explain both categories yet all studies focused on gravity waves produced by transient events. There were almost no observation reports of airglow emissions during a large storm and what type of gravity waves and typical wavelength can be produced from such event. To address this issue, a space-based observation is more preferable since it covers wider area. Until recently, IMAP/VISI is the only space-based instrument that capable of imaging gravity waves above the troposphere in the nadir direction. The Visible and near-Infrared Spectral Imager (VISI) of the IMAP mission was launched successfully on July 21, 2012 with H-IIB/HTV-3 and installed onto the International Space Station (ISS). IMAP/VISI is now operated in the night side hemisphere with a range of +/- 51 deg. GLAT. IMAP/VISI is measuring three different airglow emissions of OI at 630 nm, the OH Meinel band at 730 nm and the O₂ (762 nm) atmospheric band at 762 nm at an altitude of ~400 km with the typical spatial resolution of 16-50 km.

We found concentric gravity waves events in the southeastern part of Australia that was observed around 13-15 UT for 3 days from 6-8 November 2013 in O₂ (0-0) airglow emission by IMAP/VISI. The waves have horizontal wavelength vary from 80 – 210 km. By using the least squares method, the curvature of the waves was fitted to a perfect circle. The center of the wave was found to be around 155°E; -42°S with the radius varies from 400-1200 km. From the meteorological satellite, we cannot locate any convective source around the center of the wave. The nearby local convective source was located a few hundreds km to the south of the wave center and the rainfall rate was less than 10 mm/hr. Therefore, we rule out the possibility of local convective activity as the source of these waves. From the past studies, there were evidences that the gravity waves may be ducted and traveled a great distance away from a specific convective source (e.g. Nakamura et al., 1999; Walterscheid et al., 1999; Hecht et al., 2001). Their studies suggested that the gravity waves observed in Australia were originated from convective activity several thousands km north of Australia. During the observed events, the Typhoon Haiyan was underway. On November 6, the typhoon was categorized as 5 – equivalent of super typhoon and reached its peak on November 7 and then made a landfall in Philippine on November 8. In this study, we argue that the concentric gravity waves seen by IMAP/VISI could be generated by the intense convective activity associated with the Haiyan Typhoon event. Background wind data from TIDI (TIMED Doppler Interferometer) and MF Radar will be used to examine the plausibility for the formation of a ducted/trapped region that can explain the long distance propagation of these waves. The temperature profile from MSISE-90 model will also be used to examine the mesospheric inversion layer and if it's possible to get the data, we will also use the ground-based airglow imager data from Adelaide and Alice Spring.

キーワード: IMAP/VISI, O₂ (0-0), concentric gravity wave, ducted, typhoon Haiyan

Keywords: IMAP/VISI, O₂ (0-0), concentric gravity wave, ducted, typhoon Haiyan

The MF Radar Technique: a Review The MF Radar Technique: a Review

REID, Iain^{1*}

REID, Iain^{1*}

¹Department of Physics, University of Adelaide, ²ATRAD Pty Ltd

¹Department of Physics, University of Adelaide, ²ATRAD Pty Ltd

The Medium Frequency (MF) radar technique has been applied for more than five decades to measure winds and turbulence in the upper atmosphere in the region between 60 and 100 km during the day, and between 80 and 100 km at night. It is one of the few techniques able to provide winds reliably in the 60 to 80 km height region during the day. Although some care is needed in interpretation of the results, it remains a powerful and very useful technique. In this paper, we review the technique and highlight some recent recent results.

キーワード: Radar, Medium Frequency, Spaced Antenna, Mesosphere Lower Thermosphere, Winds, Turbulence
Keywords: Radar, Medium Frequency, Spaced Antenna, Mesosphere Lower Thermosphere, Winds, Turbulence

アラスカ及びトロムソ MF レーダーで観測された 中間圏重力波の日内変動 Tidal periodicity of mesospheric gravity waves observed with MF radar at Poker Flat, Alaska and at Tromsø, Norway

村山 泰啓^{1*}; 木下 武也¹; 川村 誠治¹; 野澤 悟徳²; ホール クリス³
MURAYAMA, Yasuhiro^{1*}; KINOSHITA, Takenari¹; KAWAMURA, Seiji¹; NOZAWA, Satonori²; HALL, Chris³

¹ 情報通信研究機構, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ トロムソ大学

¹National Institute of Information and Communications Technology, ²Solar-Terrestrial Physics Laboratory, ³Tromsø University

中間圏における重力波と潮汐波、それらの相互作用に関する観測研究は、以前から様々な地点で行われてきた (e.g., Saskatoon, Canada (Manson et al. 1998), Rothera, Antarctica (Beldon and Mitchell, 2010)). アラスカではポーカーフラット、ノルウェーではトロムソに設置された MF レーダーにより、中間圏から下部熱圏における中性風速データが 1990 年代後半より蓄積されている。本研究では昨年引き続き、潮汐波と重力波の結合プロセスの理解を深めるため、10 年間 (1999 ~ 2008 年) の上記観測データを用いて、中間圏重力波と 12 時間及び 24 時間周期成分の日内および季節変動を調べた。まず始めに、トロムソ MF レーダー観測の水平風速 30 分間隔データ 5 日分の時系列に 8, 12, 24, 48 時間周期成分の調和フィッティングを行った。重力波はこれらの残差で 1~12 時間周期を持つ擾乱と定義した。上記手法を 30 分間隔ごとに適用し、12 時間及び 24 時間周期成分の振幅や位相の 5 日間移動平均値を計算した。得られた 12 時間及び 24 時間周期成分と重力波の運動エネルギーとの関係を調べた結果、今年の解析におけるポーカーフラット MF レーダー観測で 5~8 月に見られた 1~4 時間周期の重力波運動エネルギーの 2 つのピークは見られなかった。一方で 11~2 月にかけて、6UT 付近でエネルギーの増大が確認された。これは、24 時間周期成分の東風が最大、または 12 時間周期成分の東風から西風に変わる時刻に対応していた。続いて、ポーカーフラット MF レーダー観測で 2000 年 11 月 15 日から約 20 日間続いた東西風の半日成分の位相に重力波運動エネルギーがロックされる現象がトロムソでも見られるか確認した。その結果、同日から約 10 日間は同様の現象が見られたが、重力波運動エネルギーの位相が 90 度ずれて対応していた。

ポーカーフラットで見られた現象は、この時期以外の期間、高度においてはよく見られ、一ヶ月以上続く事例も確認された。今後は、それぞれの地点における潮汐波の太陽同期、非同期成分及び背景場に焦点をあて、重力波特性の違いを引き起こす要因を明らかにすしたいと考えている。

南極昭和基地および Davis 基地上空の中間圏下部熱圏領域における短周期潮汐波の振る舞い
Characteristics of Short Period Tidal Components in Antarctic MLT above Syowa and Davis

堤 雅基^{1*}; Murphy Damian²
TSUTSUMI, Masaki^{1*}; MURPHY, Damian²

¹ 国立極地研究所, ² 豪南極局

¹National Institute of Polar Research, Japan, ²Australian Antarctic Division

The behaviour of short period atmospheric tidal components in the Antarctic mesosphere and lower thermosphere is studied based on long term observations over Syowa (69.0S, 39.6E) and Davis (68.6S, 78.0E) stations. Semidiurnal tides in the Antarctic mesosphere and lower thermosphere have been extensively studied through the recently established Antarctic radar network [e.g., Murphy et al., 2006; 2008]. However, details of shorter period components such as terdiurnal and six-hour tides are less investigated and poorly known because of their smaller amplitudes compared to the semidiurnal and diurnal tides in the height region of conventional MF radar observations of around 70-90 km. These short period tides also fall in the frequency range of inertial gravity waves and are often hard to distinguish from these waves.

The characteristics of the terdiurnal tide above Davis and Syowa have been measured on a short-term to seasonal basis in the mesosphere and lower thermosphere using long-term simultaneous MF radar data at the two sites (1999-). The terdiurnal tide achieves moderate amplitudes in the winter at these heights but there are subtle differences between the two stations. These differences are explored further by differencing tide phasors in local time and checking the amplitude of the result on a seasonal basis. If the terdiurnal tide was made up entirely of migrating components, this difference would yield a zero-average amplitude. However, the observed non-zero values suggest that the terdiurnal tide at these latitudes contains strong non-migrating tidal components.

The Syowa MF radar has a great advantage over other MF radars in that it has been conducting simultaneous meteor wind measurements together with the conventional correlation based measurements, which enables wind observations in a very wide height range of 65-120km [Tsutsumi and Aso, 2005]. A clear enhancement in terdiurnal amplitudes is seen in early winter months of March-June. The amplitudes can reach 20 m/s around 110 km even in the composite plot made with more than 10 years of data. These amplitudes can be comparable or sometimes even larger than those of diurnal and semidiurnal tides, and indicate a possible significant role of short period tidal components in the polar lower thermosphere.

Keywords: Antarctic, mesosphere and lower thermosphere, short period atmospheric tidal waves

SMILES が捉えた日食時の中間圏オゾンの変動について The SMILES observations of mesospheric ozone during the solar eclipse

今井 弘二^{1*}; 秋吉 英治²; 高橋 けんし³; 山下 陽介²; 今村 隆史²; 鈴木 睦¹; 海老沢 研¹; 塩谷 雅人³
IMAI, Koji^{1*}; AKIYOSHI, Hideharu²; TAKAHASHI, Kenshi³; YAMASHITA, Yousuke²; IMAMURA, Takashi²; SUZUKI,
Makoto¹; EBISAWA, Ken¹; SHIOTANI, Masato³

¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ² 国立環境研究所, ³ 京都大学 生存圏研究所

¹Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-hara, ²National Institute for Environmental Studies, ³Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Solar eclipse temporally reduces the amount of solar radiation, providing an opportunity to verify the ozone photochemistry under changing solar radiation. During the longest annular solar eclipse in this millennium occurred on 15 January 2010, Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES) successfully captured increased ozone mostly in the mesosphere with a decrease in solar illuminations. The ozone increment shows altitude dependence in the mesosphere. Using an atmospheric chemistry box model, it is found that the dependence results from the difference in chemical reaction rates to the solar radiation change. The model also predicts the difference in the ozone concentration evolution between the sunlight decreasing and increasing phases, although SMILES observation does not resolve the difference.

キーワード: SMILES, オゾン, 中間圏

Keywords: SMILES, ozone, mesosphere

超高層大気研究への IUGONET データ解析システムの貢献 Contribution of the IUGONET data analysis system to upper atmospheric researches

新堀 淳樹^{1*}; 八木 学²; 田中 良昌³; 佐藤 由佳³; 谷田貝 亜紀代⁴; 梅村 宜生⁴; 上野 悟⁵; 小山 幸伸⁶; 阿部 修司⁷
SHINBORI, Atsuki^{1*}; YAGI, Manabu²; TANAKA, Yoshimasa³; SATO, Yuka³; YATAGAI, Akiyo⁴; UMEMURA, Norio⁴;
UENO, Satoru⁵; KOYAMA, Yukinobu⁶; ABE, Shuji⁷

¹ 京都大学生存圏研究所, ² 東北大学理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター, ³ 国立極地研究所, ⁴ 名古屋大学太陽地球環境研究所 ジオスペース研究センター, ⁵ 京都大学大学院理学研究科附属天文台, ⁶ 京都大学大学院理学研究科附属地球磁気世界資料解析センター, ⁷ 九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, ²Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, ³National Institute of Polar Research, ⁴Nagoya University Solar Terrestrial Environment Laboratory Geospace Research Center, ⁵Kwasan & Hida Observatories, School of Science, Kyoto University, ⁶Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism Graduate School of Science, Kyoto University, ⁷International Center for Space Weather Science and Education, Japan

Various kinds of atmospheric disturbances and long-term variation as seen in several parameters (temperature, mean wind etc.) in the upper atmosphere (mesosphere, thermosphere and ionosphere) is caused by energy input from solar radiation, momenta and energies from the lower atmosphere (stratosphere and troposphere) via atmospheric waves, and chemical reaction. Such atmospheric phenomena observed by ground-based and satellite instruments are the result of such complicated processes. In order to investigate the mechanisms of the atmospheric disturbances and long-term variations in the upper atmosphere, which may be affected by solar activities and global warming, researchers need to conduct comprehensive analyses with various kinds of long-term observation data that have been continued by means of a global network of MST (Mesosphere-Stratosphere-Troposphere) radars, optical sensors, radiosondes, etc. The IUGONET (Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETWORK) project initiated in 2009 aims at the establishment of a cross-reference system for various kinds of ground-based observation data. The IUGONET participants consist of five universities/institutes: the National Institute of Polar Research (NIPR), Tohoku University, Nagoya University, Kyoto University, and Kyushu University. We have developed a metadata database (MDB) of ground-based observations and IUGONET data analysis software (UDAS) in order to provide researchers in a wide range of disciplines with a seamless data environment to link databases spread across the IUGONET institutions. In particular, the MDB and UDAS will be of great help in data acquisition and integrated analyses to understand the dynamics on the mesosphere-lower thermosphere (MLT) throughout the Sun-Earth system. Therefore, the IUGONET MDB and UDAS will greatly contribute to upper atmospheric researches on the basis of integrated analysis of various kinds of long-term observation data covering a wide region from both the poles to the equator. In this talk, we introduce a brief overview of the IUGONET project and an application of the IUGONET products for upper atmospheric researches.

キーワード: 超高層大気, 地上観測データ, ユーゴネット, メタデータ検索システム, 統合解析ツール

Keywords: Upper atmosphere, Ground-based observation data, IUGONET, metadata search system, IUGONET data analysis tool

Vertical and lateral wave coupling observed with network of MLT/MST Radars over Indian region

Vertical and lateral wave coupling observed with network of MLT/MST Radars over Indian region

M Venkat Ratnam^{1*}; S. Eswariah²; N. Venkateswara rao¹; S. Vijayabhaskar rao²; K. Kishore kumar³; S. Sathish kumar⁴; S. Gurubaran⁴

M, Venkat ratnam^{1*}; S., Eswariah²; N., Venkateswara rao¹; S., Vijayabhaskar rao²; K., Kishore kumar³; S., Sathish kumar⁴; S., Gurubaran⁴

¹National Atmospheric Research Laboratory, ²Sri Venkateswara University, ³Space Physical Laboratory, ⁴Indian Institute of Geomagnetism

¹National Atmospheric Research Laboratory, ²Sri Venkateswara University, ³Space Physical Laboratory, ⁴Indian Institute of Geomagnetism

It is well known that gravity waves and tides play an important role in delineating the middle atmospheric structure and dynamics. There have been several studies in recent years, using different measurement techniques, to understand significant roles played by gravity waves and tides in the lower, middle and upper atmospheres. However, only a few studies addressed this problem with simultaneous observations of all the three regions. Moreover, no efforts have been made so far to understand the lateral forcing of these waves and tides since such a study needs a network of radars located nearby which was missing. With the establishment of an advanced meteor radar at Sri Venkateswara University, Tirupati (13.63oN, 79.4oE), India, and up gradation of MF radar at Kolhapur (16.8oN, 74.2oE) together with MST radar at Gadanki (13.5oN, 79.2oE), Meteor radar at Thumba (8.5oN, 77oE) and MF radar at Tirunalveli (8.7oN, 77.8oE) forms a unique network of radars in the tropical region. Importantly, all these radars are located within 1000 km distance. Accordingly, this network is suitable to study the lower atmospheric forcing and its impacts on middle and upper atmospheric structure and dynamics. For the present study, all these radars were simultaneously operated for a few days in September 2013. These observations show the presence of short period gravity waves and tides (diurnal, semi-diurnal and ter-diurnal) at all locations. Large day-to-day variability in gravity waves and tides is observed within a station and among different stations providing insight on lateral coupling. Phase propagations of the three tidal components at different stations is used to further understand the lateral coupling. Using simultaneous MST radar, Rayleigh lidar and SVU meteor radar (which are nearly co-located), lower atmospheric forcing and its impacts on the mesosphere and lower thermosphere are investigated. This study showed need for long-term measurements, with simultaneous operation of all the above mentioned network of radars, to effectively address the problem of vertical and latitudinal wave forcing.

キーワード: Coupling, Meteor/MF radars, Tropical MLT region

Keywords: Coupling, Meteor/MF radars, Tropical MLT region

Diurnal tide and QTD wave in the tropical stratosphere and MLT region: Long-term trends and solar cycle influence
Diurnal tide and QTD wave in the tropical stratosphere and MLT region: Long-term trends and solar cycle influence

Narukull Venkateswara Rao^{1*}; M. Venkat ratnam¹; C. Vedavathi²; S. Gurubaran³; B.V. Krishna murthy⁴; S. Vijaya bhaskara rao²

NARUKULL, Venkateswara rao^{1*}; M., Venkat ratnam¹; C., Vedavathi²; S., Gurubaran³; B.V., Krishna murthy⁴; S., Vijaya bhaskara rao²

¹National Atmospheric Research Laboratory, ²Sri Venkateswara University, ³Indian Institute of Geomagnetism, ⁴B1, CEEBROS, 47/20, IIIrd Main Road, Chennai

¹National Atmospheric Research Laboratory, ²Sri Venkateswara University, ³Indian Institute of Geomagnetism, ⁴B1, CEEBROS, 47/20, IIIrd Main Road, Chennai

In the present study, long-term trends and solar cycle influence on the diurnal tide (DT) and quasi two day wave (QTDW) in the stratosphere, mesosphere and lower thermosphere (MLT) region over a tropical station Tirununveli (8.7oN, 77.7oE) are investigated using ERA-Interim datasets and MF radar observations available since 1993. As no ground truth is available over Tirununveli, suitability of the ERA-Interim data for the present study is ascertained using simultaneous radiosonde and MST radar observations over Gadanki (13.5oN, 79.2oE) and good consistency is found between the two. Amplitudes of the DT and QTDW over Tirununveli show a long-term linear increasing trend, which becomes prominent in the MLT region. Role of solar cycle on the DT and the QTDW is investigated by separating them with respect to the solar activity (minimum and maximum of solar cycles). Both the DT and QTDW show higher amplitudes during solar minimum and vice versa. Significant higher amplitudes in the recent extended solar minimum are noticed in the MLT region. However, no consistent relation is found between solar activity and DT in the stratosphere although increasing trend is clearly observed. Though increasing trend in the tropical convection is noticed at nearby locations, similar to the DT, it varies from location to location which may be due to large scale circulation effects. This demands data from network of radars located across the globe to see the combined effects of lower atmospheric forcing, circulation and their effects on MLT region.

キーワード: Diurnal Tide, Quasi-two day wave, Long-term trends, Solar cycle, Extended minimum

Keywords: Diurnal Tide, Quasi-two day wave, Long-term trends, Solar cycle, Extended minimum

中間圏および下部熱圏における準二年周期振動と半年周期振動の振幅変調について MQBE and Amplitude Modulation of SAO in the MLT

松本 直樹^{1*}; 新堀 淳樹²; 津田 敏隆²
MATSUMOTO, Naoki^{1*}; SHINBORI, Atsuki²; TSUDA, Toshitaka²

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 京都大学生存圏研究所大気圏精測診断分野

¹Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, ²Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University

赤道域において、1ヶ月平均した東西風に現れる特徴的な振動現象としては、成層圏では準二年周期振動(QBO)、中間圏および下部熱圏(MTL)では半年周期振動(SAO)が有名である。加えてMLTでは、二年または三年に一度春に西向き風が強まるという現象が出現することが分かっている。([Rao et al.,2012])この現象を、以下ではMQBE(Mesosphere Quasi-Biennial Enhancement)と呼称する。近年においてRao et al.(2012)は、1993年、1995年、1997年、2000年、そして2002年の春にMQBEが出現したことを示し、一方で2002年以降ではこれらの現象が出現しなくなったということを報告した。しかし、赤道直下におけるレーダー観測の時間分解能が全く十分でないことや、また上空50kmから80kmにかけての風速を十分な空間精度で観測する方法が存在しないことなどから、MQBEの出現特性やその発生メカニズムはいまだに解明されていない。

そこで我々は、MQBEの出現特性を明らかにし、発生メカニズムを解明するため、カウアイ島・インド南部のツルネリベリ・クリスマス島・スマトラ島コトタバンなどのアジア・オセアニア域に展開する流星レーダーおよびMFレーダーから得られた、1990年以降の長期にわたる風速データの解析を行った。さらに、NASAが提供するMERRAの全球再解析データを用いて、MLTと成層圏における1ヶ月平均した東西風の関係を調べた。解析の際、大学間連携プロジェクト”IUGONET”(Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETWORK)の提供する観測データおよび解析ツール”UDAS”を用いた。また、時系列データに対して周波数の変化と振幅変調を分離するStockwell変換を用いたスペクトル解析を行った。

東西風について解析した結果、MLT領域の高度80-100kmにおいて西向き平均風速32m/sを超えるMQBEは、これまで報告されている年に加えて、2005年、2008年、2011年においても出現することが分かった。また、Stockwell変換を用いたスペクトル解析の結果、MQBEが出現するときに合わせてMLT領域のSAOの振幅が増大しているということも分かった。さらに、MERRAの再解析データから得られた成層圏と下部熱圏の東西平均風から6ヶ月周期成分を抽出して比較した結果、下部熱圏(90km付近)と成層圏界面付近(1hPa付近)の間には負の良い相関関係(相関係数は-0.6程度でラグは2ヶ月以内)、および下部熱圏と成層圏下層(70hPa付近)における1ヶ月平均した東西風とも良い相関関係(相関係数は0.6程度でラグは2ヶ月以内)がみられることも判明した。前者の結果は、成層圏におけるSAOと中間圏におけるSAOの位相が逆転することと整合的である。

これらのことから、2002年以降は出現していないと報告されていたMQBEが、実際には2005年以降も出現しているということが分かった。また、MQBEの出現特性についてはよくわかっていなかったが、出現時期とSAOの振幅変調との対応が明らかになった。加えて、MLTと成層圏との対応関係からは、成層圏界面もしくは成層圏下層においてMQBEを駆動する現象が起きているのではないかという推測をすることができる。以上のことを総合すると、成層圏QBOと同様に大気下層において生成される重力波がMQBEの駆動源として浮かび上がる。

今後の課題としては、MQBEを駆動するメカニズムの解明のため、赤道上空における重力波の解析を進めることが挙げられる。

キーワード: 流星レーダー, MFレーダー, 成層圏, 半年周期振動, 準二年周期振動
Keywords: meteor radar, MF radar, stratosphere, SAO, MQBE

Meteor Wind Radar Application for the study the dynamics of the neutral winds above at Kototabang and Biak station

Meteor Wind Radar Application for the study the dynamics of the neutral winds above at Kototabang and Biak station

Achmad Effendy¹; 津田 敏隆²; 新堀 淳樹^{2*}
ACHMAD, Effendy¹; TSUDA, Toshitaka²; SHINBORI, Atsuki^{2*}

¹ インドネシア国立航空宇宙研究所, ² 京都大学生存圏研究所

¹National Institute of Aeronautics and Space Indonesia (LAPAN), ²Research Institute for Sustainable Humanosphere

Currently for meteor observations is not only done with the naked eye and optical equipment such as a telescope, the latest development to detect natural phenomena meteor shower rained almost every day the Earth can be detected using radar technology. Meteor Wind Radar (MWR) is a radar system used to detect, analyse and display meteor entrance events to the Earth's atmosphere. By using of radar meteors (SKiYMET Meteor Radar) was used to observe the meteor trail (ionized air columns) that moves with the wind neutral layer of mesosphere. When a meteor enters the atmosphere it rapidly vaporises leaving behind a trail of ionised gas along its path of travel, this trail can form a target for a radar transmission. Generally the frequencies used for the detection of radar, located on the VHF band wave spectrum. The results of the analysis of radar data output consists of 7th meteor parameter can be used to study the behavior of neutral winds in the Mesosphere. In this paper the utilization of SKiYMet shown to detect Wind speed Meridional and Zonal Wind speed, Temperature in the Mesosphere and the number and received Flux meteor in the Earth, as a sources of data to better understand the dynamics of the neutral winds at an altitude of 70-110 km region of observation locations. Simultaneously measurement data will be shown at Kototabang observations that have been operating since year 2006 and in Biak Station since year 2011. All of the radar installation is a collaboration between LAPAN and RISH - Kyoto, NICT Japan.

キーワード: 流星レーダー, インドネシア, 赤道域, コトタバング, ビアク
Keywords: Meteor radar, Indonesia, Equatorial regiona, Koto Tabang, Biak

ISS-IMAP/VISIで観測された酸素分子大気光の同心円構造 Concentric structures in molecular oxygen emission observed by ISS-IMAP/VISI

秋谷 祐亮^{1*}; 齊藤 昭則¹; 坂野井 健²; 穂積 裕太¹; 山崎 敦³; 大塚 雄一⁴; 西岡 未知⁵; 津川 卓也⁵
AKIYA, Yusuke^{1*}; SAITO, Akinori¹; SAKANOI, Takeshi²; HOZUMI, Yuta¹; YAMAZAKI, Atsushi³; OTSUKA, Yuichi⁴; NISHIOKA, Michi⁵; TSUGAWA, Takuya⁵

¹ 京都大・理・地球惑星, ² 東北大・PPARC, ³ 宇宙科学研究所, ⁴ 名古屋大・STE研, ⁵ 情報通信研究機構

¹Department of Geophys., Kyoto Univ., ²PPARC, Tohoku University, ³ISAS/JAXA, ⁴STE Lab., Nagoya Univ., ⁵NICT

Concentric structures in airglow emissions were often observed from ground based imagers. Some of them were thought to be caused by the active clouds in the troposphere. It was not able to observe the overall structures from the imagers on the ground under the cloudy condition. Field of views of the imagers were not enough to observe whole structure. Space borne imagers are able to observe the structures caused by the disturbances in the lower atmosphere with wider field of view. Concentric structures of the O₂ airglow emission in 762-nm wavelength were found by the Visible and near-infrared imager on the International Space Station on June 1, 2013 over the U. S. This is the first case which took the image from edge to the center of the concentric structure. Spatial scale of this concentric structures were estimated to be 1,200 km. Fine structures with 80 km wavelength and no dumping in the intensity were observed in this VISI observation. Amplitude in these fine structures were about 10 % to the background intensity. Circular structures were also observed in the GPS-TEC observations before the VISI observation. These concentric structures were estimated to be caused from the active clouds after tornado and atmospheric gravity waves had propagated in horizontal direction in the emission layer.

Keywords: Near infrared, Airglow, Concentric structure, the Mesosphere, Atmospheric gravity waves

Lamb波と熱圏にトラップされた重力波のカップリング Background Lamb waves coupled with thermospheric gravity waves

西田 究^{1*}; 小林 直樹³; 深尾 良夫²
NISHIDA, Kiwamu^{1*}; KOBAYASHI, Naoki³; FUKAO, Yoshio²

¹ 東大地震研, ²IFREE, Jamstec, ³ISAS, JAXA
¹ERI, Univ. of Tokyo, ²IFREE, Jamstec, ³ISAS, JAXA

Lamb waves of the Earth's atmosphere in the millihertz band have been considered as transient phenomena excited only by large events. Nishida et al. (2014) showed the first evidence of background Lamb waves in the Earth's atmosphere from 0.2 to 10 mHz, based on the array analysis of microbarometer data from the USArray in 2012. The observations suggest that the probable excitation source is atmospheric turbulence in the troposphere. Theoretically, their energy in the troposphere tunnels into the thermosphere at a resonant frequency via thermospheric gravity wave because the Lamb-wave branch intersects that of thermospheric gravity waves at 3.5 mHz and that of acoustic waves trapped near the mesopause at 6.5 mHz [Garrett 1969]. The observed FK spectrum shows a local minimum of Lamb-wave amplitudes at around 3.5 mHz, where the Lamb-wave branch is crossed by the thermospheric gravity-wave branch. Coupled Lamb waves leak a certain amount of energy from the troposphere to the thermosphere, reducing the Lamb-wave amplitudes at the crossover frequency relative to those at neighboring frequencies, when their excitation sources exist in the troposphere. The energy tunnels from the troposphere to the thermosphere at the resonant frequency, although Lamb waves themselves cannot induce an upward flux [Lindzen 1972]. The RMS amplitudes of the coupled modes are estimated to be 0.3 m/s at 150 km and 0.1 m/s at 120 km, respectively. These modes might contribute to the thermosphere energy balance by heating via viscous dissipation [Hickey et al. 2001]. The amplitude suggests that the Lamb waves partly contribute to the excitation of thermospheric wave activity associated with severe convection activity [Hunsucker 1982].

Keywords: Atmospheric Lamb wave, Thermospheric gravity wave

MLT 領域モニターのためのアルカリ金属蒸気レーザーを用いた簡易な共鳴散乱ライダーの提案 A proposal of simple resonance scattering lidar using an alkali metal vapor laser for monitoring the MLT region

阿保 真^{1*}; 三浦 夏美¹; 長澤 親生¹; 柴田 泰邦¹
ABO, Makoto^{1*}; MIURA, Natsumi¹; NAGASAWA, Chikao¹; SHIBATA, Yasukuni¹

¹ 首都大学東京

¹Tokyo Metropolitan University

Many observations of metal atomic layers such as Na, Fe, K, Ca and Ca ion in the mesopause region have been conducted in many parts of the world. We have observed several mesospheric metallic layers at Tokyo and Indonesia using resonance scattering lidars consisting of a dye laser and a Ti:Sapphire laser [1]. Especially, in order to solve the formation mechanism of metallic sporadic layers occurred in the mesopause region, the simultaneous observation of Ca ion and the neutral metal atom is necessary. However since the output power of the Ti:Sapphire laser has a low damage threshold of a crystal, it is difficult to improve the output average power. We propose the resonance scattering lidar consisting of the alkali vapor laser for monitoring the MLT region. Optically pumped alkali vapor lasers have attracted increasing attention because of their potential of achieve high power in a high quality beam. The alkali vapor laser can easily realize narrow-linewidth and precise tuning.

Metal atomic layers in the mesosphere are an excellent tracer of the atmospheric wave motion in the region between 80 and 100km. sudden formation of thin metallic layers, superposed in the background mesospheric metallic layers was discovered and these enhanced layers are called the sporadic metallic layers. We have observed frequently the sporadic sodium layers (Nas) at Hachioji, Japan (35.6N, 139.4E) and the sporadic sodium and iron layers (Fes) at Kototabang, Indonesia (0.2S, 100.3E). The ion recombination mechanism invoking wind shear and sporadic E layers appears to be consistent with many observed characteristics, but their cause is still an open question.

Zhdanov et al. presented optically pumped continuous wave potassium vapor laser operating in a single longitudinal and a single transverse mode at 770 nm [2]. Zweiback et al. demonstrated a high efficiency potassium vapor laser using a 0.15nm bandwidth alexandrite laser as the pump source [3]. The alkali vapor laser operates in a three level scheme. The optical pump source excites the D2 line of alkali atom and lasing occurs on the D1 line. To provide a population inversion, fast quenching must be provided by using a buffer gas. We are developing a high peak power pulsed potassium vapor laser using alexandrite laser as the optical pump source. Sealed potassium vapor cell had AR coated windows, and filled with metallic potassium and helium. The cell was assembled inside an oven which had temperature controlled heaters. A pump beam polarized in the horizontal plane was focused through the polarizing beam splitting cube into the potassium vapor cell with a lens. A laser cavity was created for the vertical polarization by two mirrors and the beam splitting cube.

The development of these kinds of lasers is identified as one of the key topics for advancing the application of resonance scattering lidar systems.

References

- [1] Y. Shibata et al., J. Meteor. Soc. Jap., 84A, 317-325, 2006.
- [2] B. Zhdanov et al., Opt. Commun., 270, 353-355, 2007.
- [3] J. Zweiback et al., Opt. Commun., 282, 1871-1873, 2009.

キーワード: 中間圏界面, 金属原子層, 共鳴散乱ライダー, 金属蒸気レーザー

Keywords: mesopause, metal atomic layer, resonance scattering lidar, metal vapor laser

太陽地球系結合過程の研究基盤形成 Study of Coupling Processes in the Solar-Terrestrial System: Project Overview

津田 敏隆^{1*}
TSUDA, Toshitaka^{1*}

¹ 京都大学生存圏研究所

¹ Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University

We promote a project named "Coupling Process in the Solar-Terrestrial System" under close collaboration among universities and research institutes. We aim to study the solar energy inputs to the Earth, and responses of the Geospace (magnetosphere, ionosphere and atmosphere) to them. The solar energy can mainly be divided into two parts; the solar radiation, involving infra-red, visible, ultra-violet and X-ray, and the solar wind, which is a high-speed flow of plasma particles.

The solar radiation becomes the maximum on the equator, then, atmospheric disturbances are actively generated near the Earth's surface. They further excite various atmospheric waves, which propagate upward carrying energy and momentum. On the other hand, electro-magnetic energy associated with the solar wind converges into the polar regions. Disturbances are also generated there, and a part of the energy is transported toward lower latitudes and lower atmospheric regions. We propose to establish large atmospheric radars with active phased array antenna on the equator and the Arctic region. Among the equatorial regions, we focus on Indonesia where the atmospheric disturbances are most intense in the world, and we will establish a comprehensive observatory in Indonesia with the Equatorial MU radar as its main facility. While, we will also construct the state-of-the-art radar, called EISCAT-3D, in Scandinavia under international collaboration. An observation network of portable equipment will be expanded in Asia and Africa to clarify the global flow of energy and materials.

キーワード: 赤道フォウンテン, 赤道 MU レーダー, EISCAT_3D, グローバル観測ネットワーク
Keywords: Equatorial fountain, Equatorial MU Radar, EISCAT_3D, Global observation network

赤道大気レーダーによる下層大気観測のレビュー A Review on Equatorial Atmosphere Radar (EAR) Observations of Lower Atmosphere

橋口 浩之^{1*}; 津田 敏隆¹; 山本 衛¹; 山本 真之¹; 柴垣 佳明²; 下舞 豊志³; Eddy Hermawan⁴
HASHIGUCHI, Hiroyuki^{1*}; TSUDA, Toshitaka¹; YAMAMOTO, Mamoru¹; YAMAMOTO, Masayuki¹; SHIBAGAKI,
Yoshiaki²; SHIMOMAI, Toyoshi³; EDDY, Hermawan⁴

¹ 京都大学生存圏研究所, ² 大阪電気通信大学, ³ 島根大学, ⁴ インドネシア航空宇宙庁

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, ²Osaka Electro-Communication University, ³Shimane University, ⁴National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN), Indonesia

The Equatorial Atmosphere Radar (EAR) is an atmospheric radar located in Kototabang, West Sumatra in Indonesia (0.20S, 100.32E). The EAR has a circular antenna array of approximately 110 m in diameter, consisting of 560 three-element Yagis. It is an active phased array system with each Yagi driven by a solid-state transceiver module. It is operated by collaboration between the Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University and National Institute of Aeronautics and Space of Indonesia (LAPAN), Indonesia since 2001. RISH has conducted a collaborative research program (EAR collaboration) by using the EAR and its related facilities since 2005. The EAR can observe winds and turbulence in the lower atmosphere and echoes from ionospheric irregularities. In the presentation, observation results of the lower atmosphere with the EAR are reviewed.

キーワード: 赤道大気レーダー, 赤道 MU レーダー, 赤道大気

Keywords: Equatorial Atmosphere Radar, Equatorial MU Radar, Equatorial Atmosphere

SEALION と赤道大気レーダーによる電離圏観測 Ionospheric observations by SEALION and the Equatorial Atmosphere Radar

横山 竜宏^{1*}; 津川 卓也¹; 石井 守¹
YOKOYAMA, Tatsuhiro^{1*}; TSUGAWA, Takuya¹; ISHII, Mamoru¹

¹ 情報通信研究機構

¹National Institute of Information and Communications Technology

Equatorial spread F (ESF) is a well-known phenomenon in the equatorial ionospheric F region. As it causes severe scintillation in the amplitude and phase of radio signals, it is important to understand and forecast the occurrence of ESF from a space weather point of view. Ionospheric observation with the 47-MHz Equatorial Atmosphere Radar (EAR) in West Sumatra, Indonesia (0.20S, 100.32E, 10.36S dip latitude) has been conducted since 2001, and its unique observational data has been obtained for more than one solar cycle. The EAR is sensitive to 3-m scale ionospheric irregularities, which can be regarded as a tracer of ESF. Along with the EAR observations, Southeast Asia Low-latitude Ionospheric Network (SEALION) project by NICT started in 2003 for the purpose of monitoring and forecasting ESF. The SEALION consists of multiple ionosondes, GPS receivers and several other instruments in the Southeast Asian region. Since the developed ESF usually drifts eastward, monitoring ESF in this region can provide important space weather information for the Japanese longitude sector. We will summarize observational results with the SEALION and EAR, and discuss future potential of the ionospheric observation in the Southeast Asian region.

キーワード: SEALION, 赤道大気レーダー, 赤道スプレッド F, 赤道電離圏
Keywords: SEALION, EAR, equatorial spread F, equatorial ionosphere

コトタバンにおける赤道大気レーダー観測等に基づくモンスーンインデックスの開発
Development of Indonesian Monsoon Index (IMI) Based on EAR and other Facilities at Kototabang

Eddy Hermawan¹; 橋口 浩之^{2*}
EDDY, Hermawan¹; HASHIGUCHI, Hiroyuki^{2*}

¹ インドネシア航空宇宙庁, ² 京都大学生存圏研究所

¹National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN), Indonesia, ²Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University

This study is mainly concerned on developing of the Indonesian Monsoon Index (IMI) based on the Equatorial Atmosphere Radar (EAR) at Kototabang, West Sumatera (0.2S; 100.32E, 865 m from MSL). We have analyzed the zonal and meridional wind data of EAR for period of July 2001 to July 2008. By applying the bandpass filtering method that we call as the Fast Fourier Transform (FFT) and Wavelet (WL) technique, we have identified the characteristics of meridional wind velocity in frequency domain. The predominant peak oscillation that appear is Annual Oscillation (AO) for the meridional wind velocity between 8 to 18 km above mean sea level (MSL). While, the strongest is located around 14.1 km from MSL (It's equal to 200 hPa). At the same time period observation of EAR, we analyzed also the Global Monsoon Index as represented by the Indian Summer Monsoon Index (ISMI), Western North Pacific Monsoon Index (WNPMI), and Australian Monsoon Index (AUSMI), respectively. We found a 12 months oscillation for Global Monsoon Index that we call as the AO. By comparing them with meridional wind velocity of EAR, we found a good agreement between AUSMI and the meridional wind velocity of EAR, especially. By this preliminary result, we suspect that we can use the AUSMI parameter to detect the Monsoon Signal over Indonesia, especially for the Western part of Indonesia region, especially at about the 200 hPa. We wish to develop these results by investigating the Monsoonal Onset, especially, including their anomalies, since we know that Monsoon is still a pre dominant peak oscillation at the Indonesian Maritime Continent (IMC) which have big effect to control the complexity of atmospheric dynamic over Indonesia. If it looks possible, we wish also to develop the IMI model that suitable for Indonesia region. Detailed information due to that preliminary results including the basic idea of this proposal research will be discussed at our presentation.

キーワード: IMI, 赤道大気レーダー, AUSMI, モデル

Keywords: IMI, EAR, AUSMI, Model

Vertical and horizontal coupling processes in the equatorial atmosphere Vertical and horizontal coupling processes in the equatorial atmosphere

YAMANAKA, Manabu D.^{1*}
YAMANAKA, Manabu D.^{1*}

¹JAMSTEC/Kobe U
¹JAMSTEC/Kobe U

Future targets of the equatorial atmosphere dynamics are discussed from viewpoints of recent progress of the lower-atmospheric parts including increase of climatological interests and rapid developments of tropical countries. From recognition of the importance of land-sea heat contrast on Earth we must consider again two types of diurnal cycles: sea-land breeze circulations and atmospheric tides, which have local and global phase structures, respectively. We must consider also two types of Earth rotation effects: solar radiation heating and Coriolis force, which are stronger and weaker, respectively, in the equatorial region. Furthermore, in the lower atmosphere, clouds govern winds in the equatorial region, in contrast to opposite relationship in middle and high latitudes. Because the equatorial convective clouds are dependent not only on dynamical and thermal instabilities but also by water and electrical budgets, we need to study again dynamical-chemical and atmosphere-ionosphere couplings.

キーワード: atmosphere vertical coupling, atmosphere observation network
Keywords: atmosphere vertical coupling, atmosphere observation network

赤道大気レーダーによる熱帯対流圏の鉛直流観測 —これまでの観測成果—
Vertical wind measurement in the equatorial troposphere by the Equatorial Atmosphere
Radar: A review

山本 真之^{1*}; 橋口 浩之¹; 山本 衛¹
YAMAMOTO, Masayuki^{1*}; HASHIGUCHI, Hiroyuki¹; YAMAMOTO, Mamoru¹

¹ 京都大学生存圏研究所

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

大気鉛直運動（鉛直流）は、大気中の運動量・エネルギー輸送や雲・降水の力学過程を決定付ける物理量である。50MHz帯大気レーダーである赤道大気レーダー（EAR）は、電波屈折率擾乱に起因するブラッグ散乱を利用して風速を計測する。そのため、晴天域・雨域を問わず鉛直流を計測できる優れた特長を備える。さらに、多周波切替え送信と適応信号処理を組み合わせることで鉛直分解能を向上させるレンジイメージング機能を備える。講演では、これまでに得られたEARの鉛直流観測成果とともに、赤道MUレーダーを活用した鉛直流計測の展望を述べる。

キーワード: 赤道大気レーダー, 赤道MUレーダー, 熱帯大気, 鉛直流観測

Keywords: Equatorial Atmosphere Radar, Equatorial MU Radar, equatorial atmosphere, vertical wind measurement

Science and design overview of the EISCAT_3D radar Science and design overview of the EISCAT_3D radar

MCCREA, Ian^{1*}

MCCREA, Ian^{1*}

¹STFC Rutherford Appleton Laboratory

¹STFC Rutherford Appleton Laboratory

For thirty years, the EISCAT Scientific Association (www.eiscat.se) has operated a network of leading facilities for ground-based research in solar-terrestrial physics. The UHF and VHF radars at Tromsø in northern Norway, together with the receiver sites at Kiruna, Sweden and Sodankylä, Finland and the EISCAT Svalbard Radar near Longyearbyen, represent a uniquely capable group of instruments serving a worldwide user community. The EISCAT mainland radars in particular, however, are based on ageing transmitters and antennas which are slow-moving and increasingly hard to maintain. For several years now, EISCAT (with support from international partners including the European Union) has been planning to replace the current set of mainland radars with a new state-of-the-art radar system, better suited to the current needs of the research community. EISCAT_3D (www.eiscat3d.se) will be the next-generation radar for the high-latitude atmosphere and geospace, with capabilities going beyond anything currently available. The facility will consist of large phased arrays in three countries. EISCAT_3D will comprise tens of thousands, up to more than 100 000, antenna elements. The new facility combines volumetric imaging and tracking, aperture synthesis imaging, multistatic configuration, improved sensitivity and transmitter flexibility. EISCAT_3D will be the first multistatic phased array ISR. A network of five sites is planned, with receivers located around 120 km and 250 km from the active site, providing optimal geometries for vectors in the middle and upper atmosphere. At the passive sites, the design allows the transmitted beam to be imaged using multi-beam techniques. EISCAT_3D will be a modular system, allowing an array to be split into sections for imaging. The result will be a new data product, range-dependent images of small structures, with sizes down to a few tens of metres. The antenna gain and array size will deliver large increases in the figure-of-merit relative to the existing EISCAT radars. An active site comprising 16,000 elements will exceed the sensitivity of the present VHF radar by an order of magnitude. In this talk the technical specifications and science case for EISCAT_3D will be discussed and the current progress reviewed. Studies of the atmospheric energy budget, exploration of small-scale and large-scale processes, as well as geospace environment monitoring and potential space weather service applications will be presented.

キーワード: EISCAT, Incoherent Scatter, Radar, Ionosphere, Solar-Terrestrial Physics, Space Weather
Keywords: EISCAT, Incoherent Scatter, Radar, Ionosphere, Solar-Terrestrial Physics, Space Weather

The EISCAT_3D System and Status The EISCAT_3D System and Status

HEINSELMAN, Craig^{1*}
HEINSELMAN, Craig^{1*}

¹EISCAT Scientific Association
¹EISCAT Scientific Association

The EISCAT Scientific Association has been operating incoherent scatter radars in the arctic since the early 1980s. Those systems have been extremely productive over the decades, supporting a wide range of scientific topics within geospace research and resulting in more than 2000 publications in peer-reviewed journals. For the past several years the EISCAT community, with significant support from the European Commission, has been working toward a new set of radar systems to replace the now aging infrastructure. This distributed radar, called EISCAT_3D, will provide the scientific community with new measurement capabilities that far exceed, both quantitatively and qualitatively, those presently available.

EISCAT_3D, when it is fully implemented, will consist of five phased array antennas strategically positioned in northern Norway, Sweden, and Finland. One of the antennas will include a distributed 10 MW peak power transmitter with full polarization capabilities, rapid steering, and antenna aperture coding options. The receive antenna arrays will be capable of instantaneously covering the entire transmit beam, thus providing a large number of intersecting volumes for vector drift measurements. The overall system will, furthermore, have sufficient sensitivity to provide order of magnitude improvements in both spatial and temporal resolution over the present radars.

We will present an overview of the system in this talk along with an update on the present status of the overall project.

キーワード: Incoherent Scatter Radar, ionosphere
Keywords: Incoherent Scatter Radar, ionosphere

Thermospheric neutral density observations using the EISCAT incoherent scatter radars Thermospheric neutral density observations using the EISCAT incoherent scatter radars

KOSCH, Michael^{1*} ; VICKERS, Hannah² ; OGAWA, Yasunobu³
KOSCH, Michael^{1*} ; VICKERS, Hannah² ; OGAWA, Yasunobu³

¹Physics Dept., Lancaster University, Lancaster, UK, ²Institute for Physics and Technology, University of Tromso, Norway,

³National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan

¹Physics Dept., Lancaster University, Lancaster, UK, ²Institute for Physics and Technology, University of Tromso, Norway,

³National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan

We exploit a recently-developed technique, based on ion-neutral coupling, to estimate the thermospheric neutral density at ~350 km using measurements of ionospheric plasma parameters made by the EISCAT radars. The passive version of the technique is applied to a 13-year long data set from the EISCAT Svalbard Radar (ESR). Here we show that the thermospheric density in the polar cap is decreasing, consistent with satellite drag estimates at lower latitudes. The active version of the technique requires the EISCAT Heater to artificially induce ion up-flow by heating the electrons, with observations from the EISCAT UHF radar. Here we show that ion up-flow is consistent with the plasma pressure gradient, and we extract the thermospheric neutral density. At an altitude of ~500 km, where neutral composition is not always pure atomic oxygen, problems with the technique are discussed.

キーワード: Thermospheric density, Incoherent scatter radar

Keywords: Thermospheric density, Incoherent scatter radar

3D ionospheric electron density determination in Scandinavia with TomoScand and EISCAT 3D

3D ionospheric electron density determination in Scandinavia with TomoScand and EISCAT 3D

AMM, Olaf^{1*} ; NORBERG, Johannes¹ ; VIERINEN, Juha³ ; ROININEN, Lassi⁴ ; LEHTINEN, Markku⁴ ; NAKAMIZO, Aoi¹
AMM, Olaf^{1*} ; NORBERG, Johannes¹ ; VIERINEN, Juha³ ; ROININEN, Lassi⁴ ; LEHTINEN, Markku⁴ ; NAKAMIZO, Aoi¹

¹Finnish Meteorological Institute, Arctic Research Unit, Helsinki, Finland, ²STEL, Nagoya University, Japan, ³Haystack Observatory, Massachusetts Institute of Technology, Westford, Massachusetts, USA, ⁴Sodankyla Geophysical Observatory, University of Oulu, Finland

¹Finnish Meteorological Institute, Arctic Research Unit, Helsinki, Finland, ²STEL, Nagoya University, Japan, ³Haystack Observatory, Massachusetts Institute of Technology, Westford, Massachusetts, USA, ⁴Sodankyla Geophysical Observatory, University of Oulu, Finland

The TomoScand network for ionospheric tomography in Scandinavia consists of a network of newly designed Beacon receivers and an extensive, dense array of GPS receivers. A novel tomographic inversion technique allows for a multi-frequency analysis for reconstruction of ionospheric electron densities, and is also able to include information of a multitude of ground-based measurements into the inversion, such as data from ionosondes, from the EISCAT radar, and from the magnetometers of the MIRACLE network in Scandinavia. We present the current status of the TomoScand network, and show latest inversion results on 2D profiles in meridional direction, together with test results that allow to evaluate the performance of the inversion technique. Further, we discuss the future development into a full 3D inversion scheme, and how the TomoScand network can be used as a "partner instrument" for the upcoming EISCAT 3D radar.

キーワード: ionospheric tomography, ionospheric electron density, ground-based observations, EISCAT 3D
Keywords: ionospheric tomography, ionospheric electron density, ground-based observations, EISCAT 3D

EISCAT_3Dで推進するジオスペースおよび大気科学 Advancement of geospace and atmospheric sciences with EISCAT_3D

宮岡 宏^{1*}; 野澤 悟徳²; 小川 泰信¹; 大山 伸一郎²; 中村 卓司¹; 藤井 良一²; Heinselmann Craig³
MIYAOKA, Hiroshi^{1*}; NOZAWA, Satonori²; OGAWA, Yasunobu¹; OYAMA, Shin-ichiro²; NAKAMURA, Takuji¹; FUJII,
Ryoichi²; HEINSELMAN, Craig³

¹ 国立極地研究所, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ EISCAT 科学協会

¹National Institute of Polar Research, ²STEL, Nagoya University, ³EISCAT Scientific Association

The EISCAT(European Incoherent SCATter) Scientific Association is an international research organization, which operates incoherent scatter radars at 931MHz, 224MHz and 500MHz in northern Scandinavia and Svalbard for studies of physical and environmental processes in the middle/upper atmosphere and near-Earth space. Affiliated in the EISCAT scientific association in 1996, Japanese science community has jointly contributed to achieve further understanding of the magnetosphere-ionosphere-thermosphere coupling processes using the integrated ground-based instruments and rocket/satellite simultaneous observations with EISCAT radars.

EISCAT_3D is the major upgrade of the existing EISCAT radars in the northern Scandinavia. With a multi-static phased array system composed of one central active (transmit-receive) site and several receive-only sites, the EISCAT_3D system is expected to provide us 10 times higher temporal and spatial resolution and capabilities than the present radars.

In this presentation, we will overview our scientific activity and achievements with the EISCAT facility and our strategic plan of national funding for EISCAT_3D as well as the science targets which we expect to be unraveled by EISCAT_3D.

キーワード: 非干渉散乱レーダー, 欧州非干渉散乱レーダー科学協会, 電離圏, 熱圏, 中間圏, 三次元イメージング観測
Keywords: Incoherent scatter radar, EISCAT, Ionosphere, Thermosphere, Mesosphere, 3D imaging observation

EISCAT_3D 及び関連観測に基づくイオン上昇流/イオン流出の研究 Study on ion upflow and outflow based on EISCAT_3D and its related observations

小川 泰信^{1*}
OGAWA, Yasunobu^{1*}

¹ 国立極地研究所
¹National Institute of Polar Research, JAPAN

An important phenomenon of magnetosphere-ionosphere coupling is the formation of upwelling ions in the topside polar ionosphere. These upflows can be a significant loss of atmospheric gasses into interplanetary space and a significant source of magnetospheric plasma, which may also affect the dynamics of the magnetosphere. Key processes for upward ion flows in the topside ionosphere are suggested to be frictional heating, ambipolar diffusion driven by a heated electron gas, and transverse ion acceleration produced by plasma waves. It is critical to determine the relative importance of the different mechanisms in operation and to understand the 3D distribution and composition of the upflowing ions and neutrals. Moreover, there are several transitions of upflowing ions, for examples, from chemical to diffusion dominance at 500-800 km altitude, from subsonic to supersonic flow at 1000-2000 km altitude, and from collisional to collisionless region at 1500-2500 km altitude.

EISCAT_3D is one of the most suitable measurements to investigate such transitions because of its wider height coverage (up to about 2000 km) along the field line. EISCAT_3D will have more transmitter power density and higher sensitivity than those of the current Tromso UHF radar, and will give information of accurate thermal ion velocity, upward flux, and ion composition (O^+ , H^+ , and hopefully NO^+). A combination of the EISCAT_3D, ground-based optical instruments, and in-situ measurements is definitely essential to solve several key questions of ion upflow and outflow study. In this paper, we show potential investigations of ion upflow and outflow using the EISCAT_3D, and also discuss a desirable combination of the EISCAT_3D and its related observations for the ion upflow and outflow study.

キーワード: EISCAT, ionosphere, M-I coupling
Keywords: EISCAT, ionosphere, M-I coupling

大型レーダーによる流星ヘッドエコー観測と流星の精密軌道データベース Meteor head echo observation with a high power large aperture (HPLA) radar and an open database of precise meteor orbit

中村 卓司^{1*}; Kero Johan²

NAKAMURA, Takuji^{1*}; KERO, Johan²

¹ 国立極地研究所, ²Swedish Institute of Space Physics (IRF)

¹National Institute of Polar Research, ²Swedish Institute of Space Physics (IRF)

Mass influx from the space into the terrestrial atmosphere is mainly caused by meteors. Meteors delivers various elements into the atmosphere, but the meteoric dust particles are also of great importance in the terrestrial atmosphere, as they act as nucleus for condensation and clouds and affect the various atmospheric phenomena both in physical and chemical aspects. Thus, to investigate the meteor flux, orbits and their interactions in the upper atmosphere is very important but at the same time the method of investigation is limited, especially for the precise measurements.

A high power large aperture (HPLA) radar technique is one of the recent technique to provide useful information on meteor influx and orbital information, as well as interactions with atmosphere. The recent development of the technique carried out using the middle and upper atmosphere radar (MU radar) of Kyoto University at Shigaraki (34.9N, 136.1S), which is a large atmospheric VHF radar with 46.5 MHz frequency, 1 MW output transmission power and 8330 m² aperture array antenna, has established very precise orbit observations with meteor head echoes. Since 2009, orbital data of about 120,000 meteors have been collected. A database is now being created as an open database for research and education. In this

study, we present the physical quantities and precisions obtained by our radar meteor head echo observations and the detail of the database.

キーワード: 流星, 超高層大気, 大型レーダー

Keywords: meteor, upper atmosphere, high power large aperture radar

Comparison of Cloud Propagation over Sumatera during CPEA-I and II Comparison of Cloud Propagation over Sumatera during CPEA-I and II

MARZUKI, Marzuki^{1*}; RAHAYU, Aulya¹; VONNISA, Mutya¹; HASHIGUCHI, Hiroyuki²; K. YAMAMOTO, Masayuki²; D. YAMANAKA, Manabu³; MORI, Shuichi³; KOZU, Toshiaki⁴; SHIMOMAI, Toyoshi⁴
MARZUKI, Marzuki^{1*}; RAHAYU, Aulya¹; VONNISA, Mutya¹; HASHIGUCHI, Hiroyuki²; K. YAMAMOTO, Masayuki²; D. YAMANAKA, Manabu³; MORI, Shuichi³; KOZU, Toshiaki⁴; SHIMOMAI, Toyoshi⁴

¹Department of Physics, Andalas University, Padang, Indonesia, ²Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH) Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-001, ³Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokosuka, Japan, ⁴Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Japan
¹Department of Physics, Andalas University, Padang, Indonesia, ²Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH) Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-001, ³Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokosuka, Japan, ⁴Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Japan

Maritime Continent of the Indonesian (MCI) archipelago is one of the world's most convectively active areas and thereby affects the global climate system. It consists of thousands of islands with different size. The island coastlines' complex shape and geography, as well as their orientation, contribute to the uniqueness of this region. Not surprisingly, maritime continent receives a large amount of rainfall throughout the year, and the precipitation varies considerably across the region. Global climate models exhibit systematic errors in their mean precipitation over the MCI due to such variability. In this study, the behavior of convective activity over Sumatera during the Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere (CPEA) campaign I and II is examined using 1-hourly satellite infrared data. Sumatra Island is elongated and oriented from northwest to southeast and its elevated orography temporarily blocked the eastward propagation of precipitation system. The dynamics of Sumatra weather systems remains poorly understood and part of the problem lies in the lack of atmospheric data and high-resolution gridded data analyses and realistic model simulations. Therefore, the data of two intensive observation periods as the international observation campaign of the CPEA will also be used. Cloud propagation statistics (speed, span, life time, size, etc.) of the individual cloud episodes and the physical basis behind the results will be discussed.

キーワード: Cloud propagation, Sumatra, CPEA
Keywords: Cloud propagation, Sumatra, CPEA

SuperDARN global observation of energy input and coupling processes and recent technical development

SuperDARN global observation of energy input and coupling processes and recent technical development

行松 彰^{1*}; 西谷 望²; 長妻 努³

YUKIMATU, Akira sessai^{1*}; NISHITANI, Nozomu²; NAGATSUMA, Tsutomu³

¹ 国立極地研究所/総研大, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 情報通信研究機構

¹NIPR/SOKENDAI, ²STEL, Nagoya Univ., ³NICT

SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) [Greenwald, et al., 1995] is an international collaborative HF-radar network [Greenwald, et al., 1985] operated by more than 15 institutions in over 10 countries, and the number of the radars is currently more than 30 and it is still growing and the fields-of-view (FOVs) have been expanding to both higher and mid-latitudes covering considerable portions of global upper atmosphere in both hemispheres.

SuperDARN was originally designed to measure line-of-sight plasma Doppler spectra and ionospheric electric field to obtain global large scale two-dimensional polar ionospheric plasma convection patterns and polar cap potential drop in both hemispheres with a temporal resolution of 1 to 2 minutes in real time since 1995, which have never been possible by any other observational techniques, and this capability provides us very important and essential information on solar energy input to our geospace, magnetosphere and polar ionosphere, which has greatly contributed to basic understanding of coupling processes in Sun-Earth system as well as space weather researches.

SuperDARN is a powerful tool to be applied to many scientific issues [Chisham, et al., 2007 and references therein]. It can be used not only to deduce dynamics of global large-scale convection patterns, but also to study dynamics of transient meso-scale phenomena like FTEs and TCVs, and polar cap boundary or open-closed field line boundary (OCB), to detect reconnection sites and to deduce reconnection rates, to study substorms, storms and phenomena related to subauroral regions like sub-auroral polarisation stream (SAPS), to deduce field aligned currents (FACs), to study MHD waves in a variety of frequency ranges, and also to study ionospheric irregularities in D-, E-, and F-regions. Moreover, it can be utilised not only to ionospheric researches but also to neutral atmospheric studies, e.g., on atmospheric waves like TIDs, tides and gravity waves, neutral winds around mesopause region, and also polar mesospheric summer echoes (PMSEs), etc.

These days, the fields-of-view (FOVs) of SuperDARN have been expanded to higher latitude (PolarDARN) and mid-latitude (StormDARN) which covers considerable portions of mid- and polar latitudes of earth's ionosphere in both hemispheres and enables us to address much wider ranges of scientific questions including inner magnetospheric physics. There are also ongoing discussions to expand the SuperDARN radars field of view to even lower latitudes, up to low latitude and equatorial regions.

SuperDARN has extensively evolved successfully and has been extremely productive by strong cooperation and competitions within the community and also by collaborative studies with other ground-based and satellite/rocket observations and theoretical researches, which has greatly contributed to a variety of studies especially on magnetosphere-ionosphere coupling processes and ionosphere and neutral atmosphere coupling.

As SuperDARN could have provided basic and important physical parameters in global upper atmosphere, collaborative studies with other projects like IS-radars like EISCAT and PANSY providing many detailed physical parameters at fix points as well as satellite missions like THEMIS, VAP, and ERG and rocket campaigns providing in-situ measurements will be particularly important to contribute to our deeper understanding of the Sun-Earth coupling processes.

Also some SuperDARN radars has developed new technical upgrade including imaging radar capabilities providing higher spatial resolution. New science targets with SuperDARN with new capabilities will also be discussed.

キーワード: SuperDARN, HF radar, coupling processes, imaging radar, MI coupling, neutral wind

Keywords: SuperDARN, HF radar, coupling processes, imaging radar, MI coupling, neutral wind

Low Latitude Ionospheric Scintillation Research Using GISTM Network over Indonesia Low Latitude Ionospheric Scintillation Research Using GISTM Network over Indonesia

Husin Asnawi^{1*}; Abadi Prayitno¹; Jiyo Harjoswito¹; 山本 衛²; 大塚 雄一³
HUSIN, Asnawi^{1*}; ABADI, Prayitno¹; JIYO, Harjoswito¹; YAMAMOTO, Mamoru²; OTSUKA, Yuichi³

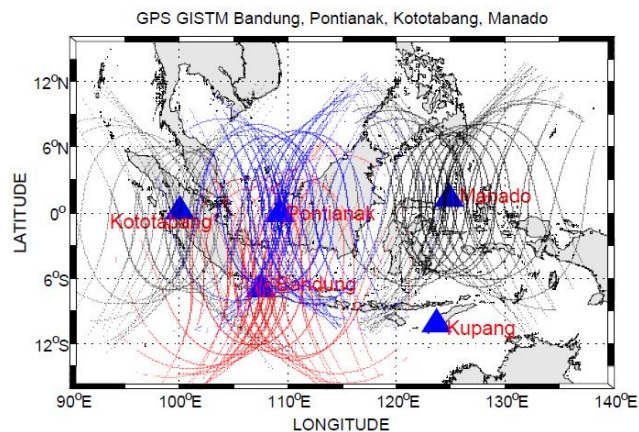
¹ インドネシア航空宇宙庁 (LAPAN) スペースサイエンスセンター, ² 京都大学生存圏研究所, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Space Science Center, LAPAN, ²RISH, Kyoto University, ³STEL, Natoya University

The ionosphere plays an active role in the space weather relationships, so the permanent monitoring of the ionosphere state on global and regional is required. The advancement of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) such as GPS (Global Positioning System) receiver technology provides a low cost solution for monitoring and research the ionosphere on global and regional basis. National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) Indonesia has been installed GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor (GSV4004b) to monitor and study ionospheric irregularities.

This paper reports a statistical study of the occurrences characteristic of GPS ionospheric scintillation and irregularity in low latitude Indonesia sector. These measurements were made by GPS Ionospheric Scintillation and TEC Monitor System (GISTM) at Pontianak (0.03S 109.33E), Bandung (6.93S 107.6E), Manado (1.34N 124.83E), Kupang (10.16S 123.66E), and Kototabang (0.12S 100.12E). For the GPS station at Kototabang, we use ISM (ionospheric scintillation monitor) under collaboration with STELAB Nagoya University. We distinguish scintillation occurrences rate between post sunset and after midnight by using S4 index during maximum solar activity period in 2013. We analyze the occurrence rate using azimuth-elevation coordinate (sky plot). The following figure is to show observation geometry which is used in this study.

Keywords: Ionospheric Scintillation, Indonesia, GPS receiver



電磁気圏・超高層大気の広域多点観測の将来の方向性 Future direction of the ground-based network observations of the magnetosphere and the upper atmosphere

塩川 和夫^{1*}; 大塚 雄一¹

SHIOKAWA, Kazuo^{1*}; OTSUKA, Yuichi¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

Multi-point ground-based instruments are powerful tools to investigate global dynamics of the magnetosphere, ionosphere, and the upper atmosphere. Airglow imagers and multi-point GPS receivers provide two- and three-dimensional view of these regions. The ring-current and radiation-belt particles in the inner magnetosphere round the earth with a time scale from a few tens of minutes to a few hours. Interactions of these particles with Pc5 (times scale of ~minutes), Pc1 (~Hz) and VLF/ELF chorus (~kHz) causes acceleration and loss of these particles. Thus, longitudinal chain of ground-based stations to observe these various waves and auroras is essentially needed to understand the acceleration and loss of the plasma in the inner magnetosphere. The auroral energy input from the solar wind and magnetosphere to the high-latitude ionosphere is a major energy source of the dynamic variation of the upper atmosphere. Intense convective activity in the equatorial troposphere gives another energy source of the dynamic variation of the upper atmosphere. Thus, meridional chain stations are essentially needed to understand these dynamic variations and their global coupling. In this presentation we discuss possible future directions of these ground-based network observations to understand the global dynamics of the magnetosphere, ionosphere, and the upper atmosphere.

キーワード: 広域多点観測, 電離圏, 磁気圏, 超高層大気, 将来計画

Keywords: ground-based network observation, ionosphere, magnetosphere, upper atmosphere, future direction

ICSWSE/ MAGDAS Project: 極域-磁気赤道域電磁結合系の実証的研究 ICSWSE/ MAGDAS Project: Research for global electromagnetic coupling from polar to equatorial ionosphere

吉川 顕正^{1*}; 中溝 葵²; 大谷 晋一³; 田中 良昌⁴; 今城 峻⁵; 松下 拓輝⁵; Cardinal Maria Gracita¹; 阿部 修司¹; 魚住 禎司¹; 湯元 清文¹

YOSHIKAWA, Akimasa^{1*}; NAKAMIZO, Aoi²; OHTANI, Shinichi³; TANAKA, Yoshimasa⁴; IMAJO, Shun⁵; MATSUSHITA, Hiroki⁵; CARDINAL, Maria gracita¹; ABE, Shuji¹; UOZUMI, Teiji¹; YUMOTO, Kiyohumi¹

¹九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター, ²フィンランド気象研究所, ³ジョンズホプキンズ大学応用物理研究所, ⁴国立極地研究所, ⁵九州大学理学府地球惑星科学専攻

¹International Center for Space Science and Education, Kyushu University, ²Finish Meteorological Institute, ³The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, ⁴National Institute of Polar Research, ⁵Earth and Planetary Science, Kyushu University

International Center for Space Weather Science and Education (ICSWSE) has developed a real time magnetic data acquisition system (the MAGDAS project) for space environment monitoring around the world. The number of observational sites is increasing every year with the collaboration of MAGDAS host countries. Now at this time, the MAGDAS Project has installed 73 real time magnetometers so it is the largest magnetometer array in the world.

Applying equivalent current method to this network data, we analyze a global ionospheric current system from polar to equatorial ionosphere. Our results suggest that Dp2 type disturbances excited by solar wind variation, Pi2 type pulsations accompanied by auroral substorm onset process and Pc3 type pulsations accompanied by dayside cavity type oscillation show the same type of global current system, which are produced by primary bipolar electric field accompanied by field-aligned current system and Hall polarization electric field excited at the dawn-dusk conductivity terminator and at the magnetic dip equator. We will discuss how the electromagnetic coupling between polar and equatorial ionosphere is regulated by the formation of global Cowling channel in the ionosphere.

キーワード: 宇宙天気, 磁気圏電離圏結合, 緯度間結合, 全球結合

Keywords: Space Weather, Magnetosphere-Ionosphere-Atmosphere Coupling, Global Coupling

IUGONET データ解析システムの太陽地球結合研究への貢献 Contribution of the IUGONET data analysis system to a study on coupling processes in the solar-terrestrial system

新堀 淳樹^{1*}; 八木 学²; 田中 良昌³; 佐藤 由佳³; 谷田貝 垂紀代⁴; 梅村 宜生⁴; 堀 智昭⁴; 上野 悟⁵; 小山 幸伸⁶; 阿部 修司⁷

SHINBORI, Atsuki^{1*}; YAGI, Manabu²; TANAKA, Yoshimasa³; SATO, Yuka³; YATAGAI, Akiyo⁴; UMEMURA, Norio⁴; HORI, Tomoaki⁴; UENO, Satoru⁵; KOYAMA, Yukinobu⁶; ABE, Shuji⁷

¹ 京都大学生存圏研究所, ² 東北大学理学研究科 惑星プラズマ・大気研究センター, ³ 国立極地研究所, ⁴ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ⁵ 京都大学大学院理学研究科附属天文台, ⁶ 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター, ⁷ 九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, ²Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, ³National Institute of Polar Research, ⁴Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ⁵Kwasan & Hida Observatories, School of Science, Kyoto University, ⁶Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism Graduate School of Science, Kyoto University, ⁷International Center for Space Weather Science and Education, Japan

Various kinds of disturbance phenomenon and long-term variation as seen in several observation parameters (electric and magnetic fields, temperature, mean wind etc.) in a wide area from space surrounding the Earth to the atmospheric layers are caused by energy input from solar radiation, solar wind, momenta and energies from the lower atmosphere via atmospheric waves, and chemical reaction. Such a disturbance phenomenon and long-term variation observed by various kinds of ground-based and satellite instruments are the result of such complicated processes. Then, in order to investigate the mechanisms of these phenomena in this region, researchers need to conduct comprehensive analyses with various kinds of long-term observation data that have been continued by means of a global network of radars, magnetometers, optical sensors, helioscopes, etc. The IUGONET (Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETWORK) project initiated in 2009 aims at the establishment of a cross-reference system for various kinds of ground-based observation data obtained from different techniques. The IUGONET participants consist of five universities/institutes: the National Institute of Polar Research (NIPR), Tohoku University, Nagoya University, Kyoto University, and Kyushu University. We have developed metadata database (MDB) and IUGONET data analysis software (UDAS) of ground-based observation data managed by these IUGONET universities/institutes with an international collaboration in order to promote a study on coupling process in the Sun-Earth system. The MDB provides researchers in a wide range of disciplines with a seamless data environment to link databases spread across the IUGONET universities/institutes. In particular, UDAS will be of great help in conducting integrated analyses and visualization of various kinds of solar-terrestrial observation data to investigate the long-term variation in the upper atmosphere throughout the Sun-Earth system. Then, the IUGONET products will greatly contribute to a study on coupling process in the Sun-Earth system on the basis of integrated analysis of various kinds of long-term observation data covering a wide region from both the pole to the equator. In this talk, we introduce a brief overview of the IUGONET project, and an application of the IUGONET products to typical examples of upper atmospheric researches.

キーワード: 超高層大気, 長期変動, 太陽活動, メタデータ検索システム, データ解析ツール, 太陽地球系結合

Keywords: Upper atmosphere, Long-term variation, Solar activity, Metadata search system, Data analysis tool, Coupling process in the Sun-Earth system

Statistical characteristics of nighttime MSTIDs observed by an airglow imager over subtropical site Yonaguni (19.3N dip)
Statistical characteristics of nighttime MSTIDs observed by an airglow imager over subtropical site Yonaguni (19.3N dip)

VISWANATHAN, Lakshmi narayanan^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; OTSUKA, Yuichi¹; SAITO, Susumu²
VISWANATHAN, Lakshmi narayanan^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; OTSUKA, Yuichi¹; SAITO, Susumu²

¹Solar Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, Japan, ²Electronic Navigation Research Institute, Tokyo, Japan

¹Solar Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, Japan, ²Electronic Navigation Research Institute, Tokyo, Japan

The nighttime medium-scale travelling ionospheric disturbances (MSTIDs) are frequently observed in the mid-latitude ionosphere. They very often moves toward the southwest direction in the northern hemisphere with phase fronts aligned along the northwest to the southeast. However they do not extend to the equatorial latitudes and are rarely sighted at dip latitudes below 15°. In this study we investigate the characteristics of MSTID features observed over Yonaguni (24.5°N, 123.0°E; 19.3°N dip latitude), Japan with all-sky imaging of OI 630.0 nm airglow emission. We selected two year period for analysis in which one year corresponds to the solar minimum conditions and another year corresponds to solar maximum conditions. It is found that the MSTIDs occur more frequently during solar minimum conditions. The observed range of wavelengths, phase speeds and directions of MSTIDs are similar to those observed at typical mid-latitude sites. On many occasions the phase fronts of the observed MSTIDs do not extend over the whole field of view of imager indicating that some process hinders their extension to further lower latitudes. Herein, we also investigate the possible reason for the disappearance of phase fronts when they reach lower latitudes.

キーワード: medium-scale travelling ionospheric disturbances, OI 630.0 nm airglow

Keywords: medium-scale travelling ionospheric disturbances, OI 630.0 nm airglow

FPI と IS レーダーで観測された脈動オーロラ中の熱圏風速変動 Thermospheric wind variations in the pulsating aurora measured with FPI and IS radars

大山 伸一郎^{1*}; 栗原 純一²; 津田 卓雄³; 塩川 和夫¹; 三好 由純¹; ワトキンス ブレントン J.⁴

OYAMA, Shin-ichiro^{1*}; KURIHARA, Junichi²; TSUDA, Takuo³; SHIOKAWA, Kazuo¹; MIYOSHI, Yoshizumi¹; WATKINS, Brenton J.⁴

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 北海道大学大学院理学研究院, ³ 国立極地研究所, ⁴ Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks

¹ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ² Graduate School of Science, Hokkaido University, ³ National Institute of Polar Research, ⁴ Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks

Pulsating aurora is a typical phenomenon of the recovery phase of magnetic substorm and is frequently observed in the morning sector. While our understanding of pulsating aurora has not yet reached maturity, the widely accepted generation mechanism causing pulsations in precipitating electrons is related to wave-particle interactions around the equatorial plane in the magnetospheric tail. The closure current system in pulsating aurora may not be as strongly evolved as compared to that in the discrete arc because of smaller precipitation flux (or upward field-aligned current) and weaker perpendicular electric field (or the Pedersen current). Thus one may assume that Joule energy dissipation and/or Lorentz force does not play an important role for modifications of the thermospheric wind dynamics in pulsating aurora. However, we found thermospheric-wind variations in the pulsating aurora during simultaneous observations with a Fabry-Perot Interferometer (FPI; 557.7 nm), an all-sky camera (557.7 nm), and the European Incoherent Scatter (EISCAT) UHF radar. Of particular interest is that the location of the fluctuations was found in a darker area that appeared within the pulsating aurora. During the same time period, the EISCAT radar observed sporadic enhancements in the F-region backscatter echo power, which suggests the presence of low-energy electron (1 keV or lower) precipitation. Using other data sets archived by the EISCAT radar, a statistical analysis shows that the F-region enhancement tends to coexist with hard-particle precipitation or the pulsating aurora. This presentation will summarize our experimental evidences showing several events of the pulsating aurora, and discuss application of the phased-array IS radar to this study.

キーワード: 脈動オーロラ, 熱圏, FPI, IS レーダー

Keywords: pulsating aurora, thermosphere, FPI, IS radar

ISS-IMAPによる撮像観測とレーダーとGPSによる地上観測との同時観測 Coordinated observation of space-borne imaging by ISS-IMAP and ground-based measurement by radars and GPS

齊藤 昭則^{1*}; 山崎 敦²; 坂野井 健³; 吉川 一朗⁴; 大塚 雄一⁵; 山本 衛¹; 中村 卓司⁶; 秋谷 祐亮¹; 穂積 裕太¹
SAITO, Akinori^{1*}; YAMAZAKI, Atsushi²; SAKANOI, Takeshi³; YOSHIKAWA, Ichiro⁴; OTSUKA, Yuichi⁵; YAMAMOTO, Mamoru¹; NAKAMURA, Takuji⁶; AKIYA, Yusuke¹; HOZUMI, Yuta¹

¹ 京都大学, ² 宇宙科学研究所, ³ 東北大学, ⁴ 東京大学, ⁵ 名古屋大学, ⁶ 国立極地研究所

¹Kyoto University, ²JAXA/ISAS, ³Tohoku University, ⁴University of Tokyo, ⁵Nagoya University, ⁶National Institute of Polar Research

ISS-IMAP mission is a space-borne mission to investigate the mesoscale structures in the ionosphere, the mesosphere, and the plasmasphere by imaging observations of instruments on International Space Station. It consists of two imaging instruments. Visible-light and infrared spectrum imager (VISI) observes the airglow in the MTI region. Extra ultraviolet imager (EUVI) observes the resonant scattering from ions in the ionosphere and the plasmasphere. The objective of this mission is to clarify the upper atmospheric structures whose horizontal scale is 50-500km, and the effect of the structures on the space-borne systems in the low- and mid-latitude regions. VISI observes the airglow of 730nm (OH, Alt. 85km), 762nm (O₂, Alt 95km), 630nm(O, Alt.250km) in the Nadir direction to investigate the mesoscale structures in the mesosphere and the ionosphere. The coordinated observations of ISS-IMAP with ground-based measurements have been carried out. The MU radar and Equatorial Atmosphere Radar (EAR) observe the ionospheric density structures and field-aligned irregularities while ISS-IMAP observe the large and mesoscale ionospheric structures with the 630nm airglow, and the atmospheric gravity waves in the mesosphere with the 762nm airglow. The two-dimensional distribution of total electron contents derived with the ground-base GPS receiver array is also compared with the ionospheric and mesospheric structures observed by ISS-IMAP. The results of the ISS-IMAP mission by VISI and EUVI, and its coordinated observations with the ground-based instruments will be introduced in the presentation.

Keywords: Ionosphere, Airglow, Atmospheric Gravity Wave, Plasma Bubble, Radar, GPS

南極昭和基地大型大気レーダー計画の現状 Current status of Program of the Antarctic Syowa MST/IS radar (PANSY)

佐藤 薫^{1*}; 堤 雅基²; 佐藤 亨³; 中村 卓司²; 齊藤 昭則³; 富川 喜弘²; 西村 耕司²; 高麗 正史¹; 山岸 久雄²; 山内 恭²
SATO, Kaoru^{1*}; TSUTSUMI, Masaki²; SATO, Toru³; NAKAMURA, Takuji²; SAITO, Akinori³; TOMIKAWA, Yoshihiro²
; NISHIMURA, Koji²; KOHMA, Masashi¹; YAMAGISHI, Hisao²; YAMANOUCHI, Takashi²

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 国立極地研究所, ³ 京都大学

¹Dept Earth & Planetary Sci., The University of Tokyo, ²National Institute of Polar Research, ³Kyoto University

The PANSY radar is the first Mesosphere-Stratosphere-Troposphere/Incoherent Scatter (MST/IS) radar in the Antarctic. It is a VHF monostatic pulse Doppler radar operating at 47 MHz, consisting of an active phased array of 1,045 Yagi antennas and an equivalent number of transmit-receiver modules with a total peak output power of 500 kW. The first stage of the radar was installed at Syowa Station (69°00'S, 39°35'E) in early 2011, and is continuously operating with 228 antennas and modules since April 2012. The full radar system operation will start in 2015. This paper reports the project's scientific objectives, technical descriptions, and the preliminary results of observations made to date. The radar is designed to clarify the role of atmospheric gravity waves at high latitudes in the momentum budget of the global circulation in the troposphere, stratosphere and mesosphere, and to explore the dynamical aspects of unique polar phenomena such as polar mesospheric/stratospheric clouds. The katabatic winds as a branch of Antarctic tropospheric circulation and as an important source of gravity waves are also of special interest. Moreover, strong and sporadic energy inputs from the magnetosphere by energetic particles and field-aligned currents can be quantitatively assessed by the broad height coverage of the radar which extends from the lower troposphere to the upper ionosphere. From engineering points of view, the radar had to overcome restrictions related to the severe environments of Antarctic research, such as very strong winds, limited power availability, short construction periods, and limited manpower availability. We resolved these problems through the adoption of specially designed class-E amplifiers, lightweight and tough antenna elements, and versatile antenna arrangements. We will show highlights of several interesting results from the radar observations regarding severe snow storms, gravity waves, multiple tropopauses, and polar mesosphere summer/winter echoes.

Reference

Sato, K., et al., *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, doi:10.1016/j.jastp.2013.08.022, 2013.

キーワード: 大型大気レーダー, 極域大気, 中層大気, 重力波, 大気大循環

Keywords: MST/IS radar, polar atmosphere, middle atmosphere, gravity waves, general circulation

衛星-地上連携観測の重要性：ERGに向けて Importance of coordinated ground-based, satellite observations

三好 由純^{1*}; 大山 伸一郎¹; 齊藤 慎司¹
MIYOSHI, Yoshizumi^{1*}; OYAMA, Shin-ichiro¹; SAITO, Shinji¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹STEL, Nagoya University

The ERG (Exploration of energization and Radiation in Geospace) is Japanese geospace exploration project. The project focuses on the geospace dynamics in the context of the cross-energy coupling via wave-particle interactions. The project consists of the satellite observation team, the ground-based network observation team, and integrated-data analysis/simulation team. The ERG satellite will be launched in FY2015. Comprehensive instruments for plasma/particles, and field/waves are installed in the ERG satellite to understand the cross-energy coupling system. In the ERG project, several ground-network teams join; magnetometer networks, radar networks, optical imager networks, etc. Moreover, the modeling/simulations play an important role for the quantitative understanding. In this presentation, we will discuss the importance of coordinated observations toward the ERG era. As an example, we show the cooperative observations between the geospace satellite Van Allen Probes and EISCAT to observe the pulsating aurora. The EISCAT measured the height profile of the electron density that can provide the energy of the precipitating electrons. The Van Allen Probes measured the plasma waves in the magnetosphere, which can be used to investigate the origin of the pulsating aurora. In fact, the GEMSIS-RBW simulation that used the observed plasma waves as an input reproduces characteristics of the observed precipitation. Such coordinated observations including the modeling provide a comprehensive view on cause and result.

キーワード: 衛星-地上連携観測, ERG プロジェクト
Keywords: satellite-ground observations, ERG project

南極広域観測網による太陽-地球系現象の総合研究 Synthetic Study on Solar-Terrestrial Phenomena with Widespread Observation Network in Antarctica

門倉 昭^{1*}; 山岸 久雄¹; 行松 彰¹; 宮岡 宏¹; 岡田 雅樹¹; 小川 泰信¹; 田中 良昌¹; 片岡 龍峰¹; 海老原 祐輔²; 元場 哲郎³

KADOKURA, Akira^{1*}; YAMAGISHI, Hisao¹; YUKIMATU, Akira sessai¹; MIYAOKA, Hiroshi¹; OKADA, Masaki¹; OGAWA, Yasunobu¹; TANAKA, Yoshimasa¹; KATAOKA, Ryuhō¹; EBIHARA, Yusuke²; MOTOKA, Tetsuo³

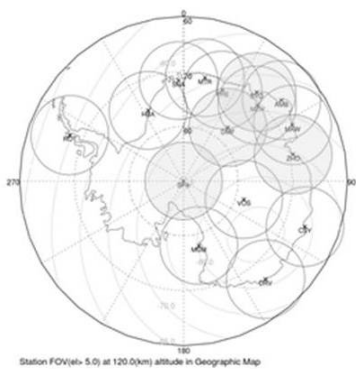
¹ 国立極地研究所, ² 京都大学生存圏研究所, ³ ジョンズホプキンス大学応用物理研究所

¹National Institute of Polar Research, ²Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ³Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University

現在南極域には、SuperDARN レーダー網や地上の有人、無人観測点における様々な観測機器による観測点網など、極を取巻いて、緯度方向にはサブオーロラ帯から極冠域まで、経度方向には、夜側から昼間側の時間帯にまで及ぶ広域観測網が国際協力の下展開されている。こうした広域観測網は南極域独自のものであり、太陽-地球相互作用の結果生じる現象：昼間側カスプ域、極冠域への太陽風エネルギー、運動量の直接的な侵入、サブストーム時の爆発的なエネルギー消費、ストーム時の高エネルギー粒子の大気への侵入、などの研究に適している。また、NOAA、DMSP 衛星などの低高度衛星や、THEMIS/ARTEMIS、Geotail、ERG、MMS 衛星といった磁気圏衛星と連携した観測・研究が期待出来る。本発表では、特に極地研が関係している観測計画の現状や将来計画の紹介を中心に、太陽-地球系結合過程の研究における南極広域観測網の重要性を説明および議論する予定である。

キーワード: 南極, 広域, 観測ネットワーク, 太陽地球系物理学

Keywords: Antarctica, large area, observation network, Solar-Terrestrial Physics



Station FOV(elev. 5 deg) at 120.0(km) altitude in Geographic Map
Figure 1. Field of views (FOVs) of Antarctic stations projected at 120 km altitude for elevation above 5 deg. The shaded FOV indicates the station where auroral optical observation is currently carried out. Geomagnetic latitudes are also shown in gray lines.

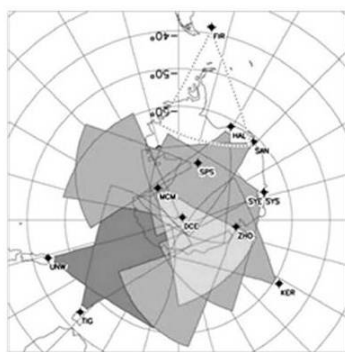


Figure 2. Field of views of the SuperDARN radars in the southern hemisphere in the magnetic coordinates, including two radars at Syowa Station (SYE and SYS).

A review of selected data-analysis techniques for determining ionospheric electrodynamic parameters on mesoscales

A review of selected data-analysis techniques for determining ionospheric electrodynamic parameters on mesoscales

VANHAMAKI, Heikki^{1*} ; AMM, Olaf¹
VANHAMAKI, Heikki^{1*} ; AMM, Olaf¹

¹Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland

¹Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland

We present a review of selected data-analysis methods that are applied in studies of ionospheric electrodynamics and magnetosphere-ionosphere coupling using ground-based and space-based data sets. At present, there is no single measurement device that can measure all ionospheric electrodynamic parameters directly and simultaneously, with good spatial and temporal resolution and coverage. Therefore data-analysis techniques are needed to combine different types of measured data and to obtain unobserved ionospheric parameters from the observed ones, possibly using some additional assumptions in the process. We concentrate on methods that are data driven and applicable to single events (not simulations or statistical models), and which can be used in mesoscale studies, where the analysis area is typically some hundreds or thousands of km across.

The primary focus of this review is in ionospheric electrodynamics, so we do not include variables like chemical composition, temperature, etc. in our discussion. Furthermore we concentrate on analysis techniques that have been developed to be used with data from the MIRACLE network (Magnetometers - Ionospheric Radars - All-sky Cameras Large Experiment) situated in Northern Europe, possibly in combination with satellite observations, such as Cluster or CHAMP. However, the techniques can be applied to data from any other mesoscale network with similar observations.

The full set of ionospheric electrodynamic parameters that we are interested in consist of the ionospheric horizontal electric field, height integrated Hall and Pedersen conductances, horizontal sheet current and field aligned current (FAC). Additionally, the ground magnetic perturbation is an important input parameter in many analysis methods.

Most of the reviewed methods are used in 2-dimensional (latitude - longitude) regions of the ionosphere, but some methods have also 1-dimensional variants. In 1D analysis it is assumed that ionospheric parameters vary only in one horizontal direction (e.g. as a function of geomagnetic latitude), so input data is required along a single chain or a satellite track only. The 1D methods are especially useful when analyzing data from an overpassing satellite or from a meridional magnetometer chain.

キーワード: Ionosphere, Ionospheric electrodynamics, Ionospheric currents, Data-analysis methods
Keywords: Ionosphere, Ionospheric electrodynamics, Ionospheric currents, Data-analysis methods

オーロラ渦列構造の背景にある電場の微細構造 Fine-scale electrodynamic structure behind auroral vortex street

細川 敬祐^{1*}
HOSOKAWA, Keisuke^{1*}

¹ 電気通信大学
¹University of Electro-Communications

One of the primary scientific objectives of the planned EISCAT_3D system would be “3D imaging of aurora”, especially 3D imaging of dynamically moving auroral arcs at the time of substorm expansion phase onset. In order to discuss the specification of the EISCAT_3D system in detail, we have to know how such an effort of multi-dimensional imaging of aurora has been made by using currently-working radar systems in the high-latitude region. For this purpose, I present a fine-scale electrodynamic structure behind an auroral vortex street observed immediately before substorm expansion phase onset, as inferred from high spatial and temporal resolution measurements of auroral breakup with an all-sky TV camera (ATV) and a coherent HF radar of Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) in Iceland. During the interval of interest, the ATV observed eastward propagating auroral vortices in the initial brightening arc of a substorm just prior to the poleward expansion. During the sequential passage of the vortices across the radar beams, the radar detected large velocity flow shears whose magnitude was in excess of 1.5 km/s. The observations suggest that flow shears were located very close to the center of the vortices; thus, they corresponded to electric fields converging toward the vortices, which is consistent with the existence of upward field-aligned currents (FACs) flowing out of the vortices. The temporal and spatial resolutions of the current radar measurement were still insufficient for fully resolving the detailed electrodynamic structure behind the fast moving auroral vortices. At least, however, the observations suggest the existence of highly localized filamentary FAC structures behind the auroral vortex street. Such a fine-scale structuring process of an auroral arc would be one of the possible targets of the 3D imaging observations of the planned EISCAT_3D system.

キーワード: オーロラ, レーダー, 電場
Keywords: Aurora, Radar, Electric Field

Study of the physical meanings of ionospheric tidal signatures using theoretical models Study of the physical meanings of ionospheric tidal signatures using theoretical models

LIN, Charles^{1*} ; CHEN, Yu-tsung¹ ; CHEN, Po-cheng¹ ; CHANG, Loren² ; LIN, Jia-ting¹ ; HUBA, Joseph³ ; CHEN, Chia-hung¹

LIN, Charles^{1*} ; CHEN, Yu-tsung¹ ; CHEN, Po-cheng¹ ; CHANG, Loren² ; LIN, Jia-ting¹ ; HUBA, Joseph³ ; CHEN, Chia-hung¹

¹Department of Earth Science, National Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan, ²Institute of Space Science, National Central University, Chung-Li, Taiwan, ³Plasma Physics Division, Naval Research Laboratory, Washington, D.C., USA

¹Department of Earth Science, National Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan, ²Institute of Space Science, National Central University, Chung-Li, Taiwan, ³Plasma Physics Division, Naval Research Laboratory, Washington, D.C., USA

Variations the ionospheric electron density structures related to the tidal forcing propagating upward from the lower atmosphere have been studied intensively recently. The longitudinal variations of ionospheric electron density are related to the thermospheric nonmigrating tidal signatures produced in-situ or propagating upward from below. During a stratospheric sudden warming, thermospheric migrating tidal signatures are modified and lead to the phase shift of ionospheric electron density structures at low latitudes. With the increasing number of global ionospheric observations, it is desirable to relate the thermospheric tidal signatures to corresponding tidal signatures of ionospheric electron density, since the neutral thermospheric temperature and wind observations are rather limited. In this paper we perform theoretical simulations to study the interconnections between tidal modes in thermospheric neutral parameters and ionospheric plasma. The migrating and nonmigrating tides of thermospheric winds output from NCAR GSWM/TIEGCM runs are incorporated to NRL SAMI-3 to investigate the responses of corresponding tidal modes in ionospheric electron density and their physical meanings.

キーワード: atmospheric tides, tidal signature of ionospheric electron density

Keywords: atmospheric tides, tidal signature of ionospheric electron density

Wavelike Structures in the Low-Latitude F region Using Beacon Satellites Wavelike Structures in the Low-Latitude F region Using Beacon Satellites

TSUNODA, Roland^{1*}
TSUNODA, Roland^{1*}

¹SRI International
¹SRI International

The low-latitude F-region plasma is produced by solar radiation, and its gross structural features arise from plasma transport and re-distribution (1) along geomagnetic field (B) lines by a meridional neutral wind, and (2) in planes transverse to B by an electric field (E). The fundamental process is often referred to as the equatorial fountain, in which an eastward electric field, applied over the magnetic dip equator, drives the plasma upward; this transverse transport is accompanied by downward and outward transport along B, which is driven by gravity and diffusion. The enhancements in plasma density that form, one in each hemisphere, are known as the equatorial ionization anomalies. Embedded within these largest-scale structures is a hierarchy of smaller-scale wavelike perturbations that extend downward from perhaps 1000 km to nearly 10 cm. These structures include large-scale wave structure, traveling ionospheric disturbances, equatorial plasma bubbles, as well as the small-scale irregularities that are responsible for radio wave scintillations and radar backscatter. Because of the complex hierarchy of structures that can be present, comprehensive investigations require a network of sensors that can provide both spatial and temporal information with adequate spatial resolution, while providing the necessary geographical coverage. A brief review of some of the recent results regarding wavelike structures, obtained from studies using a broad network of instruments distributed throughout the Southeast Asian sector, is presented.

キーワード: Wavelike structures, Low Latitude F Region, Plasma Structures, Beacon Satellites
Keywords: Wavelike structures, Low Latitude F Region, Plasma Structures, Beacon Satellites

Preliminary study of equatorial ionization anomaly characteristic from GRBR chain in southeast Asia
Preliminary study of equatorial ionization anomaly characteristic from GRBR chain in southeast Asia

WATTHANASANGMECHAI, Kornyanat^{1*} ; YAMAMOTO, Mamoru¹ ; SAITO, Akinori² ; MARUYAMA, Takashi³
WATTHANASANGMECHAI, Kornyanat^{1*} ; YAMAMOTO, Mamoru¹ ; SAITO, Akinori² ; MARUYAMA, Takashi³

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ²Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, ³National Institute of Information and Communications Technology

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ²Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, ³National Institute of Information and Communications Technology

To study the equatorial ionization anomaly (EIA) characteristic, comparison of total electron content (TEC) obtained from the GNU Radio Beacon Receiver (GRBR) network in southeast Asia with the data from SEALION ionosonde network, Equatorial Atmosphere Radar (EAR), and the SAMI2 model are employed. Five GNU Radio Beacon Receivers (GRBRs) were aligned along 100 degree geographic longitude. Their observations started in March 2012 to enable monitoring the ionosphere during the high solar activity. The GRBR network in southeast Asia is a unique observation network of which the field of view covers ± 20 degree magnetic latitude including the magnetic equator to capture the ionospheric irregularities including the EIA. As a preliminary result, the day-to-day variability of the EIA was captured by GRBR chain. The asymmetry of the EIA was investigated. As generally known, the neutral wind is a primary source of the EIA asymmetry, while the zonal electric field is the secondary one. Using the GRBR network, the EIA asymmetry is compared with the data from SEALION ionosonde network and from SAMI2 model to clarify the source mechanism of the EIA asymmetry.

キーワード: GRBR, EIA symmetry, Equatorial, Ionosphere, Ionosonde, SAMI2 model
Keywords: GRBR, EIA symmetry, Equatorial, Ionosphere, Ionosonde, SAMI2 model

赤道大気レーダーとGPS受信機群を用いたVHFレーダーによるプラズマバブル検出の衛星航法補強システムに対する効果の検証
Performance evaluation of plasma bubble monitoring by VHF radars for GNSS augmentation systems

斎藤 亨^{1*}; 山本 衛²; 大塚 雄一³; 吉原 貴之¹
SAITO, Susumu^{1*}; YAMAMOTO, Mamoru²; OTSUKA, Yuichi³; YOSHIHARA, Takayuki¹

¹ 電子航法研究所, ² 京都大学生存圏研究所, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹Electronic Navigation Research Institute, ²RISH, Kyoto University, ³STEL, Nagoya University

For global navigation satellite systems (GNSS), ionospheric plasma is one of the most serious error sources. Especially in air navigation where safety is extremely important, augmentation systems corresponding to flight phases are used. Even with augmentation systems of current design, such as ground-based augmentation system (GBAS) or satellite-based augmentation system (SBAS), probability of miss-detection of ionospheric anomalies prevent them from more advance operations. In the low latitude region, ionospheric anomaly detection is a challenge because of frequent occurrence of plasma bubbles.

In this study, plasma bubble detection by a VHF backscatter radar is proposed as an external ionospheric monitor. Multi-beam observation of plasma bubbles can detect two dimensional shapes of plasma bubbles in a plane perpendicular to the magnetic field. When satellite-receiver path of GNSS signals pass crosses the magnetic field line, the signals shall be discarded because it may be affected by plasma bubble.

To evaluate the performance of this system, a VHF radar-GNSS receivers combined experiment has been conducted. The Equatorial Atmosphere Radar (EAR) is used to detect plasma bubbles. Sets of GNSS receivers around the EAR and in Bangkok are used as the pseudo-user and reference station. The observation started from October 2012, and continues with some technical interruptions.

At the meeting, first results of the experiment will be presented.

キーワード: 赤道大気レーダー, 衛星航法補強システム, プラズマバブル, 電離圏監視
Keywords: Equatorial Atmosphere Radar, GNSS augmentation system, plasma bubble, ionospheric monitoring

業務的電離圏研究の将来の方向性 Future direction of operational ionospheric research

石井 守^{1*}
ISHII, Mamoru^{1*}

¹ 情報通信研究機構
¹NICT

We are now facing new aspect of operational ionospheric research. International Civil Aviation Organization (ICAO) is planning to revise their protocol and in near future all civil aviation must use space weather information for their operation.

Space weather information is important for aviation mainly in the following three factors; HF communication, aviation and radiation. Space weather phenomena in polar region are tend to be focused on in many cases, however, it is important also in equatorial region, e.g., equatorial plasma bubbles.

There are still some unknown process in space weather and they make the forecast difficult and low precision. We are required two different approach; understand the unknown process, and make empirical forecast methods which works even though we have still unknown process. Especially we need domestic/international cooperation in the former approach e.g., EISCAT-3D and Equatorial MU radar, because it is impossible to cover these observation in only one institute. ICAO issue is one of the important outcome for space weather and we should unify our activity to contribute the operation.

キーワード: 宇宙天気, 電離圏, 国際民間航空機関
Keywords: space weather, ionosphere, ICAO

宇宙天気研究における EISCAT 3D の重要性 Importance of EISCAT 3D as space weather reseach

長妻 努^{1*}
NAGATSUMA, Tsutomu^{1*}

¹ 情報通信研究機構
¹National Institute of Information and Communications Technology

These days, importance of space weather is significantly realized by international community, such as ICAO, WMO etc. NICT has been responsible for national space weather forecast in Japan for a long time. Since NICT's space weather forecast center belongs to the International Space Environment Service (ISES) as the Regional Warning Center (RWC) Japan, our operational activities are supported by international cooperation. To understand the current conditions of "space weather", monitoring networks of space weather observations are operated and used. For future objective and advanced space weather monitoring, we have been developing a space weather numerical simulation codes, too. These activities are strongly related to the space weather research for improving space weather forecasting.

EISCAT 3D is a quite unique facility to measure many kinds of physical parameters which cannot be obtained from other instruments. Therefore, it is expected that the EISCAT 3D can contribute to the evaluation and improvement of space weather models. The future perspective of space weather research and our expectation to EISCAT 3D are introduced in our presentation.

キーワード: 宇宙天気, EISCAT 3D, 地上観測
Keywords: Space Weather, EISCAT 3D, Ground-Based Observation

アジア海洋大陸における積乱雲活動と全球雲変動 Thunderstorm Activity in Asia Maritime Continent and Global Cloud Variation

高橋 幸弘^{1*}; 佐藤 光輝¹; 山下 幸三²
TAKAHASHI, Yukihiko^{1*}; SATO, Mitsuteru¹; YAMASHITA, Kozo²

¹ 北海道大学・宇宙理学専攻, ² サレジオ高専

¹Department of CosmoSciences, Hokkaido University, ²Salesian Polytechnic

Global relationship among the thunderstorm activities especially in Asia Maritime Continent, cloud variations in tropical regions and solar parameters was examined based on lightning data measured by Global ELF observation Network (GEON) operated by Hokkaido University and Outgoing Longwave Radiation (OLR) intensity. A correlated analysis between the number of the lightning strokes, cloud variation in the tropical regions, and solar parameters was examined, looking into the variation with ~one month periodicity. It was found that the number of lightning strokes in Asia Maritime Continent (AMC) varies with about month periodicity in the period from February to June 2004 and shows positive correlation ($R \sim 0.8$) with OLR in the Western Pacific Warm Pool (WPWP). On the other hand, OLR in the central Africa shows negative correlation with the number of lightning strokes in the AMC in that period. It is also found that the galactic cosmic rays or UV intensity associated with solar activity shows good correlation with tropical OLR or lightning activity in AMC. One explanation to connect such global variations in thunderstorm / cloud amount with solar parameters would be the electrical circuit between lower and upper atmospheres. The radars distributed globally would provide some essential information for this hypothesis, such as conductivity in the lower ionosphere, which may determine the strength of electrical connection in the vertical and horizontal directions.

キーワード: アジア海洋大陸, 積乱雲活動, 熱帯, 雲量, OLR, 太陽活動

Keywords: Maritime Continent, thunderstorm, tropical region, cloud amount, OLR, solar activity

Equatorial MU Radar project Equatorial MU Radar project

山本 衛^{1*}; 橋口 浩之¹; 津田 敏隆¹

YAMAMOTO, Mamoru^{1*}; HASHIGUCHI, Hiroyuki¹; TSUDA, Toshitaka¹

¹ 京都大学生存圏研究所

¹RISH, Kyoto University

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University (RISH) has been studying the atmosphere by using radars. The first big facility was the MU (Middle and Upper atmosphere) radar installed in Shiga, Japan in 1984. This is one of the most powerful and multi-functional radar, and is successful of revealing importance of atmospheric waves for the dynamical vertical coupling processes. The next big radar was the Equatorial Atmosphere Radar (EAR) installed at Kototabang, West Sumatra, Indonesia in 2001. The EAR was operated under close collaboration with LAPAN (Indonesia National Institute for Aeronautics and Space), and conducted the long-term continuous observations of the equatorial atmosphere/ionosphere for more than 10 years. The MU radar and the EAR are both utilized for inter-university and international collaborative research program for long time. National Institute for Polar Research (NIPR) joined EISCAT Scientific Association together with Nagoya University, and developed the PANSY radar at Syowa base in Antarctica as a joint project with University of Tokyo. These are the efforts of radar study of the atmosphere/ionosphere in the polar region. Now we can find that Japan holds a global network of big atmospheric/ionospheric radars. The EAR has the limitation of lower sensitivity compared with the other big radars shown above. RISH now proposes a plan of Equatorial MU Radar (EMU) that is to establish the MU-radar class radar next to the EAR. The EMU will have an active phased array antenna with the 163m diameter and 1055 cross-element Yagis. Total output power of the EMU will be more than 500kW. The EMU can detect turbulent echoes from the mesosphere (60-80km). In the ionosphere incoherent-scatter observations of plasma density, drift, and temperature would be possible. Multi-channel receivers will realize radar-imaging observations. The EMU is one of the key element in the project "Study of coupling processes in the solar-terrestrial system" for Master Plan 2014 of the Science Council of Japan (SCJ). We show the EMU project and its science in the presentation.

Keywords: Atmospheric radar, ionosphere observation, Indonesia, MST radar

コンフィギュラブルな大気レーダー用デジタル受信機の開発 Development of a configurable digital receiver for atmospheric radars

山本 真之^{1*}; Gan Tong¹; 藤田 俊之¹; Noor Hafizah Binti Abdul Aziz¹; 岡谷 良和¹; 橋口 浩之¹; 山本 衛¹
YAMAMOTO, Masayuki^{1*}; GAN, Tong¹; FUJITA, Toshiyuki¹; NOOR HAFIZAH BINTI, Abdul aziz¹; OKATANI, Yoshikazu¹
; HASHIGUCHI, Hiroyuki¹; YAMAMOTO, Mamoru¹

¹ 京都大学生存圏研究所

¹ Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

鉛直分解能及び角度分解能を向上させるレーダーイメージング技術の発展により、大気レーダー観測による大気不安定波の微細構造・生成メカニズムの理解が進みつつある。レーダーイメージング技術の開発をさらに進め、大気レーダーへの標準的な実装につなげるためには、安価かつ多チャンネルの受信機が必要である。また、レーダーイメージング技術の開発・実証のためには、観測要求に応じてリアルタイム信号処理を柔軟に変更できる受信機が必要である。

講演者らが開発に取り組んでいる大気レーダー用デジタル受信機は、汎用のソフトウェア無線機である Ettus Research 社製の Universal Software Radio Peripheral (USRP) とパソコンから構成されている。そのため、安価であるのみならず柔軟な信号処理の構成が可能（コンフィギュラブル）である。講演では、デジタル受信機の開発状況と開発成果を述べる。

キーワード: 大気レーダー, ウィンドプロファイラー, デジタル受信機, ソフトウェア無線技術, USRP

Keywords: atmospheric radar, wind profiler radar, digital receiver, software-defined radio technique, Universal Software Radio Peripheral (USRP)

Statistical study of F-region field-aligned irregularities based on Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia
Statistical study of F-region field-aligned irregularities based on Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia

Dao Tam^{1*}; 大塚 雄一¹; 塩川 和夫¹; 山本 衛²

DAO, Tam^{1*}; OTSUKA, Yuichi¹; SHIOKAWA, Kazuo¹; YAMAMOTO, Mamoru²

¹STEL, Graduate School of Science, Nagoya University, ²Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

¹STEL, Graduate School of Science, Nagoya University, ²Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

I examined the statistical characteristics of Field-Aligned Irregularities (FAIs) echoes from the F-region of Ionosphere using Equatorial Atmosphere Radar (EAR) in Indonesia during three years from 2010 to 2012. We investigated the differences between post-sunset and post-midnight FAIs. Some results are analyzed in the daily and monthly average of echo power, spectral width, and Doppler velocity. We found that post-midnight FAIs occurred mostly in summer solstices from May to August in 2010 and 2011, and only in June and July in 2012. We realized some different characteristics between post-sunset and post-midnight FAIs observed from EAR as follow. (1) Echo intensity of the post-midnight FAIs is weaker than that of post-sunset FAIs. (2) The post-sunset FAIs often exceed an altitude of 450 km, whereas the post-midnight FAIs mostly occur in a range from 200 to 450 km in F-region. (3) Spectral width of the post-midnight FAIs is smaller than that of the post-sunset FAIs. These results suggest that plasma instability operates more actively at post-sunset than at post-midnight.

キーワード: F-region Ionosphere, Field-Aligned Irregularities (FAIs), VHF radar

Keywords: F-region Ionosphere, Field-Aligned Irregularities (FAIs), VHF radar

Statistical study of ionospheric irregularities by using Equatorial Atmosphere Radar Statistical study of ionospheric irregularities by using Equatorial Atmosphere Radar

Martiningrum Dyah Rahayu^{1*}; 山本 衛¹
MARTININGRUM, Dyah rahayu^{1*}; YAMAMOTO, Mamoru¹

¹ 京都大学生存圏研究所

¹RISH, Kyoto University

The equatorial region is the source of many unique atmospheric processes that couple the entire atmosphere vertically from bottom to top and horizontally from equator to pole. The dynamical, electrodynamical, and electrical process of lower and upper atmosphere of equatorial region contribute to ionospheric irregularities through propagation of atmospheric waves, and magnetosphere-ionosphere interaction. Those process are responsible for the large degree of variabilities observed in the low latitude ionosphere.

Study of ionospheric irregularities was made during 2008-2013 by using 47 MHz Equatorial Atmosphere Radar (EAR) in Kotabang, Indonesia (0.20S, 100.32E; 10.36S dip latitude). Characteristic of echoes from ionospheric Field Aligned Irregularities (FAI) classified based on structure of E and F backscattered echoes power of EAR radar both of spatially and temporally. The results base on intermittent observations (2008-2010) and continuous observations (2011-2013). During the observations were obtained percentage of Equatorial Spread F (ESF) occurrences, diurnal and seasonal characteristics of ionospheric irregularities from the E region and also from F region. Furthermore, occurrence correlation between E and F region irregularities are also observed.

Keywords: Ionospheric Irregularity, Equatorial Atmosphere Radar, Statistical Study

赤道大気上下結合研究のためのライダー観測 Lidar observations for study of coupling processes over the equatorial region

阿保 真^{1*}; 長澤 親生¹; 柴田 泰邦¹
ABO, Makoto^{1*}; NAGASAWA, Chikao¹; SHIBATA, Yasukuni¹

¹ 首都大学東京

¹Tokyo Metropolitan University

Stratosphere-troposphere exchange is important for the budget of ozone in the lower stratosphere as well as in the troposphere. Upward transport occurs in the tropical region (Brewer-Dobson circulation), but the exact mechanism controlling the transport is not clear. We have constructed the lidar facility for survey of atmospheric structure over troposphere, stratosphere, mesosphere and low thermosphere over Kototabang (100.3E, 0.2S), Indonesia in the equatorial region [1]. The lidar system consists of the Mie and Raman lidars for tropospheric aerosol, water vapor and cirrus cloud measurements, the Rayleigh lidar for stratospheric and mesospheric temperature measurements and the Resonance lidar for metallic species such as Na, Fe, Ca ion measurements and temperature measurements in the mesopause region. The laser system included in this lidar facility consists of three pulsed Nd:YAG lasers, a pulsed Ti:Sapphire laser seeded by a ring Ti:Sapphire laser and a dye laser. The most parts of this lidar system are remotely controlled via the Internet from Japan. The full lidar observations started from 2004. The routine observations of clouds and aerosol in the troposphere and stratosphere are continued now.

We found the top height of the stratospheric aerosol layer descend with time, synchronized with the QBO in the zonal wind. The QBO signals of the aerosol layer are noticed in the altitude range from 30 to 40 km. In addition, the tropospheric aerosol amount observed around the tropopause over Kototabang is much more than at mid-latitudes. They suspect that this is an evidence of active material exchange between the troposphere and the stratosphere over the equatorial region.

We have installed DIAL (differential absorption lidar) system for high-resolution measurements of vertical ozone profiles in the equatorial tropopause region over Kototabang, Indonesia. We will contribute to the elucidation of the climate change by getting observational information about high-resolution ozone density profiles, and the wave-propagation and material transportation using ozone as a tracer from the troposphere to the lower stratosphere over the equator.

There were many ozone DIAL systems in the world, but almost systems are optimized for stratospheric ozone layer measurement [2] or tropospheric ozone measurement [3]. Because of deep ozone absorption in the UV region, the wavelength selection is important. Simulation results show that we can measure above 20km with height resolution of 500m within 5% random error.

Acknowledgments

This work was financially supported by Grants-in-Aid for Scientific Research (No. 233401043).

References

1. Nagasawa C., M. Abo, Y. Shibata 23rd International Laser Radar Conference, No.20-8, 43-46, 2006.
2. Megie G. J., G. Ancellet., J. Pelon, Lidar measurements of ozone vertical profiles, Applied Optics 24, 3454-3463, 1985.
3. Nakazato M., T. Nagai, T. Sakai, Y. Hirose, Applied Optics, 46, 2269-2279, 2007.

キーワード: 大気上下結合, 赤道, ライダー

Keywords: coupling process, equatorial region, lidar

Microstructure of Precipitation over Indonesia from a Network of Parsivel disdrometers Microstructure of Precipitation over Indonesia from a Network of Parsivel disdrometers

MARZUKI, Marzuki^{1*}; HASHIGUCHI, Hiroyuki²; YAMAMOTO, Masayuki²; MORI, Shuichi³; TAKAHASHI, Yukihiro⁴
MARZUKI, Marzuki^{1*}; HASHIGUCHI, Hiroyuki²; YAMAMOTO, Masayuki²; MORI, Shuichi³; TAKAHASHI, Yukihiro⁴

¹Department of Physics, Andalas University, Padang, Indonesia, ²Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH) Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-001, ³Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokosuka, Japan, ⁴Hokkaido University, Sapporo, Japan

¹Department of Physics, Andalas University, Padang, Indonesia, ²Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH) Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-001, ³Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokosuka, Japan, ⁴Hokkaido University, Sapporo, Japan

Insight into the regional variability of raindrop size distribution (DSD), is of primary importance for estimation of rainfall using remote sensing techniques, cloud/precipitation microphysical processes and numerical weather modeling. In order to quantify the regional variability of the DSD over Indonesia, a network of 4 Parsivel disdrometers along equatorial Indonesia has been designed. The disdrometers were installed at Kototabang (KT; 100.32E, 0.20S), Pontianak (PT; 109.37E, 0.00S), Manado (MN; 124.92E, 1.55N) and Biak (BK; 136.10E, 1.18S). It was found that the DSD at PT has more large drops than at the other three sites. The DSDs at the four sites are influenced by both oceanic and continental systems, and majority of the data matched the maritime-like DSD that was reported in a previous study. Continental-like DSDs were somewhat dominant at PT and KT. The combination of World Wide Lightning Location Network, wind profiler and the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Precipitation Radar (PR) allows a discussion on physical basis behind the regional variability of DSD over Indonesia.

キーワード: Indonesia, Parsivel, Raindrop
Keywords: Indonesia, Parsivel, Raindrop

EISCAT_3Dによる極域下部熱圏大気の研究 Feature studies of the polar lower thermosphere by EISCAT_3D

野澤 悟徳^{1*}
NOZAWA, Satonori^{1*}

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹STEL, Nagoya University

The new EISCAT_3D radar will give us with great opportunities. Its 3D volumetric observations of ion velocity will provide high quality neutral wind data in the lower thermosphere. Furthermore, its continuous observations will make it possible to study planetary waves in the lower thermosphere in more detail as well as day-to-day variabilities of tides. In this talk, we will describe our future study targets.

The lower thermospheric wind dynamics has been paid great attention for several decades to understand the Magnetosphere-Ionosphere-Thermosphere coupling, since the neutral atmosphere plays a key role. In particular, it has been an issue how the lower thermosphere will response to the solar wind energy input. IS radar measurements of the polar lower thermosphere begun about 40 years ago by a pioneer work of Brekke et al. [JGR, 78, 8235, 1973], and significant number of studies have been conducted since then. However, our understanding of the lower thermosphere is still limited. One of reasons is that the lower thermosphere is significantly influenced by atmospheric waves propagating from below. Thus, the day-to-day variability is very prominent. Owing to high running cost, long term datasets are hard to be obtained by IS radar a decade ago. In 2007-2008, EISCAT Svalbard radar was operated almost continuously for 1 year. However, only about 20% of the data sets can be used for deriving the ion velocity vector. If we have wind velocity datasets on daily basis like meteor and MF radars usually made for the mesospheric wind measurements (70-100 km), our understanding of the lower thermosphere wind dynamics will be much more progressed. EISCAT_3D will make it possible.

Furthermore, the EISCAT_3D radar will give us higher temporal resolution data sets of neutral winds in the lower thermosphere with multi volumes. The observations will allow us to distinguish the temporal and spatial variations of winds. One of scientific targets is to investigate wind variations nearby the auroral arc in the E-region. By combining sodium and Rayleigh LIDARs as well as meteor and MF radars, which provide neutral temperature and wind velocity, respectively, we expect we can investigate dissipation process of gravity waves in more details as well as effects of auroral precipitation on the middle atmosphere.

キーワード: EISCAT_3D, 極域電離圏, 下部熱圏, プラネタリー波, 大気潮汐波, 大気重力波
Keywords: EISCAT_3D, polar ionosphere, lower thermosphere, planetary wave, tidal wave, gravity wave

EISCAT 3D による惑星非熱的電波観測 Observation of non-thermal planetary radio emissions with EISCAT 3D

土屋 史紀^{1*}; 三澤 浩昭¹
TSUCHIYA, Fuminori^{1*}; MISAWA, Hiroaki¹

¹ 東北大学

¹Tohoku University

EISCAT 3D is developing as incoherent scatter radar to study the terrestrial ionosphere and atmosphere. Due to large aperture area and low noise temperature of the receiving system of EISCAT 3D and the uniqueness of the receiving frequency of 233 MHz, it can also be a useful tool to study non-thermal radio emissions from the solar system planets. In this paper, feasibility and advantage of EISCAT 3D for observing non-thermal planetary radio emissions are presented. Following topics will be discussed. (1) Time variability of Jovian synchrotron radiation, (2) Radio emissions from lightning discharges occurred in the atmospheres of Mars and Saturn, and (3) Recent trials to detect incoherent radio emissions from extra-solar planets.

EISCAT_3D プロジェクトへの応用に向けた一般化オーロラトモグラフィの数値シミュレーション Numerical simulation of Generalized Auroral Computed Tomography toward its application to the EISCAT_3D project

田中 良昌^{1*}; 小川 泰信¹; 門倉 昭¹; Gustavsson Bjorn²; 麻生 武彦³; Brandstrom Urban⁴; 宮岡 宏¹; 上野 玄太⁵; 才田 聡子⁶

TANAKA, Yoshimasa^{1*}; OGAWA, Yasunobu¹; KADOKURA, Akira¹; GUSTAVSSON, Bjorn²; ASO, Takehiko³; BRANDSTROM, Urban⁴; MIYAOKA, Hiroshi¹; UENO, Genta⁵; SAITA, Satoko⁶

¹ 国立極地研究所, ² トロムソ大学, ³ 総合研究大学院大学, ⁴ スウェーデン宇宙物理研究所, ⁵ 統計数理研究所, ⁶ 情報・システム研究機構

¹National Institute of Polar Research, ²University of Tromso, ³The Graduate University for Advanced Studies (Sokendai), ⁴Swedish Institute of Space Physics, ⁵The Institute of Statistical Mathematics, ⁶Research Organization of Information and Systems

The EISCAT_3D is a next-generation phased-array incoherent scatter radar, which is capable of measuring three-dimensional (3D) ionospheric plasma parameters at ten-times higher temporal and spatial resolution. Thus, it is expected that the EISCAT_3D will provide new insights into auroral physics. On the other hand, optical imaging observation will be still useful for studying the auroral dynamics, because high-sensitivity camera can generally measure horizontal 2D distribution of the aurora at higher temporal resolution than the radars. We demonstrate by numerical simulation how useful monochromatic auroral images taken at multi-point camera network are for the study of aurora dynamics in the EISCAT_3D project. We apply the generalized - aurora computed tomography (G-ACT) to simulated observational data from real instruments, that is, the Auroral Large Imaging System (ALIS) and the EISCAT_3D radar. The G-ACT is a method to reconstruct three dimensional (3D) distribution of auroral emission and ionospheric electron density (corresponding to horizontal 2D distribution of energy spectra of precipitating electrons) from multi-instrument data. It is assumed that a core site of the EISCAT_3D radar is located at Skibotn (69.35N, 20.37E), Norway, and scans an area of 0.8 degrees in geographic latitude and 3 degrees in longitude at 130km altitude with 21x21 beams. Two neighboring discrete arcs are assumed to appear in the observation region of the EISCAT_3D radar. The reconstruction results from the G-ACT are compared with those from the normal ACT as well as those from only the electron density observed by the EISCAT_3D radar. It is found that the G-ACT can interpolate the ionospheric electron density at much higher spatial resolution than the original one observed by the EISCAT_3D radar. Furthermore, the multiple arcs reconstructed by the G-ACT are more precise than those by the normal ACT. Even for the case that the reconstruction by the ACT is difficult due to unsuitable location of the camera sites relative to the discrete arcs and/or a small number of available images, the G-ACT allows us to achieve the reconstruction.

キーワード: オーロラトモグラフィ, EISCAT_3D, シミュレーション, 多点カメラ観測

Keywords: aurora computed tomography, EISCAT_3D, simulation, multi-point camera observation

Naライダー/EISCATレーダー連携観測によって検出したオーロラ起因のNa層変動 Aurora-induced sodium layer variation detected by coordinated observation with sodium lidar and EISCAT radar

津田 卓雄^{1*}; 野澤 悟徳²; 川原 琢也³; 川端 哲也²; 斎藤 徳人⁴; 和田 智之⁴; 小川 泰信¹; 大山 伸一郎²; Hall Chris⁵; 堤 雅基¹; 江尻 省¹; 鈴木 臣²; 高橋 透²; 中村 卓司¹
TSUDA, Takuo^{1*}; NOZAWA, Satonori²; KAWAHARA, Takuya³; KAWABATA, Tetsuya²; SAITO, Norihito⁴; WADA, Satoshi⁴; OGAWA, Yasunobu¹; OYAMA, Shin-ichiro²; HALL, Chris⁵; TSUTSUMI, Masaki¹; EJIRI, Mitsumu K.¹; SUZUKI, Shin²; TAKAHASHI, Toru²; NAKAMURA, Takuji¹

¹ 国立極地研究所, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 信州大学工学部, ⁴ 理化学研究所, ⁵ トロムソ大学
¹National Institute of Polar Research, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ³Faculty of Engineering, Shinshu University, ⁴RIKEN, ⁵University of Tromsø

Sodium atom layer is generally distributed at 80-100 km. One of mysterious subjects on high-latitude sodium layers is relationship between auroral particle precipitation and sodium atom layer variation. A previous study suggested a sodium column density decrease during a geomagnetic active period due to that the particle precipitation accompanied by electron density enhancement could induce ionization of sodium atom through their ion-molecule chemistry. Another study pointed a possibility of sodium density increase. For this reason, it is suggested that auroral precipitating particle bombardment on meteoric smoke particles can sputter sodium atoms from the smoke particles. On the other hand, ionospheric electric field, which may become more significant near auroral precipitating regions, could induce ion motions (i.e. can generate sodium ion convergence and/or divergence), and then also could affect generation and/or loss processes of sodium atoms through their ion-molecule chemistry. Thus, for the examination of the causality, it is vitally important to distinguish the effects of auroral particle precipitation and ionospheric electric field. Using a sodium lidar (which was installed in early 2010) and European incoherent scatter (EISCAT) radar at Tromsø, Norway (69.6N, 19.2E), we have investigated, for the first time, that the actual effect of the particle precipitation to the sodium density variations without electric field injection. In the nighttime observation on 24-25 January 2012, we detected a significant decrease of sodium atom density coincided with electron density enhancements (implying strong particle precipitations) and low ion temperatures (implying no electric field injections). These results strongly suggested that auroral particle precipitations induced sodium atom density decrease. Furthermore we discuss observed time response in the sodium density decrease.

キーワード: Na ライダー, EISCAT レーダー, Na 層, オーロラ降下粒子, 電離圏電場

Keywords: Na lidar, EISCAT radar, Na layer, Auroral particle precipitation, Ionospheric electric field

The spatial and temporal evolution of equatorial plasma bubble observed using ground based GPS TEC measurement. The spatial and temporal evolution of equatorial plasma bubble observed using ground based GPS TEC measurement.

M BUHARI, Suhaila^{1*}; ABDULLAH, Mardina²; HASBI, Alina marie³; OTSUKA, Yuichi⁴; NISHIOKA, Michi⁵; TSUGAWA, Takuya⁵
M BUHARI, Suhaila^{1*}; ABDULLAH, Mardina²; HASBI, Alina marie³; OTSUKA, Yuichi⁴; NISHIOKA, Michi⁵; TSUGAWA, Takuya⁵

¹Physics Department, Universiti Teknologi Malaysia, ²Space Science Centre, Universiti Kebangsaan Malaysia, ³Department of Electrical, Electronics & Systems Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, ⁴Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ⁵National Institute of Information and Communications Technology

¹Physics Department, Universiti Teknologi Malaysia, ²Space Science Centre, Universiti Kebangsaan Malaysia, ³Department of Electrical, Electronics & Systems Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, ⁴Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ⁵National Institute of Information and Communications Technology

The equatorial plasma bubble (EPB) commonly occurs near the equatorial region after post sunset period. The generation process of EPB has been well understood where it is commonly developed near the magnetic equator and elongated along magnetic field lines through Rayleigh-Taylor instability mechanism. However, the source of seeding perturbation leads to the generation of Rayleigh-Taylor instability is still unknown. The temporal and spatial properties of EPB have been well studied using airglow imager. However, the observation using airglow imager is impossible during sunset time where the EPB starts to develop due to light from the sun while the observation during night time is always interfered by moon and clouds.

In this study, we obtain the GPS data from Malaysia Real-Time Kinematics GNSS Network (MyRTKnet), International Ground Station (IGS) network and Sumatera GPS Array (SUGAR) network. The networks contains 127 receivers in South East Asia (SEA) region covers 8°N to -8°S latitude and 92°E to 120°E longitude geographic coordinates. In this study, we detected the structure of EPB using two-dimensional map of rate of TEC index (ROTI) calculated from ground based GPS TEC measurement in. The average ROTI value for all visible satellites at 300 km altitude is binned into 0.45° x 0.45° grid in geographic latitude and longitude. The advantage of this technique is the GPS data is always available and we are able to observe the spatial and temporal properties of EPBs continuously without distracted by light.

On the 17th March 2011, we observed the appearance of EPB structure pass through the SEA territory for 5 hours from 1300 UT (2100 LT) - 1900 UT (0200 LT). The initial ROTI-enhancement region is at 1300 UT is propagating to eastward direction and the information of the structure is lost due to the limited coverage of GPS receiver. At 1340 UT, a new ROTI-enhancement region appeared as a point source at geographic coordinate 2°N and 98°E as shown in Figure (a). After 20 minutes, the point source of ROTI-enhancement region expand to ~600 km in the North and ~200 km South direction as shown in Figure (b) while the zonal size ~50 km remains the same. The perturbation region is expanding faster towards dip magnetic equator might associated with field-aligned irregularities. The structure travelled in eastward direction with velocity ~133 ms⁻¹ until the development process stopped. After 60 minutes, we assumed the structure is fully developed as illustrated in Figure (c) when no development in zonal size and ROTI value is observed anymore. The developed structure has 200 km zonal size continuously moves to eastward directions with slower velocity ~111 ms⁻¹. The slower velocity incidentally with no development in zonal size and ROTI value might indicates the "fossil" bubble where the plasma density is equal with background density and the structure velocity following the background plasma density. At 1440 UT the second structure is coming ~600 km away from the first structure with velocity ~111 ms⁻¹ and zonal size 200 km same as the previous structure as shown in Figure (d). The first and second structure has the same zonal sizes and velocities might due to the same temporal and spatial evolution during the generation process.

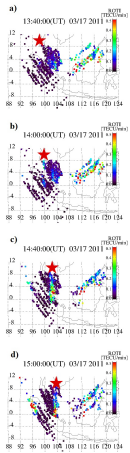
The two-dimensional structure of EPB has been presented using GPS networks in SEA region is an alternative tool to observe the temporal and spatial properties of EPB structure from the initial perturbation until the decaying process without being distracted by light. The temporal and spatial properties of EPB can contribute towards understanding the generation mechanism of the Rayleigh-Taylor instability process.

PEM06-P11

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 30 日 18:15-19:30

キーワード: equatorial plasma bubble, rate of TEC index, GPS TEC measurement
Keywords: equatorial plasma bubble, rate of TEC index, GPS TEC measurement



Relationship between Latitudinal Extension of Scintillation and Pre-reversal Enhancement in the Southeast Asian Region

Relationship between Latitudinal Extension of Scintillation and Pre-reversal Enhancement in the Southeast Asian Region

Abadi Prayitno^{1*}; 大塚 雄一²; Husin Asnawi¹; Jiyo Jiyo¹; 山本 衛³; 津田 敏隆³

ABADI, Prayitno^{1*}; OTSUKA, Yuichi²; HUSIN, Asnawi¹; JIYO, Jiyo¹; YAMAMOTO, Mamoru³; TSUDA, Toshitaka³

¹ インドネシア航空宇宙庁, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 京都大学生存圏研究所

¹National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN), ²STEL, Ngoya University, ³RISH, Kyoto University

We have investigated the relationship between the maximum latitude extension of observed scintillations (L_{max}) and the maximum altitude of the equatorial F-region bottomside ($h'F_{max}$), peak of eastward electric field (E_{max}), and time duration of eastward electric field (TE) during PRE period in the equatorial region. We used three GPS receivers installed in Kototabang (0.2S, 100.3E; 10.0N magnetic latitude), Pontianak (0.02S, 109.3E; 8.9S magnetic latitude), and Bandung (6.9S, 107.6E; 17.5S magnetic latitude), Indonesia for observing scintillation activity in period 18.00-22.00 LT (LT=UT+7h) and two frequency modulated-continues wave (FM-CW) ionosondes installed near equator magnetic, Chumphon (10.7N, 99.4E; 3.3N magnetic latitude), Thailand and Bac Lieu (9.3N, 105.7E; 1.7N magnetic latitude), Vietnam for measuring PRE parameters, such as $h'F$, vertical drift ($dh'F/dt$) which indicates eastward electric field, and TE. Our observation period is during equinox months (March, April, September, and October) in 2010, 2011, and 2012. We divide the relationships into two groups; 1) the relationships between PRE parameters obtained from Chumphon ionosonde and L_{max} observed by Kototabang and Bandung GPS receivers and 2) PRE parameters obtained from Bac Lieu ionosonde and L_{max} observed by Pontianak and Bandung GPS receivers. The following table is to show the coefficient correlation (R) of the relationships for each group. The results indicate that duration of eastward electric field does not play an important role for extension of the plasma bubble or latitudinal extension of scintillation, and that the peak of $h'F$ and magnitude of E at the initial phase of plasma bubble generation (PRE period) is a primary factor for the plasma bubble extension. Therefore, the maximum latitude of scintillation is determined at the initial phase of plasma bubble generation (PRE period) in the equatorial region.

Relationship R (group 1) R (group 2)

$h'F_{max}$ vs L_{max} 0.596 0.471

E_{max} vs L_{max} 0.489 0.270

TE vs L_{max} 0.054 0.090

Keywords: Ionosphere, Scintillation, Pre-reversal enhancement

0.1-40kHz 帯電磁波観測に基づいた海洋大陸における落雷の位置推定 Geolocation of lightning discharge in the Maritime Continent based on radio observation in 0.1-40 kHz band

山下 幸三^{1*}; 大矢 浩代²; 高橋 幸弘³; 土屋 史紀⁴; 松本 淳⁵

YAMASHITA, Kozo^{1*}; OHYA, Hiroyo²; TAKAHASHI, Yukihiro³; TSUCHIYA, Fuminori⁴; MATSUMOTO, Jun⁵

¹ サレジオ工業高等専門学校, ² 千葉大学, ³ 北海道大学, ⁴ 東北大学, ⁵ 首都大学東京

¹Salesian Polytechnic, ²Chiba University, ³Hokkaido University, ⁴Tohoku University, ⁵Tokyo Metropolitan University

Recent researches based on observation and data assimilation of lightning discharge indicate a possibility of now-cast and forecast of severe weather such as torrential rain. In these works, lightning data is focused on as a proxy for the presence or absence of deep convection which generates thunderstorm.

In previous works, occurrence of cloud-to-ground (CG) lightning discharges has been mainly used due to the ease of data availability. However, lightning observation based on electromagnetic measurement shows that there is extremely huge scale lightning whose scale is more than hundreds times bigger than that of averaged event. Lightning data including " occurrence " and " scale " enable us to evaluate not only existence but also intensity of atmospheric convection. Quantitative evaluation of atmospheric convection would make it possible to make a now-cast and forecast for intensity distribution of precipitation.

The Maritime Continent (MC) is one of the most important regions for lightning observation in the world. Thunderstorm activity causes enormous human and economic damage to countries in MC. However, until now, only few statistical studies on the lightning activity with scale information of lightning discharge have been done.

In this works, lightning observation network in the MC based on electromagnetic measurement in 0.1-40 kHz band is summarized. This network is developed to estimate not only spatial distribution but also scale one of lightning discharges. We have already constructed observation stations at Tainan in Taiwan (23.1N, 121.1E), Saraburi in Thailand (14.5N, 101.0E), Pontianak in Indonesia (0.0N, 109.4E), Los Banos in Philippines (14.2N, 121.25E) and Son Tay in Viet Nam (21.1N, 105.5E). Data obtained by multipoint observation is synchronized by GPS receiver installed at each station.

At the presentation, we show evaluation of accuracy for geolocation and detection efficiency of signal radiated from lightning discharge based on comparisons with World Wide Lightning Location Network (WWLLN) data.

Keywords: lightning discharge, thunderstorm, severe weather, VLF, the Maritime Continent

衛星電波の大気伝搬特性を利用した小型低軌道衛星ミッションに関する研究 A study on a low Earth orbit (LEO) satellite mission using radio propagation characteristics

竹田 悠二^{1*}; 津田 敏隆¹
TAKEDA, Yuji^{1*}; TSUDA, Toshitaka¹

¹ 京都大学生存圏研究所

¹ Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

本研究では、LバンドとKaバンドの電波による大気伝搬特性を利用した、新たな小型低軌道(LEO: Low Earth orbit)衛星ミッションの検討を行う。特に、GPS電波掩蔽法を用いることにより気温・水蒸気・電子密度等の高度プロファイルをラジオゾンデと同程度の高い分解能で観測することを考える。またKaバンドを利用によって、雲の含水量、及び水蒸気量を測定する放射計計測についても検討を行う。

GPS電波掩蔽法では、受信機を搭載したLEO衛星から見て電波の発信源となる衛星が、地球によって掩蔽される際、地球大気を掠めて伝播してくる電波をLEO衛星で受信する。この時、伝播経路の屈折による遅延が起こるが時間とともに衛星同士の幾何学的配置が変化し、電波が通過する大気層の厚さが変わるにしたがい、遅延量が変化する。この遅延量を正確に測ることにより大気情報を測定する。しかし、従来はGPS衛星のみが、電波掩蔽観測に用いられてきたが、GPS衛星のみではなく他のGNSS(GLONASS、Galileo、北斗、QZSS)および通信衛星であるO3bをこの電波掩蔽観測に用いることにより掩蔽観測によるデータ取得の空間密度、および時間密度の増加を図る。

本研究でLEO衛星による大気観測手法の提案をおこなうにあたりGNSSによる掩蔽観測のデータ分布について検討する。このデータ分布は、LEO衛星、各GNSS衛星の相対的な位置によって決まるので、時間的にも空間的にも非常に広範囲に及ぶ。よって効率の良いミッションを提案するために、数値モデルによってデータ分布を調査し、LEO衛星の軌道決定、アンテナ設計等を行った。数値モデルによると、GPSのみを使った電波掩蔽に比べ、他のGNSSおよびO3b衛星を電波掩蔽観測に用いれば、データ数は約3倍になり、非常に有用であることがわかった。経度に対するデータ分布は、LEO衛星の軌道に影響を受けず一様になるのに対し、緯度に対するデータ分布はLEO衛星の軌道傾斜角に影響を受けることがわかった。ローカルタイムに対するデータ分布は、LEO衛星の軌道傾斜角および昇交点赤経によって決められることも示した。

また本研究ではKaバンドの電波を用いるO3b衛星を利用するのだが、KaバンドはLバンドの約10倍周波数が高い。GPS電波掩蔽では、Lバンドの電離層における遅延により、温度を測定することが出来る高度限界は約50kmとなっているが、周波数が高いほど電離層での影響を受けにくいいためKaバンドによる電波掩蔽では高度限界の上昇が期待できる。さらに、電波が大気中を伝搬す際、その経路上で酸素や水蒸気、雲によって電界強度が減衰するのだがO3bで用いられるKaバンドのダウンリンク付近では水蒸気および雲による減衰はLバンドと違い大きく、酸素による減衰ではなく水蒸気、雲による減衰が支配的になる。よって、LEO衛星によってO3bの電波を受信する際、ダウンリンク内の異なる周波数の電波の、雲と水蒸気の減衰によって生じる信号強度の差の測定から雲の含水量、および水蒸気量を求めることが期待できる。

キーワード: GPS電波掩蔽, 小型低軌道衛星, 全地球航法衛星システム, Kaバンド

Keywords: GPS radio occultation, Low Earth orbit satellite, Global Navigation Satellite System, Ka-band

Introduction to GLIMS mission Introduction to GLIMS mission

牛尾 知雄^{1*}; 佐藤 光輝²; 森本 健志³; 鈴木 睦⁴; 山崎 敦⁴; 芳原 容英⁵; 菊池 雅行⁶

USHIO, Tomoo^{1*}; SATO, Mitsuteru²; MORIMOTO, Takeshi³; SUZUKI, Makoto⁴; YAMAZAKI, Atsushi⁴; HOBARA, Yasuhide⁵; KIKKUCHI, Masayuki⁶

¹ 大阪大学, ² 北海道大学, ³ 近畿大学, ⁴ 宇宙航空研究開発機構, ⁵ 電気通信大学, ⁶ 極地研究所

¹Osaka University, ²Hokkaido University, ³Kinki University, ⁴JAXA, ⁵University of Electro Communications, ⁶NIPR

The Global Lightning and sprItE MeasurementS (GLIMS) on the International Space Station (ISS) is a mission to detect and locate optical transient luminous events (TLEs) and its associated lightning simultaneously from the non-sun synchronous orbit, and was launched successfully in July, 2013 as part of the multi-mission consolidated equipment on Japanese Exposure Module (JEM). Our mission goals are to identify temporal and spatial evolutions of lightning and TLEs and to clarify the occurrence conditions of TLEs and global occurrence locations and rates of TLEs from the nadir observation. To achieve these goals, two CMOS cameras, six Photometers, VLF receiver, and VHF interferometer with two antennas, are installed at the bottom of the module to observe the TLEs as well as causative lightning discharges at nadir direction during day and night time. Though the luminous events so-called sprite, elves and jets have been investigated by numerous researchers all over the world based mainly on the ground observations, some important problems have not been fully understood yet such as generation mechanisms of columniform fine structure and horizontal offset of some sprites from the parent lightning discharges. In the JEM-GLIMS mission, observations from our synchronized sensors are going to shed light on above-mentioned unsolved problems regarding TLEs as well as causative lightning discharges.

The optical instruments are two CMOS cameras (LSI-1, LSI-2) and six-channel spectrophotometers (PH1 - PH6). The FOV of LSI is 28.3 deg. x 28.3 deg., and LSI-1 (LSI-2) equips a 766-832 nm wide band filter (a 762 \pm 7 nm narrow band filter). Each PH channel equips the optical band-pass filter, and these photometers measure the N2 1P, N2 2P, N2 LBH, and N2+ 1N emissions of lightning and TLEs. The radio receivers consist of one VLF receiver (VLFR) and two sets of VHF receivers (VITF). In order to detect TLE-associated whistler waves, VLFR employs a nadir-directing monopole antenna and an electronics unit recording waveform data with a sampling frequency of 100 kHz with 14-bit resolution. VITF consists of two patch-type antennas separated by 1.5 m and an electronics unit, and VITF mainly observes VHF pulses in the frequency range of 70-100 MHz excited by lightning discharges with a sampling frequency of 200 MHz with 8-bit resolution.

JEM-GIMS was successfully launched and transported to the ISS by the H-II Transfer Vehicle (HTV) No.3 cargo transporter at the end of July 2012, and started its operation from December 2013. So far, more than one thousand events were recorded. In this presentation, mission history and overview will be given as an introduction.

キーワード: 雷放電, スプライト, 宇宙ステーション

Keywords: Lightning, Sprite, ISS

宇宙からの多波長光学観測による雷放電特性の推定 Estimating lightning characteristics by spaceborne spectrophotometric observation

足立 透^{1*}; 佐藤 光輝²; 牛尾 知雄³; 山崎 敦⁴; 鈴木 睦⁴; 菊池 雅行⁵; 高橋 幸弘²; Inan Umran⁶; Linscott Ivan⁶; 芳原 容英⁸; Cohen Morris⁶; Lu Gaopeng⁹; Cummer Steven⁹; Hsu Rue-Ron¹⁰; Chen Alfred¹⁰; Frey Harald⁷
ADACHI, Toru^{1*}; SATO, Mitsuteru²; USHIO, Tomoo³; YAMAZAKI, Atsushi⁴; SUZUKI, Makoto⁴; KIKUCHI, Masayuki⁵
; TAKAHASHI, Yukihiko²; INAN, Umran⁶; LINSOTT, Ivan⁶; HOBARA, Yasuhide⁸; COHEN, Morris⁶; LU, Gaopeng⁹
; CUMMER, Steven⁹; HSU, Rue-ron¹⁰; CHEN, Alfred¹⁰; FREY, Harald⁷

¹ 早稲田大学高等研究所, ² 北海道大学理学研究院, ³ 大阪大学工学研究科, ⁴ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁵ 国立極地研究所, ⁶ スタンフォード大学電気工学科, ⁷ 電気通信大学情報理工学部, ⁸ デューク大学電気コンピュータ工学科, ⁹ 国立成功大学物理学科, ¹⁰ カリフォルニア大学バークレー校宇宙科学研究所

¹Waseda Institute for Advanced Study, Waseda University, ²Department of CosmoSciences, Hokkaido University, ³Division of Electrical, Electric and Information Engineering, Osaka University, ⁴ISAS, JAXA, ⁵NIPR, ⁶Electrical Engineering Department, Stanford University, ⁷Department of Electronic Engineering, The University of Electro-Communications, ⁸Electrical and Computer Engineering Department, Duke University, ⁹Physics Department, National Cheng Kung University, ¹⁰SSL, University of California at Berkeley

The present study analyzes satellite optical data to evaluate the effectiveness of spaceborne spectrophotometric measurement in characterizing properties of lightning flash. The main data analyzed here are those obtained by FORMOSAT-2/ISUAL limb observation and ISS/GLIMS nadir observation. While ISUAL spectrophotometer observes optical emissions of 150-280, 316, 337, 392, 762, 600-900 nm at a sampling rate of 10 kHz, GLIMS observes emissions of 150-280, 337, 762, 600-900, 316, 392 nm at a rate of 20 kHz. These data for the first time derive fine spectral and temporal properties of lightning emission observed from space. By analyzing the ISUAL optical data and ground-based radio data, we found that spectral intensity ratio is a new parameter to discriminate intra-cloud (IC) and cloud-to-ground (CG) lightning discharges: the blue/red intensity ratio of CG strokes tends to be lower than that of IC pulses. We also found similar tendency in GLIMS lightning events. A case study showed that the color of lightning turned to red when a very bright impulsive emission, which is consistent with a ground return stroke, occurred. These results consistently suggest that the color of CG component is redder than that of IC component, and we explain this as a result of the Rayleigh scattering which effectively attenuates blue light emissions in the case of light sources located at lower-altitudes such as CGs. Using this technique, we will further examine the lightning characteristics on a global level, focusing on latitudinal dependences and land/ocean contrast for example.

Keywords: lightning, CG, IC, satellite, remote sensing

JEM-GLIMS 搭載の LSI カメラにより撮像されたスプライトの空間分布 Horizontal Distributions of Sprites Measured by Lightning and Sprite Imager Onboard JEM-GLIMS

三原 正大^{1*}; 佐藤 光輝¹; 足立 透²; 高橋 幸弘¹; 牛尾 知雄³; 森本 健志⁴; 鈴木 睦⁵; 山崎 敦⁵
MASAHIRO, Mihara^{1*}; SATO, Mitsuteru¹; ADACHI, Toru²; TAKAHASHI, Yukihiro¹; USHIO, Tomoo³; MORIMOTO,
Takeshi⁴; SUZUKI, Makoto⁵; YAMAZAKI, Atsushi⁵

¹ 北海道大学 大学院理学研究院, ² 早稲田大学高等研究所, ³ 大阪大学大学院工学研究科情報通信工学部門, ⁴ 近畿大学理工学部, ⁵ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

¹Department of Cosmospacescience, Hokkaido University, ²Waseda Institute for Advanced Study, Waseda University, ³Information and communication engineering department, Osaka University, ⁴Faculty of Science and Engineering, Kinki University, ⁵Institute for Space and Astronautical Sciences, Japan Aerospace Exploration Agency

Sprite is a transient discharge phenomenon occurring in the mesosphere and lower thermosphere and is mainly excited by positive cloud-to-ground (CG) discharge. Various studies of the sprite occurrences have been performed by numerical simulations and optical observations from ground and airplanes. However, the physical mechanism determining the horizontal distribution of sprite is not clear so far. Recent studies suggested that an activity of the in-cloud discharges preceding a return stroke of a CG discharge would have a severe impact on the determination of the horizontal distribution of sprites. In order to clarify this, it is essential to carry out nadir observations of lightning discharges and sprites from the space.

JEM-GLIMS is a space mission to carry out nadir observation of lightning discharges and sprites from International Space Station (ISS) and started continuous observations from November 20, 2012. In this mission, lightning and sprite emissions can be measured by Lightning and Sprite Imager (LSI), which consists of two CMOS cameras and captures images at a difference wavelength. A wide-band camera named LSI-1 is equipped with an optical filter whose pass-band ranges from 740-830 nm and observes mainly lightning emission, while a narrow-band camera named LSI-2 is equipped with an optical filter whose central wavelength of 762 nm with 10 nm FWHM and observes mainly sprite emission since the lightning emission at 762 nm would be severely absorbed by oxygen molecules in the atmosphere. A spatial resolution of LSI is about 300 m/pix at the 70 km altitude. Then, it is possible to detect the emissions of a columniform sprite whose horizontal scale is a few km typically. In JEM-GLIMS mission, there are also six-channel spectral photometers (PH). One of these PH channels measures UV emission at 150-280 nm, which becomes a good proxy of the sprite occurrence since the UV emission of lightning discharges would be severely absorbed. We have chosen 76 events of transient optical emission captured by LSI and PH. For the purpose to distinguish weak sprite emission from strong lightning emission, we have developed an image subtraction method using LSI-1 and LSI-2 image data. Using this method, we have analyzed 76 events and succeed in detecting sprite emission and clarifying the horizontal distribution of sprites. At the presentation, we will show the characteristics of the horizontal distribution of sprites and their parent lightning discharges more in detail.

キーワード: スプライト

Keywords: sprite, JEM-GLIMS

JEM-GLIMS 光学機器で観測されたスプライト・エルブスの特徴 Characteristics of Sprites and Elves Measured by JEM-GLIMS Optical Instruments

佐藤 光輝^{1*}; 足立 透²; 三原 正大¹; 小林 縫¹; 牛尾 知雄³; 森本 健志⁴; 高橋 幸弘¹; 鈴木 睦⁵; 山崎 敦⁵
SATO, Mitsuteru^{1*}; ADACHI, Toru²; MASAHIRO, Mihara¹; KOBAYASHI, Nui¹; USHIO, Tomoo³; MORIMOTO, Takeshi⁴
; TAKAHASHI, Yukihiko¹; SUZUKI, Makoto⁵; YAMAZAKI, Atsushi⁵

¹ 北海道大学・理, ² 早稲田大学高等研究所, ³ 大阪大学・工, ⁴ 近畿大学・理工, ⁵ 宇宙科学研究所

¹Department of CosmoSciences, Hokkaido University, ²WIAS, Waseda University, ³Graduate School of Engineering, Osaka University, ⁴Faculty of Science and Engineering, Kinki University, ⁵ISAS/JAXA

JEM-GLIMS is a space mission to observe lightning and lightning-associated Transient Luminous Events (TLEs) from the International Space Station (ISS). The main goal of this mission is to identify the spatiotemporal relationship between TLEs and their parent lightning discharges based on the nadir optical and electromagnetic observations of JEM-GLIMS. For this purpose JEM-GLIMS equips two sets of optical instruments (LSI: CMOS camera, and PH: spectrophotometers) and two sets of radio wave receivers (VLFR: VLF receiver, and VITF: VHF interferometer). As all these instruments are installed at the bottom plane of the bus module facing to the Earth, JEM-GLIMS can carry out the nadir observations continuously. JEM-GLIMS was launched by HTV3 and was successfully installed at the exposed facility of the Japanese Experiment Module (JEM) on August 9, 2012. After the initial checkout operations, JEM-GLIMS finally started continuous observations on November 20, 2012. In the period from November 20, 2012 to January 31, 2014, totally 3,130 transient optical events related to lightning flashes and/or TLE emissions were detected by the optical instruments. In 1,062 of these events, both LSI and PH detected clear transient optical signals well above the noise level. In order to derive sprite events from the detected transient optical events, we analyzed PH light-curve data and estimated the intensity ratio between PH channels. We also analyzed LSI image data to clarify the morphological properties of the optical emission. In a transient optical event detected at 19:50:40.306 UT on September 28, 2013, the intensity ratio between PH2 (337 nm) and PH4 (600-900 nm) and between PH6 (392 nm) and PH4 were estimated to be 26 and 25, respectively. This fact implies that the light sources exist not only in the troposphere but also in the mesosphere. At the image data obtained by the narrow-band filter camera (LSI-2), transient optical emission whose shape differs from the lightning emission was confirmed. Thus, we attributed the transient optical emission in LSI-2 image to sprite streamers. At the presentation, we will show the results derived from LSI and PH data analysis and the charge moment change (CMC) of the parent lightning discharges derived from ELF magnetic field waveform data and will discuss the spatial and temporal characteristics of sprites more in detail.

キーワード: スプライト, 雷放電, 国際宇宙ステーション
Keywords: Sprite, Lightning, International Space Station

冬季スプライトと親対地雷の発生位置の差異について Displacement between Winter Sprites and Parent Cloud-to-Ground Lightning

鈴木 裕子^{1*}; 鈴木 智幸¹; 鴨川 仁¹
SUZUKI, Yuko^{1*}; SUZUKI, Tomoyuki¹; KAMOGAWA, Masashi¹

¹ 東京学芸大学教育学部物理学科

¹Dpt. of Phys., Tokyo Gakugei Univ

A various investigation of sprites, one of frequent observable transient luminous events (TLEs), has been reported. Sprites are induced from mesosphere to lower ionosphere by a strong electric field attributed to the neutralization of a large amount of positive charges at the upper part of thunderstorm when cloud-to-ground (CG) lightning occurs. Many papers have implied that the complex physics of sprite-induced CG lightning, namely parent CG lightning, causes various morphologies and lifetime of sprites and the time delay of sprite occurrence, which have been some of unsolved issues in the TLEs studies. In addition, the major issue might be the large horizontal displacement between the center of sprites and the observed parent CG lightning, which often reaches 50 km. On the other hand, sprites occur just above the luminous center of parent CG lightning from satellite observations. It is expected that the luminous center of parent CG lightning over the thunderstorm is equivalent to the horizontal position of positive charges at the upper part of thunderstorm. Few study, however, discusses the horizontal discrepancies among the center of sprites, the luminous center of parent CG lightning over the thunderstorm, and the observed strike point of the parent CG lightning. Thus, we investigate the discrepancies among them through an optical measurement, assuming that the position of positive charges at the upper part of thunderstorm is the luminous center of parent CG lightning over the thunderstorm.

We conducted sprite observation campaign from December, 2012 to February, 2013. Low light CCD cameras were deployed at Tokyo and Shizuoka prefecture to observe the sprites above the Sea of Japan near the west coast of Japan. During the campaign, more than 50 events were captured. We analyzed the horizontal difference between sprite and lightning flash from CCD cameras records. Parent thunderstorm and CG positions are investigated by radar echo and several lightning location system, respectively. In particular, six sprite events were observed simultaneously in Tokyo and Shizuoka, which gave the location of sprites. From the observations, we found that the most of lightning flash center was located under the center of sprites but the reported CG location differed from them. In the presentation, we propose a plausible model to explain such discrepancy.

Keywords: Sprite, Lightning, TLEs

航空機観測に基づくスプライトストリーマの三次元空間分布及び立体構造
Spatial and Temporal Evolution of Sprite Streamers Derived from High-Speed Camera
Data in Aircraft Observation Campaign

小林 縫^{1*}
KOBAYASHI, Nui^{1*}

¹ 北海道大学理学院宇宙理学専攻

¹Dept. of CosmoSciences, Hokkaido Univ.

the discovery of sprites. Though the detailed three-dimensional spatial structures and the temporal evolution of sprite streamers are the key parameters to clarify the occurrence conditions, these spatiotemporal characteristics are not clearly identified. In order to specify the detailed spatial and temporal evolution of sprite streamers, we have conducted the optical observation campaign using high-speed cameras from two jet aircrafts in summer US. In this campaign, we succeeded to capture sprite images for 28 events by the high-speed cameras with a sampling rate over 8,000 fps at each aircraft simultaneously. Using these image data, we have performed triangulation analysis to estimate the horizontal spatial distribution and vertical extent of sprite streamers. We have analyzed two types of columniform sprites; one is the columniform sprite with a preceding dense inhomogeneous halo, and the other is the columniform sprite with a preceding dim halo or without a halo. In the later case (dim halo plus columns), the following results are identified. (1) The longer the distance between sprite columns and the parent CG becomes, the higher the bottom altitude of columns becomes. (2) The longer the distance between sprite columns and the parent CG becomes, the slower the speed of downward streamer tips becomes. These results are first clear observational evident showing the horizontal spatial gradient of the quasi-electrostatic field produced by the parent CG discharge. At the presentation, we will show the electrical characteristics of the parent CG discharges derived from CMC waveforms and will discuss the possible mechanisms determining such spatial dependences.

2013年富士山山頂で観測された雷雲に関連する高エネルギー放射線 High-energy radiation and atmospheric electric field that are observed at Mt. Fuji

齋藤 将監^{1*}; 庄司 智美¹; 鴨川 仁¹; 鳥居 建男²
SAITO, Shogen^{1*}; SHOJI, Tomomi¹; KAMOGAWA, Masashi¹; TORII, Tatsuo²

¹ 東京学芸大学物理学科, ² 日本原子力研究開発機構

¹Dpt. of Phys., Tokyo Gakugei Univ., ²Japan Atomic Energy Agency

雷活動を起因とする放射線は「Relativistic Runaway Electron Avalanche (RREA) 仮説」が発生機構であると考えられている。RREA 仮説では、高エネルギー宇宙線が大気に衝突することにより、2次生成物を生じる。その2次生成物が高電場中で制動放射や対消滅をすることで、雪崩的にガンマ線が発生するという一連の過程である。本研究では、富士山で計測したガンマ線と大気電場の結果を用いながら RREA 仮説の検証を行う。

キーワード: 雷雲, ガンマ線, 富士山

Keywords: Thunderstorm, Gamma ray, Mt. Fuji

落雷規模と雷雨活動の関係 Relationship between lightning magnitudes and thunderstorm activity

工藤 剛史¹; 高橋 幸弘^{1*}; 佐藤 光輝¹; 長 康平²
KUDO, Takeshi¹; TAKAHASHI, Yukihiro^{1*}; SATO, Mitsuteru¹; OSA, Kohei²

¹ 北海道大学大学院理学院, ² ウェザーニューズ
¹Graduate school of Science, Hokkaido University, ²Weathernews Inc.

Previous studies have suggested that there is correlation between occurrence frequency of lightning and meteorological parameters, such as precipitation, radar reflectivity, and updraft of thunderstorms. However, previous studies used only the information of lightning occurrence frequency, nevertheless each lightning has a different electrical properties, such as charge moment change (CMC). CMC is a physical quantity which neutralized charge amount of lightning discharge times vertical discharge length. The negative cloud-to-ground lightning discharge (-CG) account for 90 % or more of CGs expect in winter in Japan. The CMC of most of the -CG is smaller than 100 C·km. In order to estimate the smaller CMC than 100 C·km, observation of the radiowaves in Very Low Frequency (VLF) range radiated by return stroke is required. In addition, in order to link short-term meteorological forecast and the lightning data in the future, the method of estimation of CMC in a short time with high detection efficiency is important. However, by the current lightning detection systems, which use radiowaves at a higher frequency over 100 kHz, only the peak current of stroke is estimated and the CMC cannot be derived. The purpose of this study is to establish the methods of analysis to estimate small CMC of -CG and to investigate the relationship between developing process of thunderstorm and lightning activity with information of magnitudes (CMC) of each lightning stroke. A continuous monitoring of VLF waveform in frequency range of 2 kHz — 35 kHz at three stations in Kanto region located in the range of 150 km from Tokyo, Japan, has been carried out since May 15, 2013.

The methodology to estimate peak current using waveform in VLF band, which is detectable at far distance than that in LF band was established. A new method of estimation of impulsive CMC (iCMC) with a duration of 1 ms or less without use of frequency analysis nor VLF propagation model was established. The iCMC is estimated using the duration time of electric field of groundwave identified from the VLF waveform and peak current. The detection efficiency (DE) of iCMC estimation of -CG in this study is about 72 %. The DE of VLF lightning observation system for estimation of iCMC is the highest level in the world. The relationship between iCMC and the peak current estimated from VLF data was examined. It is shown that correlation between iCMC over 20 C·km and the peak current is small ($R^2 = 0.21$), and correlation between iCMC less than 20 C·km and the peak current is high ($R^2 = 0.69$). These results suggest that iCMC cannot be estimated from the peak current for the event over 20 C·km.

Using the estimated iCMC, the relationship among a time variation of rain volume, the area size of radar echo height (nearly cloud top) more than 12 km and lightning parameters for the 3 cases was examined. The rain volume and the area size of echo height more than 12 km were calculated using the Japan Meteorological Agency (JMA) C-band radar data every 10 minutes. It is found that the absolute value of iCMC of -CG increases as occurrence frequency of -CG, the area size of the radar echo height more than 12 km and rain volume increase (i.e., with the development of thunderstorm) for the first time. It is shown that occurrence frequency of -CG shows temporal decrease in advance of the occurrence of downburst on the ground by ~15 minutes, while the area size of radar echo height more than 12 km is continuously increasing for the first time in Japan. In addition, it is shown that -CG with iCMC smaller than 5 C·km in absolute value is dominant in the occurrence time period of the downburst. Comparing the distribution of the estimated lightning magnitudes with meteorological radar data, examples of the electrical properties of CG change according to the developing process of thunderstorm in some cases were suggested for the first time.

Keywords: lightning, charge moment change

AVON および日本の VLF/LF データを用いた雷 EMP に関連した D 領域電離圏変動 Variations in the D-region ionosphere associated with lightning EMP using AVON and VLF/LF data in Japan

大矢 浩代^{1*}; 土屋 史紀²; 山下 幸三³; 高橋 幸弘⁴; 塩川 和夫⁵; 三好 由純⁵
OHYA, Hiroyo^{1*}; TSUCHIYA, Fuminori²; YAMASHITA, Kozo³; TAKAHASHI, Yukihiko⁴; SHIOKAWA, Kazuo⁵; MIYOSHI,
Yoshizumi⁵

¹ 千葉大学大学院工学研究科, ² 東北大学, ³ サレジオ工業高等専門学校, ⁴ 北海道大学, ⁵ 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹Graduate School of Engineering, Chiba University, ²Tohoku University, ³Salesian Polytechnic, ⁴Hokkaido University, ⁵Solar-
Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

It is known that the electromagnetic pulse (EMP) originated from cloud-to-ground and inter-cloud lightning discharges can couple directly into the D-region ionosphere. The conductivity in the D-region changes due to the EMP. When VLF/LF waves propagate under the disturbed D-region, the amplitude and phase or the reflection height of the VLF/LF waves varies largely. For example, 'early VLF events' show large variations in amplitude and phase and are caused by the coupling between the D-region and lightning. Early/fast events, early/slow events, and long recovery events are included in the term of 'early VLF events'. The descent (rise) of VLF/LF reflection height corresponds to increase (decrease) in electron density in the D-region. We have conducted Asia VLF observation network (AVON) in South-East Asia: Taiwan, Thailand, Indonesia, Philippines, and Vietnam since 2007. The observations consist of 5 stations in Taiwan, Thailand, Indonesia, Philippines, and Vietnam. The aim of the AVON is to monitor the lower ionosphere and lightning in South-East Asia. We observe North-South and East-West wideband magnetic components with loop antennas, a vertical broadband electric component with a dipole antenna, and amplitude and phase of narrowband LF transmitter signals with a monopole antenna. We investigate the VLF/LF perturbations associated with the lightning discharges using both the AVON data and the VLF/LF data observed in Japan. In the presentation, we show the results of coupling between the D-region and lightning using AVON data.

1-100Hz 帯磁場観測と 0.1-40kHz 帯電磁界観測に基づいた落雷活動の監視 Monitoring of lightning activity in the Maritime Continent based on radio observation in 1-100 Hz band and 0.1-40 kHz ba

山下 幸三^{1*}; 大矢 浩代²; 高橋 幸弘³; 土屋 史紀⁴; 佐藤 光輝³
YAMASHITA, Kozo^{1*}; OHYA, Hiroyo²; TAKAHASHI, Yukihiro³; TSUCHIYA, Fuminori⁴; SATO, Mitsuteru³

¹ サレジオ工業高等専門学校, ² 千葉大学, ³ 北海道大学, ⁴ 東北大学
¹S, ²Chiba University, ³Hokkaido University, ⁴Tohoku University

Based on measurement of electromagnetic wave radiated from lightning discharge, we can estimate location and electrical properties of each event. In the recent studies, lightning data is focused on as an effective proxy for the monitoring of thunderstorm that causes severe weather. In the previous works, occurrence of lightning discharge has been mainly used. However, recent observation indicates that there is huge lightning whose scale is more than hundreds times bigger than that of averaged one. Lightning data including " occurrence " and " scale " makes it possible to monitor thunderstorm activity quantitatively.

In this works, lightning observation network in the MC based on electromagnetic measurement in ELF and VLF band is summarized. This network is developed to estimate not only spatial distribution but also scale one of lightning discharges. We have already installed receivers in 0.1-40 kHz band at Tainan in Taiwan (23.1N, 121.1E), Saraburi in Thailand (14.5N, 101.0E), Pontianak in Indonesia (0.0N, 109.4E), Los Banos in Philippines (14.2N, 121.25E) and Son Tay in Viet Nam (21.1N, 105.5E). For ELF observation, receiver in 1-100 Hz is installed in Onagawa, Japan (38.4N, 141.5E). Data obtained by multipoint observation is synchronized by GPS receiver installed at each station.

At the presentation, we will show the initial result to derive scale distribution of based on the measurement of ELF and VLF sferics.

キーワード: 雷, ELF, VLF, the Maritime Continent, charge moment
Keywords: lightning, ELF, VLF, the Maritime Continent, charge moment

ELF 波動観測に基づく雷放電電流の計測 Lightning Discharge Current Derived from ELF Magnetic Field Waveform Data

佐藤 光輝^{1*}; 土屋 史紀²; 鶴島 大樹²; 本間 規泰³; 高橋 幸弘¹
SATO, Mitsuteru^{1*}; TSUCHIYA, Fuminori²; TSURUSHIMA, Daiki²; HONMA, Noriyasu³; TAKAHASHI, Yukihiro¹

¹ 北海道大学, ² 東北大学, ³ 東北電力

¹Hokkaido University, ²Tohoku University, ³Tohoku Electric Power Co., Inc.

Cloud-to-ground (CG) discharge is one of the types of lightning discharges and has strong peak current and exponential decay current typically. Since it is not easy to predict exact occurrence time and location of CG discharges, the direct measurement of CG discharge current is difficult. It is well known that CG discharges sometimes hit tall towers locating in big cities. Thus, the CG discharge current can be measured by using Rogowski coil, which can sense the induction magnetic field produced by the discharge current flowing at the tower structures. However, such Rogowski coil is generally huge, and the measurement system is expensive. In addition to this, it is not possible to measure the current of CG discharges that occur arbitrary time and location though it is possible to measure the current only for the CG discharges that hit the tower equipping the Rogowski coil. Lightning discharges can emit strong electromagnetic waves in the ELF and VLF range. Especially, the wavelength and attenuation rate of ELF waves in the frequency range of 1-100 Hz is extremely long and low, respectively. So, it is possible to monitor global lightning activities even from a single observation site. From this reason, we have installed ELF observation systems recording 1-100 Hz magnetic field waveform data continuously at four observation sites in the world. Using these ELF data, we can detect the transient Schumann Resonance waveforms excited by intense CG discharges, and we can also estimate occurrence time, location, and polarity of these CG discharges in a global scale. In order to examine the ELF waveforms when the CG discharge current was measured, we have compared ELF data obtained at Onagawa observatory with the CG current waveform data measured by a Rogowski coil installed at a tall tower at Mt. Ogami in Japan. We have analyzed the ELF and CG current data obtained in the winter season of 2009. Then, it is newly found that the ELF waveforms are quite comparable to the waveforms of CG discharge current. Since the distance between two observation sites are about 300 km, the ELF waveform measured at Onagawa is supposed to be the induction magnetic field perturbation directly induced by the CG discharge current. Though the absolute values between ELF magnetic field perturbations and the discharge currents are not yet evaluated, this new finding implies that the ELF measurement near thunderstorm must provide a powerful tool to measure discharge current easily and to estimate total charge for arbitrary CG discharges. At the presentation, we will show the results derived from the comparison of the waveforms between ELF magnetic field perturbations and CG discharge currents more in detail, and will discuss the future observation and analysis plans.

キーワード: 雷, 放電電流, ELF 波動

Keywords: lightning, discharge current, ELF wave

国際宇宙ステーション搭載 GLIMS ミッションにより観測された雷関連電磁気現象に関する研究
VLF subionospheric disturbances and electrical properties of lightning discharges observed by JEM-GLIMS mission

柿沼 遠方^{1*}; 芳原 容英¹; 牛尾 知雄²; 佐藤 光輝³; 森本 健志⁴; 高橋 幸弘⁵; 鈴木 睦⁶
KAKINUMA, Kanata^{1*}; HOBARA, Yasuhide¹; USHIO, Tomoo²; SATO, Mitsuteru³; MORIMOTO, Takeshi⁴; TAKAHASHI, Yukihiro⁵; SUZUKI, Makoto⁶

¹ 電気通信大学 情報理工学研究科, ² 大阪大学大学院工学研究科情報通信工学部門, ³ 北海道大学 大学院理学研究院, ⁴ 近畿大学理工学部, ⁵ 海道大学・大学院理学院・宇宙理学専攻, ⁶ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

¹Graduate School of Informatics and Communication Eng., The University of Electro-Communications, ²Information and communication engineering department, Osaka University, ³Department of Cosmospice, Hokkaido University, ⁴Faculty of Science and Engineering, Kinki University, ⁵Department of Cosmospices, Graduate School of Science, Hokkaido University, ⁶Institute for Space and Astronautical Sciences, Japan Aerospace Exploration Agency

In this paper we report the preliminary results of ionospheric perturbation and causative lightning discharges observed by JEM-GLIMS mission to study the electromagnetic coupling mechanism between the tropospheric lightning and overlaying ionosphere. Continuous nadir optical observations of lightning discharges are performed by ISS JEM-GLIMS mission and many lightning images have been observed globally. Ionospheric perturbations and electrical properties of causative lightning discharges such as polarity and vertical charge moment changes are derived by the data from UEC's ground-based observation networks of VLF/LF transmitter signal reception and of ELF waveforms respectively. We discuss the electrical coupling efficiencies from the tropospheric lightning to the ionosphere by comparing the area of the lightning flash and corresponding subionospheric VLF disturbances and lightning properties.

キーワード: 中間圏発光現象, 雷放電, GLIMS, 電離層擾乱, 電荷モーメント

Keywords: Transient Luminous Events, lightning discharges, GLIMS, ionospheric perturbation, charge moment

雷放電による静電場変化の多地点観測ネットワークの構築 The building of multipoint measurement network for observing electrostatic field changes caused by lightning discharge

阪井 陸真^{1*}; 高橋 幸弘¹; 佐藤 光輝¹; 工藤 剛史¹
SAKAI, Rikuma^{1*}; TAKAHASHI, Yukihiro¹; SATO, Mitsuteru¹; KUDO, Takeshi¹

¹ 北海道大学 大学院理学研究院
¹ CosmoSciences, Hokkaido Univ.

It's not easy to understand the developing process of thunderstorm only with existing meteorological measurements because of its small spatial scale (less than an order of 1 km) and rapid change of the complicated structure. Electrostatic field under the thundercloud or its predecessor reflects the distribution of electrical charges, which is the result of frictions between ice crystal and hail due to strong vertical wind inside the thundercloud. If we measure the vertical electric field at multipoints on the ground, we could estimate the 3 dimensional distribution or the changes of the distribution of electrical charges, from which we may know the detailed development of thunderstorm. The traditional equipment for atmospheric electrostatic field measurement is field-mill sensor, which costs an order of 1 M JPY. In order to increase the number of observing stations, we should reduce the price of the instrument. Here we introduce a thunderstorm observation campaign, carried out in mountain area of Yamanashi prefecture, August 2013. We developed new plate-type electric field sensor, which costs about 0.2 M JPY or less including recording device and battery for one site. This sensor was placed at seven locations in every 4 km with recording system and GPS clock. As a result, we succeeded to record the electrostatic field changes at the same time in multi points, which occurred due to lightning strikes for three days.

キーワード: 雷放電, 静電場, 多地点観測

Keywords: lightning discharge, electrostatic field, multipoint measurement

Preliminary results of global lightning study by the DEMETER satellite Preliminary results of global lightning study by the DEMETER satellite

須藤 雄志^{1*}; 中村 真帆¹; 鴨川 仁¹
SUTO, Yushi^{1*}; NAKAMURA, Maho¹; KAMOGAWA, Masashi¹

¹ 東京学芸大学物理学科

¹Dpt. of Phys., Tokyo Gakugei Univ.

We investigate statistical property of global lightning activity by means of the DEMETER satellite. The DEMETER satellite which was launch by CNES, France, was operated from 2004 to 2010. In the study, we use electric field data to measure Whistler waves generated by lightning. In this presentation, we show preliminary results of this study.

キーワード: 電離圏, 雷, ホイスラー

Keywords: Ionosphere, Lightning, Whistler waves

JEM-GLIMSによる雷放電から放射されるVHF帯電磁波観測 VHF lightning observations by digital interferometry on JEM-GLIMS

森本 健志^{1*}; 菊池 博史²; 佐藤 光輝³; 牛尾 知雄²; 山崎 敦⁴; 鈴木 睦⁴
MORIMOTO, Takeshi^{1*}; KIKUCHI, Hiroshi²; SATO, Mitsuteru³; USHIO, Tomoo²; YAMAZAKI, Atsushi⁴; SUZUKI, Makoto⁴

¹ 近畿大学, ² 大阪大学, ³ 北海道大学, ⁴ 宇宙航空研究開発機構

¹Kinki University, ²Osaka University, ³Hokkaido University, ⁴ISAS/JAXA

Global Lightning and sprIte Measurements (GLIMS) mission is now ongoing on Exposed Facility of Japanese Experiment Module (JEM-EF) of the International Space Station (ISS). This paper focuses on an electromagnetic (EM) payload of JEM-GLIMS mission, very high frequency (VHF) broadband digital InTerFerometer (VITF). JEM-GLIMS mission is designed to conduct comprehensive observations with both the EM and the optical payloads for lightning activities and related transient luminous events (TLEs) expecting to give us many scientific impacts to the field.

VITF consists of two sets of antennas, band-pass filters, amplifiers, and 2-channel-AD-converter. Impulsive EM radiations received by the antennas are digitized by the AD converter synchronizing with another channel through the filters and the amplifiers. A patch type antenna is developed within the size of 200*200 mm. It is mounted on the antenna base made of aluminum alloy and Teflon block with the total height of 100 mm to gain its bandwidth and to reduce the interference from other structural objects. The same two units of antennas are installed with the separation of 1.6 m. Their bandwidths with the higher return loss than -3 dB are from 70 to 100 MHz. The signals received by the antenna are transmitted along cables with the same lengths to the electronics. The AD converter records 130 waveforms as maximum of one dataset with the duration of 2.5 μ s with 200 MS/s. The developments of VITF are based on the heritage of VHF sensor on Mado-1 satellite.

JEM-GIMS mission payload was successfully launched at the end of July 2012, and transported and installed to the ISS. After the initial checkout and maintenance, its nominal operation is continued from December 2012. Through the operation period, VITF corrects numerous VHF EM data synchronized with optical signals. About 650 VITF datasets were obtained in January and February 2013, for instance. The estimations of the EM direction-of-arrival (DOA) are attempted using the broadband digital interferometry. Some results agree with the optical observations, even though DOA estimation has difficulties caused by its very short baseline of the antennas and multiple pulses in short time, namely burst-type EM waveforms. VITF is designed expecting to estimate the DOA with about 10 km resolution that is equivalent to the scale of a thundercloud. The results on narrow bipolar pulses (NBPs) and/or transionospheric pulse pairs (TIPPs) are also expected as well as TLEs. The recorded VHF EM signals and the results of their DOA estimations, and the comparisons with optical observations will be introduced in the presentation.

Keywords: lightning, VHF radio observations, GLIMS, International Space Station

太陽活動領域 11158 における 3次元磁場構造と爆発現象の数値モデリング Numerical Modeling of the Three-Dimensional Magnetic Fields and Eruption in the Solar Active Region 11158

井上 諭^{1*}

INOUE, Satoshi^{1*}

¹ 慶熙大学校、宇宙探査学科

¹School of Space Research, Kyung Hee University

Solar flares and coronal mass ejections (CMEs) are considered as sudden liberation of magnetic energy in the solar corona, which affect geospace in the form of electromagnetic disturbance called geomagnetic storms. Unfortunately, measurement based on vector field observations only provide the two-dimensional information of magnetic field on the photosphere, therefore, we could not reach on a common understanding yet regarding to the three-dimensional (3D) magnetic structure causing the eruptive phenomena and associated dynamics. In order to clarify them, in this study we first extrapolate a 3D coronal magnetic field under the Nonlinear Force-Free Field (NLFFF) approximation based on the vector field, using the Magnetohydrodynamic (MHD) relaxation method developed by Inoue et al. 2014, and then compare the 3D structures before and after the flare. Next we perform an MHD simulation to clarify the dynamics during the flare where the NLFFF prior to the flare is set as an initial condition. Photospheric vector field was observed at 00:00 UT and 03:00 UT on February 15 corresponding to before and after the X2.2-class flare taking place around at 01:50 UT, taken by the Helioseismic And Magnetic Imager (HMI) on board the Solar Dynamics Observatory (SDO) satellite.

As a result, we found that the NLFFF has strongly twisted field lines; most of them are in the range from half-turn to one turn twist, being resided above the polarity inversion line. Furthermore, we found that a distribution of these footpoints well captures the flare ribbons observed by Hinode where Ca II emission is strongly enhanced. On the other hand, because the most of these strongly twisted lines disappear after the flare, consequently the twisted field lines having more than half-turn twist play an important role on causing the large flare. The MHD simulation successfully shows an eruption of the more strongly twisted lines whose values are over one-turn twist, which are produced through the magnetic reconnection in strongly twisted lines of the NLFFF. Eventually, we found that they exceed a critical height at which the flux tube becomes unstable to the torus instability determining the condition that whether a flux tube might escape from the overlying field lines or not. In addition to these, during the eruption, we found that the distribution of the observed two-ribbon flares is similar to the spatial variance of the footpoints caused by the reconnection of strongly twisted lines with more than half-turn twist. Furthermore, because the post flare loops obtained from MHD simulation well capture that in EUV image taken by SDO, these results support the reliability of our simulation.

キーワード: 活動領域, コロナ磁場, 太陽フレア, コロナ質量放出, 数値モデリング

Keywords: Active Region, Coronal Magnetic Field, Solar Flare, Coronal Mass Ejections, Numerical Modeling

衛星観測に基づく太陽フレアのトリガ過程に関する研究 Study on Triggering Process of Solar Flare on the basis of Satellite Observation

伴場 由美^{1*}; 草野 完也¹; 今田 晋亮¹
BAMBA, Yumi^{1*}; KUSANO, Kanya¹; IMADA, Shinsuke¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹STEL, Nagoya Univ.

Solar Flares are explosive phenomena driven by magnetic energy stored in the solar corona. Because interplanetary disturbances associated with solar flares sometimes impact terrestrial environments and infrastructure, understanding the flare-triggering process is important not only from a solar physics perspective but also for space weather forecasting. There are numerous observational studies and simulations which attempted to reveal the onset mechanism of solar flares. Because different observations support different models, the underlying mechanism of flare onset remains elusive. Thus the predictability of flare occurrence remains limited.

We have analyzed several flare events obtained by the Solar Optical Telescope (SOT) onboard the Hinode Satellite in order to elucidate flare trigger mechanism [Bamba *et al.* 2013]. We investigated the spatio-temporal correlation between the detailed magnetic field structure and the chromospheric pre-flare emission at the central part of flaring regions for several hours prior to the onset of flares. We observed that the magnetic shear angle in the flaring regions exceeded 70 degrees, as well as that characteristic magnetic disturbances developed at the centers of flaring regions in the pre-flare phase. The observed signatures strongly support the idea of flare trigger mechanism presented by Kusano *et al.* (2012), which proposed that solar flares can be triggered by the interaction between the sheared arcade and one of the two types of small magnetic disturbances. Hence, we could classify the events into two groups depending on the structure of their magnetic polarity inversion lines; to the so-called "Opposite-Polarity (OP)" and "Reversed-Shear (RS)" magnetic field. Furthermore, we studied how small magnetic field can work for triggering flares based on the Hinode observations. The results indicate that the critical amount of magnetic flux for the small magnetic field to trigger flares, depends on the magnetic connectivity in the flaring site, and it varies even within an active region.

However, only four Hinode data sets have been utilizable for the analyze of this study because of the SOT's limited field of view (FOV) (328" × 164" for Narrow-band Filter Imager, 218" × 109" for Broad-band Filter Imager). Therefore, we applied the analysis method of Bamba *et al.* (2013) to the data obtained by the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) and the Atmospheric Imaging Assembly (AIA) onboard the Solar Dynamics Observatory (SDO), which has a full-disk FOV (2000" × 2000") in order to increase the number of event analysis. We chose the flare events observed by SDO until 31 Jan. 2014, larger than M5.0 GOES class. Eleven X-class and twenty M-class events meet this condition, and we classified these events into independent 6 types by using following three conditions: (1) whether the initial flare kernels has obvious and sheared two-ribbon structure, (2) whether the chromospheric brightening was observed at the center of sheared ribbon, (3) the results of measurement of the magnetic shear angle θ and the azimuth of flare trigger field ϕ .

In this presentation, we would like to report the result of comparative study of Hinode and SDO. We would like to also introduce our preliminary result of statistical flare trigger study using SDO/HMI and AIA.

References:

- [1] *Study on Triggering Process of Solar Flares Based on Hinode/SOT Observations*, Y. Bamba, K. Kusano, T. T. Yamamoto, and T. J. Okamoto, 2013 *ApJ* 778 48 doi:10.1088/0004-637X/778/1/48
- [2] *Magnetic Field Structures Triggering Solar Flares and Coronal Mass Ejections*, K. Kusano, Y. Bamba, T. T. Yamamoto, Y. Iida, S. Toriumi, and A. Asai, 2012 *ApJ* 760 31 doi:10.1088/0004-637X/760/1/31

Keywords: Sun, solar flare, magnetic field, SDO, Hinode, space weather

2012年3月7日に発生したX5.4フレア：太陽表面における磁場・速度場の特徴 X5.4 flare on 7 March 2012: magnetic and velocity properties at the solar surface

清水 敏文^{1*}; ライツ ブルース²; 伴場 由美³
SHIMIZU, Toshifumi^{1*}; LITES, Bruce²; BAMBA, Yumi³

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ² 国立大気研究所高高度観測所, ³ 名古屋大学
¹ ISAS/JAXA, ² HAO/NCAR, ³ Nagoya University

太陽フレアは、磁力線の捻れとしてコロナに蓄積された自由エネルギーが突発的に解放され、場合によっては宇宙空間へコロナプラズマの噴出を伴う。捻れた磁力線の形成やフレア発生のトリガー機構はまだ良く理解できていない。特に、大フレアを引き起こす磁気中性線付近で観測されるダイナミカルな振る舞いについては観測例が乏しい。本講演は、2012年3月7日に発生したX5.4クラスのフレアについて、特に太陽表面で観測される磁場・速度場の特性について議論する。このフレアに伴うコロナ質量放出(CME)は惑星間空間に伝播して、3月9日に大きな磁気嵐を発生させている。講演で議論する予定の特筆すべきことの一つに、磁気中性線にほぼ沿って観測された高速の物質流がある。この中性線は、主エネルギー解放領域に形成されたフレアループの足元を示すフレアリボンの中間付近に存在する。この高速流が観測された磁場は、磁気中性線に沿って形成された太陽面にほぼ平行な磁場である。また、この流れはフレア発生の少なくとも6時間以上前には現れ、フレア発生後も数時間は継続的に見られる。観測データは、この流れは磁気浮上や磁気中性線へ向う収束流ではなく、むしろ磁気中性線に沿って磁気シアを増加させ、爆発的フレア発生にとって好ましい磁場構造を作っていく役割をする物質流であることを示唆している。

キーワード: 太陽フレア, ひので, X線, 可視光, 磁場, ドップラー速度
Keywords: solar flare, Hinode, X-ray, Optical, magnetic field, Doppler shift

巨大太陽フレア時にきぼうモジュール滞在中の宇宙飛行士が受ける被ばく線量評価 Estimation of Astronaut Dose inside the Kibo Module during Large Solar Flare Events

佐藤 達彦^{1*}; 片岡 龍峰²; 永松 愛子³
SATO, Tatsuhiko^{1*}; KATAOKA, Ryuho²; NAGAMATSU, Aiko³

¹ 日本原子力研究開発機構, ² 国立極地研究所, ³ 宇宙航空研究開発機構

¹Japan Atomic Energy Agency, ²National Institute of Polar Research, ³Japan Aerospace Exploration Agency

Forecast of radiation doses for astronauts as well as aircrews due to the exposure to solar energetic particles (SEP) is one of the greatest challenges in space weather research. In last 3 years, we have developed a warning system of aviation exposure to solar energetic particles: WASAVIES, which can predict the SEP doses at any flight conditions within 2.5 hours after the onset of ground level enhancements (GLE). In this system, the SEP fluxes incident to the atmosphere are calculated by physics-based models [1,2], and they are converted to radiation doses using a database developed on the basis of air-shower simulation [3]. In this study, we applied the same physics-based models to the estimate of the SEP fluxes on the orbit of International Space Station, and converted the fluxes to radiation doses for astronauts staying inside the Kibo module. For this conversion, we performed Monte Carlo cosmic-ray transport simulation, using the Particle and Heavy Ion Transport code System PHITS [4] in combination with the realistic 3D model of the Kibo module. A brief outline of WASAVIES together with the results of the astronaut dose estimation will be presented at the meeting.

[1] Y. Kubo, submitted to Space Weather

[2] R. Kataoka et al. submitted to Space Weather

[3] T. Sato et al. (2013) Radiat. Prot. Dosim. doi:10.1093/rpd/nct332

[4] T. Sato et al. (2013) J. Nucl. Sci. Technol. 50, 913-923. <http://phits.jaea.go.jp/>

キーワード: 太陽フレア, 被ばく線量, 太陽高エネルギー粒子, 宇宙飛行士, 宇宙天気, PHITS
Keywords: solar flare, radiation dose, solar energetic particle, astronaut, space weather, PHITS

太陽放射線による航空機被ばく警報システム WASAVIES WASAVIES: Warning System for Aviation Exposure to Solar Energetic Particles

片岡 龍峰^{1*}; 佐藤 達彦²; 久保 勇樹³; 塩田 大幸⁴; 桑原 孝夫⁵; 八代 誠司⁶; 保田 浩志⁷
KATAOKA, Ryuho^{1*}; SATO, Tatsuhiko²; KUBO, Yuki³; SHIOTA, Daikou⁴; KUWABARA, Takao⁵; YASHIRO, Seiji⁶; YASUDA, Hiroshi⁷

¹ 極地研, ² 原子力機構, ³ 情通機構, ⁴ 名古屋大学, ⁵ デラウェア大学, ⁶ 米国カソリック大学, ⁷ 放医研
¹NIPR, ²JAEA, ³NICT, ⁴Nagoya University, ⁵Delaware University, ⁶CUA, ⁷NIRS

Solar energetic particles (SEP) sometimes induce air shower that significantly increase the radiation dose at flight altitudes. In order to inform the situation of such a space radiation hazard to aircrews, a physics-based forward model is developed as WASAVIES (Warning System for Aviation Exposure to SEP) based on focused transport equation and Monte Carlo particle transport simulation code PHITS. WASAVIES gives the fastest and simplest way to predict the time profile of dose rate during ground-level enhancements (GLEs).

キーワード: 太陽プロトン, 放射線被ばく, 太陽フレア, 空気シャワー
Keywords: solar proton, radiation dose, flares, air shower

日本産樹木中 ^{14}C 濃度測定による過去 5000 年間の大 SPE 探索計画 Plan of large SPE search by the ^{14}C content measurement in Japanese trees for the past 5000 years

三宅 美沙^{1*}; 増田 公明¹; 箱崎 真隆²; 中村 俊夫²; 木村 勝彦³

MIYAKE, Fusa^{1*}; MASUDA, Kimiaki¹; HAKOZAKI, Masataka²; NAKAMURA, Toshio²; KIMURA, Katsuhiko³

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 名古屋大学年代測定総合研究センター, ³ 福島大学共生システム理工学研究科

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Center for Chronological Research, Nagoya University, ³Faculty of Symbiotic Systems Science, Fukushima University

Radiocarbon (^{14}C) is produced by incoming cosmic rays to the Earth. Produced ^{14}C becomes $^{14}\text{CO}_2$ and is absorbed by trees by photosynthesis. Then, tree-rings record the past cosmic ray intensity. Rapid yearly increases in the ^{14}C content have been detected for the period from AD 774 to AD 775 and from AD 993 to AD 994. Although some candidates for the cause of these cosmic-ray events have been considered, it has been considered that the solar activity (large SPE) is the most plausible cause.

There is the possibility that a lot of ^{14}C increase events like the AD 775 one are hidden in the periods when the ^{14}C content has not been measured with a 1-year resolution. If we detect such events, we are able to discuss a detailed occurrence rate of large SPE which is very important factor to prepare for future large SPEs.

We are planning to search for ^{14}C increase events by the measurements of ^{14}C content in Japanese trees for this 5000 years. In this thesis, we are going to explain the plan and problems.

Keywords: radiocarbon, tree-rings, cosmic-ray, SPE

星雲遭遇による白亜紀末の大量絶滅 End-Cretaceous mass extinction driven by the encounter with a dark cloud

二村 徳宏^{1*}; 戎崎 俊一²; 丸山 茂徳³

NIMURA, Tokuhiko^{1*}; EBISUZAKI, Toshikazu²; MARUYAMA, Shigenori³

¹ 岡山天文博物館, ² 理化学研究所, ³ 東京工業大学 地球生命研究所

¹Okayama Astronomical Museum, ²RIKEN, ³Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

We found that a significant positive broad component of iridium in a pelagic deep sea sediment core (886C) around an iridium peak by asteroid impact corresponds at the K-Pg boundary. The 886C is core sample was taken by the Ocean Drilling Program (ODP) in the central portion of the North Pacific. This site has been in Pelagic from the End-Cretaceous periods. The accumulation rate is 0.5 m Myr⁻¹. Kyte et al., (1995) measured iridium density in the 886C core of 0.75-72.2 m which corresponds of ~80 Ma from the present. In this data, there is one sharp peak around 65.5 m correspond at K-Pg boundary. In addition, we found that there are broad components across ~20 m above the back ground which have some sharp peak component. The Ir value of the broad component which is about dozen times of back ground. This broad component is difficult to be explained by the materials on the surface of the Earth, and requires the contribution from the iridium-rich extraterrestrial materials, such as CI chondrite. And it is difficult to explain the broad component by diffusion and bioturbation of an iridium peak by asteroid impact. Platinum-group-element such as Pt, Re and Ir are redistributed by changes in sedimentary redox condition. However such change can probably account for many of small <10 cm (Colodner et al., 1992) and the mean global depth of marine bioturbation was calculated to be 9.8±4.5 cm (Boudreau, 1994). And also an evidence of bioturbation was not found from lithofacies (Proc. ODP, Init. Repts., 145).

We consider that the broad component can be caused by an encounter of the solar system with a dark cloud with a size of ~100 pc and the central density of over 2000 protons/cc in the galactic disk and estimated that the flux of exosolar material began ~73 Ma and has run through ~8 Myr. By the Kataoka's "Nebula Winter model" (Kataoka 2013), dark cloud can lead to an environmental catastrophe to the Earth from a few kiloannum to megaannum. The dark cloud encounter enhances a flux of cosmic dust particles and cosmic rays which lead to global cooling and destruction of the ozone layer.

The solid particles from the dark cloud accrete on the Earth and in the stratosphere, stay for a several months; their sunshield effect is as large as -9.3 W m⁻². The climate cooling in the End-Cretaceous period is also suggested by the variations of stable isotope rations in oxygen and strontium (Brian and Huber, 1990; Barrera and Savin, 1999; Li and Keller, 1998). Any photosynthetic plants had heavy damaged, and loss of biodiversity began to the top of food chain.

The mass extinction at K-Pg boundary, which is widely thought to be caused by an impact of an asteroid (e. g., Schulte et al., 2010). However, a complete extinction of level of family by asteroid impact seems rather difficult. First, a severe environment turn-over would finish few years after impact, the solid particles and sulphate launched by the asteroid impact was settled down for only few month (troposphere) to few years (stratosphere) and negative radiative forcing became negligible after a few years from the impact (Pierazzo, 2001). The number of individuals would recover completely after the environmental catastrophe was over, if a few percent of individuals of one species survived.

Second, in spite of there were similar impacts without catastrophic on the Earth, for example, Alamo, Woodleigh, and Popigai crater, there are no evidences of association for extinction. However, because the encounter with the dark cloud perturbs the orbit of asteroid or comet by its gravitational potential and may lead an asteroid or comet shower, the asteroid impact at K-Pg may be one of the consequences of the dark cloud. For a certainly, only an asteroid impact cannot involve mass extinction, however may be role cruncher. The multiple impact and volcanism in a short period of time (Keller, 2005) may have been caused by encounter the dark nebula and attendant cosmic ray, respectively.

キーワード: 星雲の冬, 暗黒星雲, 大量絶滅, 白亜紀末, K-Pg 境界, 国際深海掘削計画

Keywords: Nebula Winter, dark cloud, mass extinction, End-Cretaceous, K-Pg boundary, Ocean Drilling Program

Update on the US GIC activities and generation of benchmark geomagnetic disturbance (GMD) scenarios
Update on the US GIC activities and generation of benchmark geomagnetic disturbance (GMD) scenarios

PULKKINEN, Antti^{1*}
PULKKINEN, Antti^{1*}

¹NASA GSFC
¹NASA GSFC

The awareness about potential major impacts of geomagnetically induced currents (GIC) has drawn a high level action in the US and in Canada. More specifically, regulatory process has been launched to generate standards for GIC hazard assessments and mitigation procedures. All US high-voltage power transmission-related entities need to follow the standards in the near future. One of the central GIC activities in the US has been the North the American Electric Reliability Corporation's (NERC) GMD Task Force that has allowed in-depth communication and collaboration between US federal organizations, power transmission operators and scientific research community. I will discuss these activities in this paper and outline the road ahead for some of the key US GIC activities.

As a part of the GMD standards drafting process and the US GIC hazards assessments, substantial effort has been made for generating benchmark GMD scenarios. These scenarios that quantify extreme geoelectric field magnitudes and temporal waveforms of the field fluctuations are the foundation for subsequent engineering analyses. The engineering analyses will include the transmission system voltage stability and transformer heating assessments. The work on the GMD scenarios has been a major collaboration between a number of US and Canadian entities involved in GMD research and transmission system operations. I will discuss in this paper also the key elements of the benchmark GMD generation process and show the latest results from our NASA GSFC work on the topic.

キーワード: Space weather, geomagnetically induced currents, Extreme events
Keywords: Space weather, geomagnetically induced currents, Extreme events

2013年5月13日のXクラスフレアにおける非熱的電子の空間分布 Spatial distribution of nonthermal electrons in an X-class flare on 13 May 2013

増田 智^{1*}
MASUDA, Satoshi^{1*}

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹ STEL, Nagoya University

Four X-class flares took place in May 2013. Fortunately three of four were observed with Nobeyama Radioheliograph (NoRH). One of them occurred behind the east limb on 13 May 2013. It is a good chance to investigate the height distribution of nonthermal electrons in the solar corona. In the framework of the standard flare model based on magnetic reconnection, Minoshima et al. (2011) showed that the height distribution of accelerated/heated electrons depends on the energy of the electrons. NoRH has a capability to observe a solar flare in 17 and 34 GHz with a high time resolution (100 ms). The energy of electrons emitting microwaves is very high (~MeV), and the mean-energy emitting 34 GHz is higher than that for 17 GHz. Hard X-rays are emitted by relatively lower-energy (~100 keV) electrons. So this dataset can cover a wide energy range of accelerated electrons. In order to understand the electron acceleration/transport/loss processes, multi-wavelength observation is crucially important. The 13 May 2013 flare was simultaneously observed with NoRH and RHESSI (The Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager). Investigating the distribution of these emission sources in the solar corona, we discuss the electron acceleration/transport/loss processes.

Keywords: solar flare, particle acceleration, microwave, hard X-ray, solar corona, magnetic reconnection

Hinode/XRT の観測データを用いた X 線ジェットのエネルギー解放に関する研究 An energetics study of X-ray jets using Hinode/XRT observation

佐古 伸治^{1*}; 下条 圭美²; 渡邊 鉄哉²; 関井 隆²
SAKO, Nobuharu^{1*}; SHIMOJO, Masumi²; WATANABE, Tetsuya²; SEKII, Takashi²

¹ 総合研究大学院大学, ² 国立天文台

¹The Graduate University for Advanced Studies, ²National Astronomical Observatory of Japan

For plasma acceleration in X-ray jets in the solar corona, three mechanisms have been considered, based on the model of X-ray jets by magnetic reconnection (Shibata et al. 1992); The reconnection jet produced by magnetic tension, the evaporation flow produced by pressure gradient, and the twisted jet produced by magnetic pressure. There are some evidences of X-ray jets in active regions (ARs) produced by pressure gradient. On the other hands, there is no observational evidence of X-ray jets by the other forces except the result of a high-speed jet. In order to distinguish the evaporation flow from the other types of jets, I have studied the energetics of the X-ray jets.

Using over 100 X-ray jets greater than 3×10^4 km in length in ARs, quiet regions (QRs), and coronal holes (CHs), I have found no large differences in the life time, the width of the jets, and the area of the footpoint flares in such regions. On the other hands, the plasma number density of the X-ray jets and flares in ARs is ten times larger than those in QRs and CHs. Assuming the energy balance between conductive flux and heat flux by the footpoint flare, we estimate the temperature of the jets. The AR jets has a wide range of the temperature (1 MK-9 MK), while the temperature of most X-ray jets in CH and QR is 1~2 MK. In my presentation, I will discuss a relationship of the speed with the temperature of the jets.

キーワード: 太陽, 太陽コロナ, X 線ジェット, エネルギー解放, ひので

Keywords: Sun, Solar Corona, X-ray jet, Energy release, Hinode

Lower temperature response of an EUV wave observed by Hinode/EIS and SDO/AIA Lower temperature response of an EUV wave observed by Hinode/EIS and SDO/AIA

LEE, Kyoung sun^{1*}; KWON, Ryun young²; BROOKS, David²; SHIMIZU, Toshifumi¹
LEE, Kyoung sun^{1*}; KWON, Ryun young²; BROOKS, David²; SHIMIZU, Toshifumi¹

¹ISAS/JAXA, ²George Mason University

¹ISAS/JAXA, ²George Mason University

We investigate an EUV wave observed by Hinode/EIS and SDO/AIA on 2011 August 04. The EUV wave propagates across the solar disk and the wave front passing through a remote active region (AR 11263) is observed by EIS. This EUV wave has already been analyzed using coronal lines, but the lower temperature response to the EUV wave has not been investigated. Using multi-wavelength observations from EIS and AIA, we determined the intensity and Doppler velocity variation of different temperature lines and compared them. From the comparison, we found an enhancement of the intensity at lower temperatures before the intensity increase seen in the coronal filters of AIA. And a significant enhancement of the red shift (10 km/s) in the lower temperature line (Si VII, $\log T \sim 5.8$) compared to the increase of the red shift (~ 3 km/s) in coronal lines (Fe XII, FeXIII, and Si X, $\log T \sim 6.1-6.2$) when the EUV wave interacts with the active region. We will discuss the impact of the EUV wave on the lower temperature emission.

キーワード: Spectroscopy, Corona, EUV wave

Keywords: Spectroscopy, Corona, EUV wave

太陽フレア双方向インフローの撮像分光立体観測 Imaging, spectroscopic and stereoscopic observations of the bi-directional inflow in the solar flare

松井 悠起^{1*}; 横山 央明¹

MATSUI, Yuki^{1*}; YOKOYAMA, Takaaki¹

¹ 東京大学地球惑星科学専攻

¹University of Tokyo

The standard model of solar flares based on the magnetic reconnection includes bi-directional inflow toward the reconnection point. Corresponding to the bi-directional inflow, high temperature loops like a cusp shape are formed due to the magnetic reconnection. By combination of imaging, spectroscopic and stereoscopic observations, we succeeded in capture the three-dimensional structure of a bi-directional reconnection inflow of a solar flare.

We analyzed a C-class flare that occurred on 2012 September 11 beyond the solar limb. The bi-directional inflow was found in the images of coronal temperature filter taken by AIA onboard SDO. Hinode EUV Imaging Spectrometer (EIS) also observed this flare and provide the Doppler velocity of the bi-directional inflows. At the same time, cusp loops were observed with the raster scans of FeXXIV emission line (over 10 MK) at the region surrounded by the bi-directional inflow. This is clear evidence that 1MK loops are heated over 10MK by the magnetic reconnection. STEREO A/SECCHI was observing this flow from a different line of site. Inflowing angle in STEREO A/SECCHI images is consistent with the angle speculated by apparent velocity of SDO/AIA and line of sight velocity of Hinode/EIS. By combining these data sets, we constructed a self-consistent three-dimensional picture of the flows.

Keywords: solar flare, reconnection

大振幅プロミネンス振動の励起を用いたコロナ衝撃波強度の診断方法について Diagnosis of coronal shock strength using the activation of large amplitude prominence oscillation

高橋 卓也^{1*}; 浅井 歩²; 柴田 一成³
TAKAHASHI, Takuya^{1*}; ASAI, Ayumi²; SHIBATA, Kazunari³

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 京都大学宇宙総合学研究ユニット, ³ 京都大学附属花山・飛騨天文台
¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Unit of Synergetic Studies for Space, Kyoto University, ³Kwasan and Hida Observatories, Kyoto University

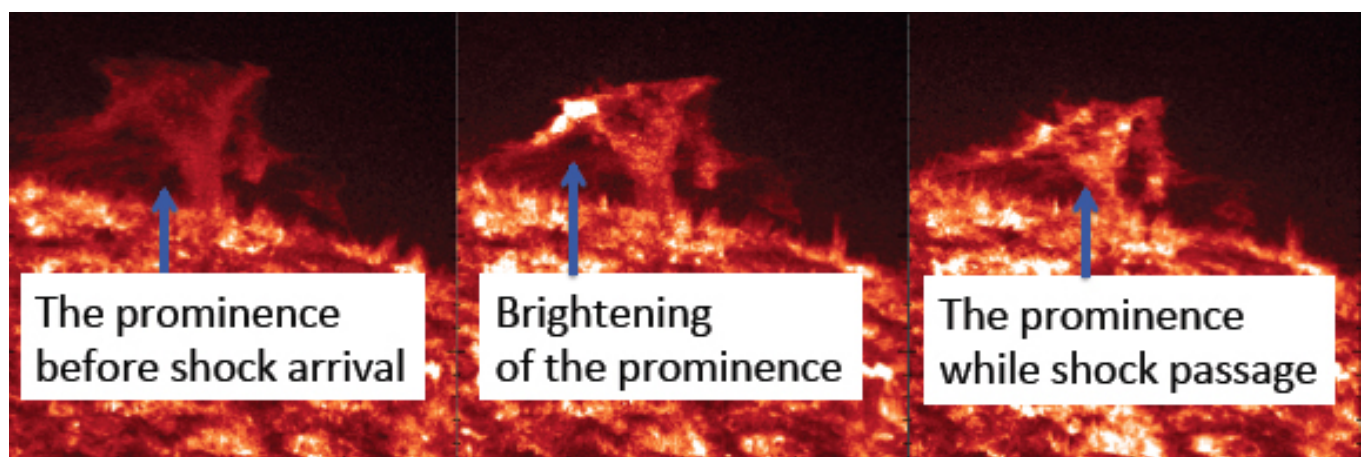
X5.4 class solar flare occurred on March 7, 2012 which was the second largest flare in this solar cycle. The flare was associated with very fast coronal mass ejection (CME) with the velocity of over 2500 km/s. Associated with this flare, a wave-like coronal disturbance (known as EUV wave) was observed to propagate along the solar surface. The observed EUV wave propagated with the average speed of about 670 km/s towards the north and 'hit' a polar prominence leading to its large amplitude oscillation. The activated prominence strongly brightened when EUV wave 'pushed' it.

Because of the difficulty in direct observation of physical quantities in the corona, the physical nature of the EUV waves is still under discussion. Two main interpretations of EUV waves are the 'fast mode MHD wave/shock' interpretation, and 'non-wave' interpretations.

In the images taken with Inner coronagraph (COR1) of the Sun Earth Connection Corona and Heliospheric Investigation (SECCHI) on board *Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO)-Behind*, we could see a coronal disturbance detached from expanding CME plasma. The time evolution of the disturbance seen in COR1 images was consistent with that of observed EUV wave. Also, Type II radio burst which is thought to be evidence of coronal shock wave was observed simultaneously. Because of that observational evidence, we regard the observed EUV wave as MHD fast mode shock front. Assuming the shock nature of the observed EUV wave, we could also explain prominence acceleration and brightening consistently.

Using the initial velocity of activated prominence, we could estimate the coronal shock strength of the EUV wave with the help of linear wave theory. We also check the applicability of linear theory to the shock problem with one dimensional numerical model and ascertained that it is applicable when the shock strength is not strong. Estimated fast mode mach number of the EUV wave was between 1.20 and 1.42, and we could say that the EUV wave was a weak shock front in the corona.

キーワード: 太陽フレア, コロナ質量放出 (CME), 衝撃波, 太陽プロミネンス, 磁気流体力学 (MHD)
Keywords: solar flare, coronal mass ejection (CME), shock waves, solar prominence, magnetohydrodynamics (MHD)



Influence of interplanetary solar wind sector polarity on the ionosphere Influence of interplanetary solar wind sector polarity on the ionosphere

LIU, Jing^{1*}
LIU, Jing^{1*}

¹Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, CAS

¹Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, CAS

Knowledge of solar sector polarity effects on the ionosphere may provide some clues in understanding of the ionospheric day-to-day variability and 'hysteresis' effect on foF2. In this study, a solar-terrestrial connection ranging from solar sector boundary crossings, geomagnetic disturbances and ionospheric perturbations has been demonstrated. The increases in interplanetary solar wind speed within three days are seen after SB crossings, while the decreases in solar wind dynamic pressure and magnetic field intensity immediately after SB crossings are confirmed by the superposed epoch analysis results. Furthermore, the interplanetary magnetic field (IMF) Bz component turns from northward to southward in March equinox and June solstice as the Earth passes from a solar sector of outward to inward directed magnetic fields, whereas the reverse situation occurs for the transition from toward to away sectors. The IMF Bz component for the same solar sector polarity has opposite signs between March equinox and September equinox, and also between June solstice and December solstice. In order to know how the ionosphere reacts to the interplanetary solar wind variations linkage of SB crossings, the F2 region critical frequency (foF2) covering about four solar cycles and total electron content (TEC) during 1998-2011 are utilized to extract the related information, revealing that they are not modified significantly and vary within the range of 15% on average. The responses of the ionospheric TEC to SB crossings exhibit complex temporal and spatial variations and have strong dependencies on season, latitude, and solar cycle. This effect is more appreciable in equinoctial months than in solstitial months, which is mainly caused by larger southward Bz components in equinox. In September equinox, latitudinal profile of relative variations of foF2 at noon is featured by depressions at high latitudes and enhancements in low-equatorial latitudes during IMF away sectors. The negative phase of foF2 is delayed at solar minimum relative to it during other parts of solar cycle, which might be associated with the difference in longevity of major interplanetary solar wind drivers perturbing the near-Earth environment in different phases of solar cycle.

Ensemble Data Assimilation for Thermospheric Mass Density Specification and Forecasting

Ensemble Data Assimilation for Thermospheric Mass Density Specification and Forecasting

MATSUO, Tomoko^{1*} ; LEE, Ite³ ; ANDERSON, Jeffrey⁴
MATSUO, Tomoko^{1*} ; LEE, Ite³ ; ANDERSON, Jeffrey⁴

¹University of Colorado at Boulder, CO, USA, ²National Oceanic and Atmospheric Administration, CO, USA, ³National Central University, Taiwan, ⁴National Center for Atmospheric Research, CO, USA

¹University of Colorado at Boulder, CO, USA, ²National Oceanic and Atmospheric Administration, CO, USA, ³National Central University, Taiwan, ⁴National Center for Atmospheric Research, CO, USA

Even though the Earth's upper atmosphere density is tenuous, it is substantial enough to exert significant drag on orbiting spacecraft and debris. The largest uncertainty in low-Earth orbit prediction is aerodynamic drag estimation. Thermospheric mass density variation is the major source of drag estimation errors at altitudes below about 700 km. This paper demonstrates how the limit of predictability of thermospheric mass density variability can be extended by means of ensemble data assimilation.

To assimilate observations of the thermosphere and ionosphere, we use an ensemble data assimilation procedure constructed with the Data Assimilation Research Testbed and the Thermosphere-Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model, two sets of community software offered by NCAR. An important attribute of our approach is that the ionosphere-thermosphere coupling is self-consistently treated in both the forecast model and the assimilation scheme. This enables the inference of unobserved thermospheric states from the relatively plentiful observations of the ionosphere. Given the ever-expanding global navigation satellite infrastructure, this is indeed a promising prospect for upper atmosphere data assimilation. Another relevant strategy is using data assimilation to estimate the model forcing parameters that control states of the thermosphere and ionosphere. In comparison to the lower atmosphere, the upper atmosphere is a dissipative, strongly forced dynamical system, so estimation of model forcing parameters can have a dramatic impact on the quality of ensemble forecasting and assimilation of the upper atmosphere.

In this paper, we present results from our ensemble assimilation experiments with thermospheric mass densities obtained from the accelerometer on board the CHAMP satellite, and electron density profiles obtained from the COSMIC/FORMOSAT-3 mission.

キーワード: thermosphere-ionosphere coupling, data assimilation, parameter and state estimation, thermospheric mass density, aerodynamic drag estimation, LEO orbit prediction

Keywords: thermosphere-ionosphere coupling, data assimilation, parameter and state estimation, thermospheric mass density, aerodynamic drag estimation, LEO orbit prediction

高精度大気圏-電離圏結合モデルを用いた電離圏擾乱予測 Forecast of ionospheric disturbances using a high-resolution atmosphere-ionosphere coupled model

品川 裕之^{1*}; 陣 英克¹; 三好 勉信²; 藤原 均³; 横山 竜宏¹
SHINAGAWA, Hiroyuki^{1*}; JIN, Hidekatsu¹; MIYOSHI, Yasunobu²; FUJIWARA, Hitoshi³; YOKOYAMA, Tatsuhiro¹

¹ 情報通信研究機構, ² 九州大学, ³ 成蹊大学
¹NICT, ²Kyushu University, ³Seikei University

宇宙天気予報は、予報官が観測データと経験・統計などに基づいて判断する「総観予報」から、数値シミュレーションによる情報を取り入れた「数値予報」に進もうとしている。我々のグループは、全大気圏-電離圏結合モデル (GAIA: Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy) を開発し、宇宙空間や下層大気圏からの様々な影響による大気圏・電離圏現象の再現と解析を行ってきた。現在、このモデルは水平方向の空間分解能が緯度・経度方向に約1度の分解能となっている。しかし、宇宙天気予報で重要となるプラズマバブルや SED (Storm Enhanced Density) などの現象を再現するには、数10 km スケールの現象を再現・予測しなくてはならない。我々は、GAIAに加え、新たに空間分解能10 km以下の精度を持つ領域型高精度電離圏モデルを開発し、これをGAIAに組み込むことにより高分解能化を進め、次世代の宇宙天気予報ツールとして発展させようとしている。本発表では、モデル開発の進捗状況と最近の結果について報告する。

キーワード: 宇宙天気, 電離圏, 大気圏, シミュレーション, モデル, 擾乱
Keywords: space weather, ionosphere, atmosphere, simulation, model, disturbance

プラズマシートから電離圏へのサブストーム擾乱の投影 Projection of substorm processes from the plasma sheet to the polar ionosphere

田中 高史^{1*}
TANAKA, Takashi^{1*}

¹九州大学名誉教授

¹Emeritus Professor, Kyushu University

It has been believed that auroras observed in the ionosphere have their corresponding counterpart in the plasma sheet (Haerendel, 2011). Localized auroral breakup should reveal the location of explosive dissipation in the plasma sheet. Similar correspondence is supposed even during the growth phase. While it is well known that the prebreakup arc breakups first during the substorm, the equatorial location and relating formation mechanism of equatorward arc are long-standing questions in the understanding of the growth phase (Sergeev et al., 2012). Another aurora during the growth phase is the poleward bright arc that is believed to be an ionospheric projection of the reconnection separatrix. Also the equatorward extension of the N-S auroral arc has been suggested to be associated with earthward fast bursty flows (Nishimura et al., 2010). The region of aurora indicates that the width of oval is 7° (64° to 71°), near midnight just prior to the breakup. Pitch angle isotropy boundary at 65.5° is critical for the prebreakup arc, since the isotropy boundary coincides with the prebreakup arc. Seen from the structure of isotropy boundary, the breakup arc is somewhere in the transition region between the dipole-like region and the current sheet region. A phenomenon closely related to the projection of the aurora is the distribution of FAC and its tracing. A traditional understanding for the driver of disturbances is the fast flow, both for the growth phase and the onset. The BBF was expected for a wide range of activity including localized auroral brightenings, N-S auroras and streamers (Nakamura et al., 2001). At the same time, the BBF can be a source of the FAC. The cross-tail current is diverted via downward FAC into the ionosphere on the eastward side of the bubble and is connected to upward FACs west of the bubble. The overall region 1-sense FACs is expected to emerge from 64° to 70° (Yang et al., 2012). The plasma ahead of the bubble is compressed, resulting in a high plasma pressure and the region 2-sense FACs that are as thin as 1° , centered at 63° .

Recent M-I coupling simulation reproduces almost all signatures of the substorm, including the preonset arc, and the onset that start from the low-latitude side of the oval (Tanaka et al., 2010). From the numerical solution just prior to the onset, the BBF region from $x=-10$ Re to $x=-20$ Re in the plasma sheet is projected down along the magnetic field to a quite narrow region in the ionosphere from 65.7° to 66.8° latitudes. Even the outmost field line of the plasma sheet is traced down to 68° latitude in the ionosphere. So that the observed high-latitude part of the oval ($68^\circ\sim 71^\circ$) is outside the plasma sheet. The N-S arc that usually starts from higher latitude than 70° cannot be the reflection of the BBF. Near the midnight, in the numerical solution, the region 1 FAC distributes from 65° to 69° (with strong part $67^\circ\sim 68^\circ$) and the region 2 FAC distributes from 62° to 64° latitude. From this result, the growth phase region 1 FAC cannot be from the plasma sheet. The result of current line tracing shows that the growth phase region 1 FAC extends into the magnetosphere as far as $x=-20$ Re through the east-west flow shear between the tail plasma sheet and the lobe. If we look at only the latitude it is barely possible that the onset FAC strating from the lowest-latitude area of the region 1 FAC around 65° could be from the CW that should be inside $x=-10$ Re (65.7°). However, it is implausible from the current line tracing. The onset region 1 FAC is mapped to the cusp-mantle region through the near earth flow shear between the plasma sheet and the lobe. Correspondence between the plasma sheet and the ionosphere so far believed is quite confusing. It is doubtful to consider that all auroras observed in the ionosphere have their corresponding counterpart in the plasma sheet.

キーワード: サブストーム
Keywords: substorm

積乱雲、OLR、および太陽パラメータにおける1ヶ月変動 One-month periodicity in thunderstorm, OLR and solar parameters

高橋 幸弘^{1*}; 佐藤 光輝¹
TAKAHASHI, Yukihiko^{1*}; SATO, Mitsuteru¹

¹ 北海道大学・宇宙理学専攻

¹Department of CosmoSciences, Hokkaido University

Recently the relationship between the global circuit and solar-climate connection was pointed out. Here we introduce an example, which indicates the roles of thunderstorm or its resultant electric circuit in solar-climate connection. Global relationship between thunderstorm/cloud activities and solar parameters are examined based on lightning measurement by Global ELF observation Network (GEON) operated by Hokkaido University and Outgoing Longwave Radiation (OLR) intensity. It was found that the number of lightning strokes in Asia Maritime Continent (AMC) varies with about month periodicity in the period from February to June 2004 and shows positive correlation ($R \sim 0.8$) with OLR in the Western Pacific Warm Pool (WPWP). On the other hand, OLRs in the central Africa and some other tropical areas show negative correlation with the number of lightning strokes in the AMC in that period. It is also found that the galactic cosmic rays or UV intensity associated with solar activity indicates good correlation with tropical OLR or lightning activity in AMC. One explanation to connect such global variations in thunderstorm / cloud amount with solar parameters would be the electrical circuit involving lower and upper atmospheres. Global electric circuit model was proposed long time ago, in 1930s, in which thunderstorm plays a role of generator, and the ground and the ionosphere work as a spherical capacitor. However, now we need to reconstruct this simple model, taking into account 3 aspects: 1) global-scale nonuniformities both of ionospheric conductivity and of the distribution of the generators, 2) connections between the troposphere and D-region, considering the effects of TLEs, such sprites and blue jets, 3) establishing the observational methodology for global electric field, excluding the effect of cloud existing just above the observation sites. If the ionospheric electric field modulates the potential gradient in the lower atmosphere, it could cause the re-distribution of ionized atmospheric particles, which may, in turn, change the generation / reduction speed of cloud particles.

キーワード: 積乱雲, OLR, 太陽活動, 1ヶ月変動

Keywords: thunderstorm, OLR, solar activity, one-month periodicity

太陽風の気候影響－ QBO の関与などについて Influence of solar wind on climate: On the factors such as Quasi Biennial Oscillation

伊藤 公紀^{1*}; 松尾 慎也¹; 山下 和良¹
ITO, Kiminori^{1*}; MATSUO, Shinya¹; YAMASHITA, Kazuyoshi¹

¹ 横浜国立大学環境情報研究院

¹Yokohama National University, Graduate School of Env. & Inf. Sciences

長い研究の歴史にも関わらず、太陽変動の気候影響は未だ解明を見ていない。我々は、太陽活動指標として特に太陽風パラメータに着目してきた。その結果、成層圏から対流圏、地表において、 $P\alpha$ (磁気圏が太陽風から取り込むエネルギー) や aa インデックスなどの太陽風パラメータと気温との相関をある程度示すことができた。詳細を探るために、QBO (赤道域成層圏準二年振動) の関与、OLR (Outgoing Longwave Radiation) などの検討を進めている。例えば、OLR では 1979-2010 年の 1 月について、 $P\alpha$ との相関が高い地域が存在する。QBO 東風時には、インドネシア付近で相関係数 $r = 0.76$ が見出された。西風時の相関地図は、北極振動のパターンと類似しており、シベリア域では $r = 0.81$ であった。

キーワード: 太陽風, 気候, 外向き長波放射 (OLR), 赤道域成層圏準二年振動 (QBO), 温度
Keywords: Solar wind, climate, QBO, OLR, temperature

宇宙線による雲凝結核生成促進についての複数線源での検証実験 Laboratory experiment with various radiation sources for verification of cloud condensation nucleation by cosmic rays

鈴木 麻未^{1*}; 増田 公明¹; 竹内 雄也¹; 伊藤 好孝¹; さこ 隆志¹; 松見 豊¹; 中山 智喜¹; 上田 紗也子¹; 三浦 和彦²; 草野 完也¹
SUZUKI, Asami^{1*}; MASUDA, Kimiaki¹; TAKEUCHI, Yuya¹; ITOW, Yoshitaka¹; SAKO, Takashi¹; MATSUMI, Yutaka¹; NAKAYAMA, Tomoki¹; UEDA, Sayako¹; MIURA, Kazuhiko²; KUSANO, Kanya¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 東京理科大学

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Tokyo university of science

It is considered that the solar activity may affect the global climate, but the correlation mechanism is still not understood.

One of the possible mechanisms for the correlation is the cloud formation by the galactic cosmic rays, which are modulated by the variation of solar activity. This relation was clearly indicated by the good correlation observed for the galactic cosmic-ray intensity and the global low-cloud amount.

This hypothesis includes the ion-induced nucleation model, in which new particles in the atmosphere are created efficiently through atmospheric ions produced by cosmic rays, and finally these particles grow up to the size of cloud condensation nuclei.

In this study, a laboratory experiment for verification of the hypothesis has been conducted with a reaction chamber. A flow of clean air, water vapor, ozone and sulfuric dioxide was introduced to a metallic chamber, where we irradiated UV light for solar irradiance and beta-rays or accelerator beam for cosmic rays. The beam of the heavy ion accelerator HIMAC at National Institute of Radiological Sciences was used in the present experiment.

As a result, ions produced by the ionizing radiation and increased particle density were observed for beta rays.

Some results with the accelerator beam are the following.

Ion density in the chamber increased as the beam intensity and particle density increased with ion density.

Particle size distribution was measured and the peak particle size and the particle density became to larger with time after start irradiation, but the density stopped to increase or decreased after irradiation stopped although the peak size continued to increase.

It is shown that our system is ready for more detailed measurements.

キーワード: 宇宙線, 雲, 宇宙気候学, 雲凝結核

Keywords: cosmic rays, cloud, cosmo-climatology, cloud condensation nuclei

太陽ダイナモの南北半球対称性の破れに関する研究 Study on symmetry-breaking between the northern and southern hemispheres of the solar dynamo

宿谷 大志^{1*}; 草野 完也¹

SHUKUYA, Daishi^{1*}; KUSANO, Kanya¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

Solar dynamo is a mechanism whereby the kinetic energy of the plasma in the sun is converted to the magnetic energy. This mechanism works to generate and maintain all solar magnetic activities. Because the Earth's climate can be influenced by solar activities, variability of the solar dynamo is an important issue to understand long-term evolution of the Earth's climate.

Comparisons of the solar activities in each solar hemisphere show hemispheric asymmetry. Sunspots were found preferentially in one hemisphere and not the other in often long periods of time (Spoerer, 1889; Maunder, 1890, 1904). This asymmetry was extended to other measures of activity including faculae, prominences and flares (Waldmeier, 1971; Roy, 1977). The asymmetry happens in the solar polar magnetic field reversals. The polarity of the solar magnetic fields on the north and south poles periodically reverses at every sunspot maxima. However, the reversals at both poles actually don't occur at the same time. In other words, the reversal at one pole is followed by that on the other pole. This time difference of magnetic field reversals between the poles was first noted by Babcock (1959) from the very first observation of polar field. Recently, it was confirmed by detailed observations with the HINODE satellite (Shiota et al. 2012). As above, we have ever obtained many observation facts. However, the mechanisms of hemispheric asymmetry of the solar dynamo haven't been revealed theoretically yet.

In this paper, we study the asymmetric feature of the solar dynamo based on the flux transport dynamo model (Chatterjee et al. 2004) to explain the time difference of magnetic polarity reversal between the north and south poles. In order to calculate long-term variations of solar activities, we use the mean field kinematic dynamo model, which is derived from magnetohydrodynamics (MHD) equation through the mean field and other approximations. We carried out the mean field dynamo simulations using the updated SURYA code which was developed originally by Choudhuri and his collaborators (2004). We decomposed the symmetric and asymmetric components of magnetic field, which correspond respectively to the quadrupole and dipole-like components (Nishikawa and Kusano 2008), and analyzed the phase relation between them. As a result, we found that the two components are mixed even if the dipole-like component is predominant and that the two components spontaneously form 90 or -90 degree out of phase oscillation. The solutions with 90 and -90 degree out of phase oscillation form the different attracters of dynamo solutions. We found that the time difference of the polar field reversals between the different hemispheres can be explained by the out of phase relation between the different components of magnetic field.

キーワード: 極域磁場反転, 太陽ダイナモ, 数値シミュレーション, 南北非対称性

Keywords: polar field reversal, solar dynamo, numerical simulation, hemispheric asymmetry

マウンダー極小期の太陽磁場サイクルに対する中部日本・台湾の気候応答 Climate responses in central Japan and Taiwan to the cosmic ray intensifications during the Maunder Minimum

坂下 渉^{1*}; 横山 祐典¹; 宮原 ひろ子²; 阿瀬 貴博³; 米延 仁志⁴; 大山 幹成⁵; 星野 安治⁶; 中塚 武⁷
SAKASHITA, Wataru^{1*}; YOKOYAMA, Yusuke¹; MIYAHARA, Hiroko²; AZE, Takahiro³; YONENOBU, Hitoshi⁴; OHYAMA, Motonari⁵; HOSHINO, Yasuharu⁶; NAKATSUKA, Takeshi⁷

¹ 東京大学 大気海洋研究所 海洋底科学部門, ² 武蔵野美術大学造形学部, ³ 東京工業大学大学院理工学研究科理学研究流動機構, ⁴ 鳴門教育大学大学院学校教育研究科, ⁵ 東北大学学術資源研究公開センター植物園, ⁶ 奈良文化財研究所, ⁷ 総合地球環境学研究所

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, ² College of Art and Design, Musashino Art University, ³ Interactive Research Center of Science, Tokyo Institute of Technology, ⁴ Graduate School of Education, Naruto University of Education, ⁵ The Center for Academic Resources and Archives, Botanical Gardens, Tohoku University, ⁶ National Research Institute for Cultural Properties, Nara, ⁷ Research Institute for Humanity and Nature

Relationship between solar variations and climate has been long discussed for various time scales. It is difficult to distinguish the impacts of the multiple solar parameters (total solar irradiance (TSI), solar ultraviolet (UV) radiation, and galactic cosmic rays (GCRs)) on climate, because these variations are nearly synchronized. However, GCR fluctuations related to solar magnetic activity have slightly different features compared to the other external forcing factors (TSI, UV). According to previous studies, the cosmic ray fluctuation was particularly unique during the Maunder Minimum (A. D. 1645-1715), when almost no sunspots were observed. Annually measured tree-ring $\Delta^{14}\text{C}$ and ice-core ^{10}Be data have shown that decadal variations of GCRs had been remarkably amplified during the Maunder Minimum. This characteristic amplification may be utilized to shed light on the GCR influence on climate.

In this study, we employ tree rings that can reconstruct both annual climate ($\delta^{18}\text{O}$) and cosmic ray fluctuations ($\Delta^{14}\text{C}$) during the Maunder Minimum. By using these proxies, we can directly compare these reconstructions without any dating error. Annually measured tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ records from central Japan have shown significant wet climate at every remarkable GCRs enhancement. On the other hand, there is no significant climate response in tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ record from Taiwan. We suggest that these climate responses may be related to a stationary position of the Baiu front. Recent satellite observations have shown that GCRs may cause the increase of low cloud amount at tropical western Pacific region. It can be suggested that cooling of tropical western Pacific region caused by GCR enhancement might have caused the weakening of Pacific high and indirectly brought wet rainy seasons in central Japan.

キーワード: 太陽磁場活動, 銀河宇宙線, マウンダー極小期, 年輪同位体

Keywords: Solar Magnetic Activity, Galactic Cosmic Ray, The Maunder Minimum, Tree-ring isotope

データ同化による放射線帯変動メカニズムの動的推定 Dynamical estimation of external/internal acceleration processes of the outer radiation belt using data assimilation

三好 由純^{1*}; 外山 晴途¹; 上野 玄太²; 越石 英樹³; 松本 晴久³; 塩川 和夫¹
MIYOSHI, Yoshizumi^{1*}; TOYAMA, Haruto¹; UENO, Genta²; KOSHIISHI, Hideki³; MATSUMOTO, Haruhisa³; SH-IOKAWA, Kazuo¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 統計数理研究所, ³ 宇宙航空研究開発機構
¹STEL, Nagoya University, ²The Institute of Statistical Mathematics, ³JAXA

Dynamical evolution of the outer belts should be a delicate balance among several processes. It has been believed that there exist two different acceleration mechanisms: the radial diffusion as the external source process, and the non-adiabatic wave particle interactions as the internal source process. In order to discriminate when and where these processes are dominant for the large flux enhancement of the outer belt electrons, we have developed a data assimilation code on the outer belt electrons. In our data assimilation, the particle filter and the particle smoother are used which are effective for non-linear/non-Gaussian distribution problems. We include the radial diffusion coefficient and the internal source model in the state vector and estimate the dynamical variations of these parameters. The Tsubasa satellite electron data are used as the observation vector. The results indicate that only the radial diffusion process is always too small to explain the observed flux enhancement and the internal source process should be necessary. The assimilation result suggests that the internal source process tend to take place around the storm recovery phase, which is consistent with the observations.

キーワード: 放射線帯, データ同化
Keywords: radiation belts, data assimilation

静止軌道放射線帯電子予測モデルの評価 Evaluation of Relativistic Electron Flux Forecast at GEO Satellite

長妻 努^{1*}; 坂口 歌織¹; 齊藤 慎司²; 三好 由純²; 関 華奈子²
NAGATSUMA, Tsutomu^{1*}; SAKAGUCHI, Kaori¹; SAITO, Shinji²; MIYOSHI, Yoshizumi²; SEKI, Kanako²

¹ 情報通信研究機構, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹National Institute of Information and Communications Technology, ²Solar Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

We have developed near real time prediction model for relativistic electron flux at GEO satellite. This model is based on a multivariate autoregressive model with using solar wind speed, north-south component of the magnetic field and dynamic pressure as inputs. Detailed description of this model can be found in Sakaguchi et al. [2013]. We have started relativistic electron flux forecast service as a test product since Apr. 2013. Forecast information can be found in the following web pages (URL: <http://seg-web.nict.go.jp/radi/>).

There are several difficulties in operating a near-real time forecast model. One is the quality of the real-time solar wind data. Because quality of real-time solar wind density data is quite poor, we avoid using solar wind density data for our operational model. The other one is the lead-time of the solar wind data. Currently, we can use only ACE data for solar wind input. The lead-time of this data is only about one hour. Therefore, we also 'predict' solar wind condition for two or three days in advance from current solar wind information. Anyway, prediction efficiencies of our forecast for 1day, 2day, and 3day ahead in 2013 are 81%, 63%, 48%, respectively. Evaluation and future perspective of our forecasting model will be introduced in our presentation.

Reference:

Sakaguchi, K., Y. Miyoshi, S. Saito, T. Nagatsuma, K. Seki and K. T. Murata (2013), Relativistic electron flux forecast at geostationary orbit using Kalman filter based on multivariate autoregressive model, *Space Weather*, 11, 79?89, doi:10.1002/swe.20020.

キーワード: 宇宙天気予報, 太陽風-磁気圏相互作用, 磁気圏, 放射線帯, 内部磁気圏, モデリング

Keywords: Space Weather Forecast, Solar Wind - Magnetosphere Interaction, Magnetosphere, Radiation Belt, Inner Magnetosphere, Modeling

Maps of ionospheric conductances, currents, and convection from the Swarm multi-satellite mission Maps of ionospheric conductances, currents, and convection from the Swarm multi-satellite mission

AMM, Olaf^{1*}; VANHAMAKI, Heikki¹; KAURISTIE, Kirsti¹; STOLLE, Claudia⁴; CHRISTIANSEN, Freddy³; HAAGMANS, Roger⁵; MASSON, Arnaud⁶; TAYLOR, Matt⁵; FLOBERGHAGEN, Rune⁷; ESCOUBET, Philippe⁵
AMM, Olaf^{1*}; VANHAMAKI, Heikki¹; KAURISTIE, Kirsti¹; STOLLE, Claudia⁴; CHRISTIANSEN, Freddy³; HAAGMANS, Roger⁵; MASSON, Arnaud⁶; TAYLOR, Matt⁵; FLOBERGHAGEN, Rune⁷; ESCOUBET, Philippe⁵

¹Finnish Meteorological Institute, Arctic Research Unit, Helsinki, Finland., ²STEL, Nagoya University, Japan, ³Technical University of Denmark, DTU Space, Lyngby, Denmark, ⁴Helmholtz-Centre Potsdam, GFZ German Research Center for Geosciences, Germany, ⁵ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, ⁶ESAC, Madrid, Spain, ⁷Directorate of Earth Observation Programmes, ESRIN, Frascati, Italy

¹Finnish Meteorological Institute, Arctic Research Unit, Helsinki, Finland., ²STEL, Nagoya University, Japan, ³Technical University of Denmark, DTU Space, Lyngby, Denmark, ⁴Helmholtz-Centre Potsdam, GFZ German Research Center for Geosciences, Germany, ⁵ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, ⁶ESAC, Madrid, Spain, ⁷Directorate of Earth Observation Programmes, ESRIN, Frascati, Italy

The recently launched ESA Swarm spacecraft mission is the first dedicated multi-satellite ionospheric mission with two low-orbiting spacecraft that are flying in parallel in a distance of ~100 km, thus allowing to derive spatial gradients of ionospheric parameters not only along the orbits, but also in the direction perpendicular to them. In addition, a third satellite with a slightly higher orbit regularly crosses the paths of the lower spacecraft pair. Using the Swarm magnetic and electric field instruments, we present a novel technique that allows to derive 2-dimensional (2D) maps of ionospheric conductances, currents, and convection in the area between the trajectories of the two parallel flying spacecraft, and even to some extent outside of it. This technique is based on Spherical Elementary Current Systems (SECS). We present several test cases of modelled ionospheric situations from which we calculate virtual Swarm data, and show that the technique is able to reconstruct the model electric field (or convection), horizontal currents, and conductances with very good to excellent accuracy. Larger errors arise for the reconstruction of the 2D field-aligned currents (FAC) map, especially in the area outside of the spacecraft orbits. However, even in this case the general pattern of the model FAC is recovered, and the magnitudes are valid in an integrated sense. Finally, using an MHD model run, we show how our technique allows to estimate the ionosphere-magnetosphere coupling parameter K, if conjugate multi-point observations of the magnetospheric magnetic and electric field are available, as they can be obtained, e.g., from the ESA Cluster mission.

キーワード: ionosphere, ionospheric electrodynamics, ionospheric currents, ionospheric convection, magnetosphere-ionosphere coupling, Swarm mission

Keywords: ionosphere, ionospheric electrodynamics, ionospheric currents, ionospheric convection, magnetosphere-ionosphere coupling, Swarm mission

MLT and seasonal dependence of auroral electrojets: IMAGE magnetometer network observations
MLT and seasonal dependence of auroral electrojets: IMAGE magnetometer network observations

GUO, Jianpeng^{1*} ; LIU, Huixin²
GUO, Jianpeng^{1*} ; LIU, Huixin²

¹SIGMA Weather Group, State Key Laboratory of Space Weather, CSSAR, Chinese Academy of Sciences, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

¹SIGMA Weather Group, State Key Laboratory of Space Weather, CSSAR, Chinese Academy of Sciences, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

Total eastward and westward electrojet currents (EEJ and WEJ) and their central latitudes derived from the IMAGE network magnetic measurements are analyzed for the combined MLT and seasonal dependence during the period 1995-2009. EEJ shows a strong MLT variation with significant dependence on season. During summer months the maxima occur around 1600-1800 MLT, whereas during winter months the maxima occur at a later local time sector around 1800-2000 MLT. Moreover, the summer maxima are much larger than the winter maxima, and appear at higher latitudes. The summer maxima are mainly associated with the solar EUV conductivity effect, while the winter maxima are mainly due to the contribution of northward convective electric field. EEJ exhibits a dominant annual variation with maximum in summer and minimum in winter. WEJ also exhibits a strong MLT variation with significant dependence on season. The maxima occur around 0200-0400 MLT during summer months, around 0000-0200 MLT during winter months, and around 0000-0400 MLT during equinoctial months. Moreover, the equinoctial maxima are much larger than the summer and winter maxima, and appear at relatively lower latitudes. The seasonal variations in WEJ are the combinations of annual variations and semiannual variations. Both annual and semiannual variations show significant dependence on MLT. These results increase our knowledge on what factors contribute to the auroral electrojets as well as their magnetic signatures, and hence help us better understand the limitations of global auroral electrojet indices, such as the AE and SME indices.

南極昭和基地で観測された中間圏・下部熱圏のNOの変動 Temporal variations of nitric oxide in the mesosphere and lower thermosphere over Syowa station, Antarctica

磯野 靖子¹; 水野 亮^{1*}; 長浜 智生¹; 三好 由純¹; 中村 卓司²; 片岡 龍峰²; 堤 雅基²; 江尻 省²; 藤原 均³; 前澤 裕之⁴; 上村 美久¹

ISONO, Yasuko¹; MIZUNO, Akira^{1*}; NAGAHAMA, Tomoo¹; MIYOSHI, Yoshizumi¹; NAKAMURA, Takuji²; KATAOKA, Ryuho²; TSUTSUMI, Masaki²; EJIRI, Mitsumu²; FUJIWARA, Hitoshi³; MAEZAWA, Hiroyuki⁴; UEMURA, Miku¹

¹ 名古屋大学 太陽地球環境研究所, ² 国立極地研究所, ³ 成蹊大学, ⁴ 大阪府立大学

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²National Institute of Polar Research, ³Seikei University, ⁴Osaka Prefecture University

Energetic particle precipitation (EPP) related to solar proton events or geomagnetic storms induce ion-neutral reactions and change abundance of some minor molecules such as NO_x and HO_x in the mesosphere and lower thermosphere. To investigate the temporal variations of NO by EPP, we installed a millimeter-wave spectroscopic radiometer at Syowa Station (69.00S, 39.85E), and we have carried out ground-based observations of spectral line of nitric oxide (NO) at 250.796 GHz since January 2012.

We obtained 197 and 172 daily averaged NO spectra in 2012 and 2013 (until 30 September; DOY 273), respectively. The daily NO spectra are characterized by narrow line width with a Full-Width-at-Half-Maximum (FWHM) of about 0.5 MHz. These NO spectra are well fitted by a single Gauss function or by a single Lorenz function. From the spectral line shape, we conclude that the NO emitting region is between 75 and 100 km.

We found two temporal variation patterns of NO column density. One is a seasonal variation with a maximum in the winter and a minimum in the summer. The column density of NO during the winter was about 4 times larger than that during the summer. This seasonal variation is considered to be related to the atmospheric transport and the NO dissociation by solar radiation. The other is the short-term variation in a timeframe of 5-10 days associated with EPP events such as solar proton events and geomagnetic storms. At Syowa Station, short-term variations were caused mainly by the precipitation of electrons rather than that of protons. In the electron precipitation events, the column density of NO gradually increases just after the main phase of the geomagnetic storm and gradually decreases soon after its peak.

One of the short-term events related to a large geomagnetic storm in April 2012 was the most prominent single event among those observed at Syowa Station since January 2012. From the high time resolution (~ 3-hour) data, we revealed a diurnal tendency that NO column density increased about twice at UT 0, which is interpreted to be caused by the dawn-dusk asymmetry of the precipitated electrons with energies 30-300 keV.

Keywords: Nitric oxide, mesosphere and lower thermosphere, energetic particle precipitation, geomagnetic storm, solar proton event, Antarctica

The Impacts of Space Weather on Society and the Economy The Impacts of Space Weather on Society and the Economy

Baker Daniel N.^{1*}
BAKER, Daniel N.^{1*}

¹University of Colorado Boulder
¹University of Colorado Boulder

This presentation describes possible extreme space weather impacts and their economic and societal costs. Modern society depends heavily on a variety of technologies that are vulnerable to the effects of intense geomagnetic storms and solar energetic particle (SEP) events. Strong currents flowing in the ionosphere can disrupt and damage Earth-based electric power grids and contribute to the accelerated corrosion of oil and gas pipelines. Magnetic storm-driven ionospheric disturbances interfere with high-frequency radio communications and navigation signals from Global Positioning System (GPS) satellites. Exposure of spacecraft to solar particles and radiation belt enhancements can cause temporary operational anomalies, damage critical electronics, degrade solar arrays, and blind optical systems such as imagers and star trackers. Moreover, intense SEP events present a significant radiation hazard for astronauts during the high-latitude segment of the International Space Station (ISS) orbit as well as for future human explorers of the Moon and Mars. In addition to such direct effects as spacecraft anomalies or power grid outages, a thorough assessment of the impact of severe space weather events on present-day society must include the collateral effects of space-weather-driven technology failures. For example, polar cap absorption events due to solar particles can degrade — and, during severe events, completely black out — radio communications along transpolar aviation routes, requiring aircraft flying these routes to be diverted to lower latitudes. This can add considerable cost to the airlines and can greatly inconvenience passengers. Modern technological society is characterized by a complex set of interdependencies among its critical infrastructures. A complete picture of the socioeconomic impact of severe space weather must include both direct as well as collateral effects of space-weather-driven technology failures on dependent infrastructures and services.

キーワード: Space weather, Electric power grids, Radiation hazards, Infrastructure interdependencies, Socioeconomic impact of severe space weather
Keywords: Space weather, Electric power grids, Radiation hazards, Infrastructure interdependencies, Socioeconomic impact of severe space weather

GEMSIS-Sun Numerical Model of Sun-Earth System (SUSANOO): Application for Extremely Strong IMF CMEs GEMSIS-Sun Numerical Model of Sun-Earth System (SUSANOO): Application for Extremely Strong IMF CMEs

塩田 大幸^{1*}; 片岡 龍峰²; 三好 由純¹; 草野 完也¹
SHIOTA, Daikou^{1*}; KATAOKA, Ryuho²; MIYOSHI, Yoshizumi¹; KUSANO, Kanya¹

¹名古屋大学太陽地球環境研究所, ²国立極地研究所
¹STEL, Nagoya University, ²National Institute of Polar Research

Solar wind including coronal mass ejections (CMEs) is a main driver of various space weather disturbances. MHD modeling of the solar wind is a powerful tool to understand the solar-terrestrial environment and to forecast space weather accurately. Recently, we developed an MHD model of the inner heliosphere on the basis of minimal input, namely, time series of daily synoptic observation of the photospheric magnetic field. The time series of MHD parameters at the Earth position is passed to a radiation belt model [Miyoshi et al. 2004] for forecasting of the radiation belt energetic electron flux. These programs are executed everyday on a server in STEL, Nagoya University and the results are uploaded on the web site (<http://st4a.stelab.nagoya-u.ac.jp/susanoo/>). This system is named as Space-weather-forecast-Usable System Anchored by Numerical Operations and Observations (SUSANOO).

Carrington event that occurred in September 1859 is the most violent solar storm in the human records. Since the magnetic storm associated with the event influenced globally, aurora was observed in wide area in the world. The magnetic response recorded in Bombay shows a rapid decrease of -1600 nT / h (Tsurutani et al. 2003). The induced electric field to explain the rapid decrease in the ground level is estimated to be 355 mV/m associated with a magnetic cloud influence. The time lag between onsets of solar flare and sudden commencement is 17.5 hours, and therefore shock propagation speed is estimated as 2380 km/s. The magnetic field strength in the associated magnetic cloud is needed to be 150nT. However, it is not clear how such a strong magnetic field can be kept while the strength of ordinary interplanetary magnetic field (IMF) is the order of 10 nT at 1 au.

In order to examine which condition of coronal mass ejections (CMEs) associated with an extreme event such as the Carrington event should be satisfied, we modeled a series of CMEs with the inner heliosphere MHD simulation (used in SUSANOO). In the model, multiple CMEs are injected as a twisted magnetic flux rope accompanying with a velocity pulse through the inner boundary of the simulation and propagate into the solar winds. Because there is almost no information associated with the Carrington event and the solar wind, instead, we used observational data of CMEs associated recent large-scale active regions: NOAA 10486 in October to November 2003 (Halloween event) and NOAA 11520 in July 2012 (far side STEREO event, Russell et al. 2013). Only fast ($V > \sim 1000$ km/s) and wide (angular width > 60 degree) CME data are extracted from LASCO CME catalog (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). As a result, the strength of compressed magnetic field becomes as high as about four times of background IMF when a CME interacts with the background solar wind. However, successive CMEs interact with each other to form much stronger magnetic field due to compression of the magnetic cloud of the preceding CME by shock associated the following CME.

キーワード: MHD, コロナ質量放出, 太陽風, 惑星間磁場, 磁気嵐, 放射線帯
Keywords: MHD, coronal mass ejection, solar wind, IMF, geomagnetic storm, radiation belt

太陽と同じくらいの自転周期を持つ2つの太陽類似スーパーフレア星の発見 Discovery of Two Sun-like Superflare Stars Rotating as Slow as the Sun

野上 大作^{1*}; 野津 湧太¹; 本田 敏志²; 前原 裕之³; 野津 翔太¹; 柴山 拓也¹; 柴田 一成¹
NOGAMI, Daisaku^{1*}; NOTSU, Yuta¹; HONDA, Satoshi²; MAEHARA, Hiroyuki³; NOTSU, Shota¹; SHIBAYAMA, Takuya¹
; SHIBATA, Kazunari¹

¹ 京都大学, ² 兵庫県立大学, ³ 東京大学

¹ Kyoto University, ² University of Hyogo, ³ The University of Tokyo

本講演では、2つの「スーパーフレア星」KIC 9766237 と KIC 9944137 の、すばる望遠鏡/高分散分光装置 (HDS) での観測結果を報告する。スーパーフレア星は太陽と同じG型主系列星だが、太陽に比べて非常に大きなフレアを起こす天体で、ケプラー衛星で得られたデータからごく最近発見された。明るさの変化を調べることにより、それらの星の多くは10日以下の自転周期を持つと考えられているが、この2つの星の星の自転周期は21.8日と25.3日と推定されていた。我々の観測により、有効温度、表面重力、金属量の点で、この2つの星は太陽に非常に近い性質を持っていることが明らかになった。また明るさの変化から推定された自転周期から考えられる自転速度と、分光観測から求められた射影自転速度が近く、自転軸の視線速度に対する傾斜角はかなり高いことがわかる。Ca II 8542の吸収線を使う方法で、これらの星表面の平均磁場強度は1-20 Gauss程度と、太陽と同程度かやや大きいくらいと推定される。観測にかからない低質量の伴星がある可能性を否定するためにはさらなる観測が必要だが、我々のデータには連星である証拠は見られなかった。今回の観測結果は、KIC 9766237 と KIC 9944137 が太陽と非常に近い分光学的性質を持つことを示しており、太陽でもスーパーフレアが起こるといふ可能性を支持するものである。

キーワード: 太陽型星, スーパーフレア, 高分散分光観測

Keywords: Sun-like stars, superflares, high dispersion spectroscopy

航空機運航における宇宙天気情報 Cosmic-ray exposure Space weather information during aircraft operation

阿久津 烈^{1*}; 浅田 和秋¹
AKUTSU, Retsu^{1*}; ASADA, Kazuaki¹

¹ 日本乗員組合連絡会議

¹ Airline Pilots' Association of Japan

Effects of exposure to cosmic-ray during aircraft operation are divided into exposure of aircrew and operational impact.

International Commission on Radiological Protection (ICRP) issued a recommendation to include occupational exposure of aircrew with a jet operated exposure from natural radiation source in 1990. Radiation Council consists of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, the Ministry of Health, Labour and Welfare, the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism established Guidelines for management of aircrew exposure to cosmic radiation in 2006. In response to this, airlines keep record of assessed doses on each aircrew using Japanese Internet System for Calculation of Aviation Route Doses (JISCARD-EX) developed by National Institute of Radiological Sciences (NIRS).

Impacts of space weather on aircraft operations can be classified into communications and navigations.

For communication, it includes difficulties on HF radio due to Dellinger Phenomenon while flying out of range of VHF coverages

as international flight. And also includes difficulties on SATCOM voice communication and Controller Pilot Data Link Communication (CPDLC) in oceanic region.

Modern navigation by Global Navigation Satellite System (GNSS) is becoming mainstream. GNSS are used all phase of aircraft operation during on the ground, departure, en-route, and approach. Future of operations aim high category precision approach using automatic approach and landing by GNSS even extremely low visibility until stop on runway. Cosmic-ray re-write the data in memory known as soft error on electronic equipment onboard aircrafts.

Use of SpaceWeather forecast, how to provide the information to aircrew and how to make decisions are urgent consideration.

For these problems International Airways VolcanoWatch Operations Group (IAWOPSG) which one of operations group of International Civil Aviation Organization (ICAO) is making draft Concept of Operations (ConOps) for international space weather information in support of international air navigation. Adoption of ConOps is targeted for ICAO/WMO divisional meeting in 2014.

宇宙飛行士の放射線被ばく管理運用 Radiation exposure management for astronauts

松村 智英美^{1*}; 佐藤 勝¹; 金子 祐樹¹; 緒方 克彦¹
MATSUMURA, Chiemi^{1*}; SATO, Masaru¹; KANEKO, Yuki¹; OGATA, Katsuhiko¹

¹ 宇宙航空研究開発機構

¹JAXA

地上から約400km上空を飛行する有人宇宙施設である宇宙国際ステーション (International Space Station; ISS) では、宇宙放射線により人体被ばくし、その量は一日で約0.5~1mSv (地上の約半年分) におよぶ。

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、宇宙放射線等による健康への影響を最小限に抑えるために、ISSに参加する各機関と協力し、宇宙放射線被ばく管理運用を行っている。

特に日本人宇宙飛行士のISS搭乗中の被ばく管理運用においては、変動する宇宙環境に即時の対応が必要となるため、宇宙環境監視と宇宙天気予報による情報取得は必須である。現在行っている Expedition 38/39 の被ばく管理運用において、JAXAとして初めて Contingency (国際的な Flight Rule に基づく) を経験した。この経験では、宇宙環境情報の必要性を再認識した。

本発表では、宇宙放射線被ばく管理運用の概要と現状について紹介する。

キーワード: 宇宙飛行士, 被ばく管理, 宇宙放射線被ばく

Keywords: Astronaut, Space radiation exposure

新リアルタイム太陽風データ受信アンテナシステムについて On a new antenna system for reception of real-time solar wind data

巨 慎一^{1*}; 久保 勇樹¹; 石井 守¹
WATARI, Shinichi^{1*}; KUBO, Yuki¹; ISHII, Mamoru¹

¹ 情報通信研究機構

¹National Institute of Information and Communications Technology

太陽風の直接観測データは、太陽風擾乱による地球磁気圏や電離圏への影響を評価したり、擾乱の原因となった太陽面現象を調べたりする際に宇宙天気にとって重要なデータである。情報通信研究機構では、1997年からL1点で太陽風の直接観測を行っているACE (Advanced Composition Explorer) のリアルタイム太陽風データの受信を行い、データの24時間取得に貢献している。ACEの後継としてDSCOVR (Deep Space Climate Observer) が2014年の後半に打ち上げられることになった。そこで、情報通信研究機構では、受信アンテナシステムの更新を行い、DSCOVRからのリアルタイム太陽風受信も行えるようにした。本講演では、2013年度に整備した新しい受信アンテナシステムの詳細とリアルタイム太陽風データの利用について報告を行う。

キーワード: 太陽風, 宇宙天気, L1, ACE, DSCOVR
Keywords: solar wind, space weather, L1, ACE, DSCOVR

宇宙放射線によるあけぼの太陽電池劣化と温度変動の効果 Solar cell degradation of Akebono satellite due to space radiation and effect of temperature variation

三宅 互^{1*}; 三好 由純²; 松岡 彩子³
MIYAKE, Wataru^{1*}; MIYOSHI, Yoshizumi²; MATSUOKA, Ayako³

¹ 東海大工, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 宇宙科学研究所

¹Tokai University, ²Solar Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ³Institute of Space and Astronautical Science

衛星の太陽電池は、宇宙空間の放射線などにより劣化し出力が低下していく。今までの研究から、あけぼの衛星の太陽電池出力の低下は、衛星が浴びる放射線帯プロトンのフラックス量と、良く対応していることが確認されてきた。その対応関係を利用して、プロトン放射線帯の中心部を含めたフラックスの分布のモニターとして利用できることが示されてきた。このプロトン放射線帯との関連は、衛星打ち上げの 1989 年から 1996 年まで追跡可能であるが、その後は、対応関係は判然とはしていない。今までの研究からは、劣化が進行した結果として、温度変動の効果がより顕著に現れるようになったことがその原因であると、推測されている。放射線帯のモニターとしての利用をより推し進めるためには、この温度効果を定量的に把握し、放射線帯だけによる変動を精度よく抽出することが必要である。残念ながら太陽電池の温度センサーは 1991 年に異常となり、それ以降は太陽電池の温度を直接に知ることはできない。そこで、本研究では 1989 年から 1991 年までのデータを使い、衛星の他の表面部位の温度から、太陽電池の温度を推定・算出することを試みている。ここで確立された手法により、直接測定された太陽電池温度が存在しない 1991 年以降において、推定・算出された温度と太陽電池出力値を対応させ、その対応関係の経年変化から、放射線帯プロトンフラックスによる劣化成分を抽出する試みを報告する。

キーワード: あけぼの衛星, プロトン放射線帯
Keywords: Akebono satellite, proton radiation belt

ビッグデータ分析手法を用いた宇宙天気予報アルゴリズムの開発 Development of space weather prediction algorithm using big data analysis

羽田 裕子^{1*}; 村主 崇行¹; 柴山 拓也¹; 磯部 洋明¹; 根本 茂²; 柴田 一成¹
 HADA MURANUSHI, Yuko^{1*}; MURANUSHI, Takayuki¹; SHIBAYAMA, Takuya¹; ISOBE, Hiroaki¹; NEMOTO, Shigeru²
 ; SHIBATA, Kazunari¹

¹ 京都大学, ² 株式会社ブロードバンドタワー

¹Kyoto University, ²BroadBand Tower, Inc.

太陽フレアやコロナ質量放出の発生を予測・予報をする上で、それを全自動化する事は宇宙天気予報研究における大きな目標の1つである。例えば、黒点の形状などから観測される物理量とフレア発生の相関から経験則を導くものなどがあり、今日まで様々な予測研究がなされている。それらには常に人手の介入を必要としてきた。

近年、技術の発展と共に衛星や観測機器の精度が上がり、観測データは飛躍的に増大しているため、全データを人間が直接見る事は不可能になってきている。一方で、情報処理技術の分野ではいわゆるビッグデータ解析が急速に発展しており、並列分散処理による大量の非構造データの処理や機械学習の手法が社会の様々な分野で広く利用されるようになってきた。そこで我々は、このような大容量データを余す事なく宇宙天気予報研究に利用できるよう、完全に自動化されたフレア予測実現を目指す研究を始めた。具体的には、GOES 衛星 (Geostationary Operational Environmental Satellite) による X 線フラックスの、現時点から 24 時間未来までの最大値を予測する事を目標とした。

まず、GOES の過去のデータと SDO(Solar Dynamics Observatory) による全球磁場データ (Helioseismic and Magnetic Imager: HMI) から、GOES の X 線フラックスを予測する研究を進め、HSS(Heidke Skill Score) と TSS(True Skill Statistic) を用いてフレア予測精度を評価した (図参照)。次に、GOES と HMI を合わせたデータに、SDO に搭載されている AIA(Atmospheric Imaging Assembly) によって観測された極端紫外線データ (波長: 193Å) を加えた場合についても同様に予測精度を評価した。

AIA によるデータを加えた理由は2つである。1つ目は、SOHO(Solar and Heliospheric Observatory) による極端紫外線全球画像データを使ったフレア予測研究によれば、活動領域の極端紫外線画像の閾値つき積分が、活動領域ごとのフレア活動度の良い指標になっているという結果が得られているからである。2つ目は、太陽のリムで起こるフレアの前兆現象は磁場データでは捉えられないので、リムフレアを観測できる AIA のデータを加えることで予測精度が上がる期待されるからである。

比較の結果、AIA の全球積分値をデータセットに加えることで、特に X クラスフレアの予測精度が向上する事が分かった。本発表では、さらに AIA 画像の閾値つき積分値などをデータセットに加えてフレア予測を行い、その結果を報告する。本研究は、株式会社ブロードバンドタワーとの共同研究である。

キーワード: 宇宙天気, 太陽フレア, 活動領域, SDO/AIA, SDO/HMI, GOES

Keywords: Space weather, Solar flare, Active region, SDO/AIA, SDO/HMI, GOES

		GOES+MHI	AIA+GOES+MHI
X class Flare	HSS* ¹	0.209	0.215
	TSS* ²	0.551	0.581
M class flare	HSS	0.439	0.402
	TSS	0.500	0.470
C class flare	HSS	0.521	0.542
	TSS	0.627	0.605

*¹HSS=Heidke Skill Score

*²TSS=True Skill Statistic

太陽白色光フレアの発生要因に関する統計的研究 Statistical study on generating factors of white light solar flares

北川 潤^{1*}; 増田 智¹; 渡邊 恭子²

KITAGAWA, Jun^{1*}; MASUDA, Satoshi¹; WATANABE, Kyoko²

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

¹STEL, Nagoya University, ²JAXA/ISAS

'White Light Flare' is a flare with enhancement of visible continuum and is mainly associated with energetic flares like GOES X-class flares. But it could not be always observed in energetic flares and recently it is observed in relatively weak flares like GOES C-class flares (Matthews et al. 2003; Hudson et al. 2006). Its occurring mechanism has not been well understood yet and hence a key question remains; "What is needed to enhance white light emission in solar flares?"

In this study, we chose 37 events observed with Hinode/SOT and RHESSI among M- and X-class flares from January 2011 to August 2013. Out of the 37 events, Using running difference images of SOT three continuum bands (red, green, blue), we identified 13 White Light (WL) events. Remaining 24 events are classified into No White Light (NWL) events. We compare these two groups in several parameters (e.g., duration, distance between flare ribbons, and so forth) to find a generating factor of White Light event.

We found the following characteristics of WL events. (1) Most of WL events show a short duration within 20 minutes in GOES soft X-rays. (2) WL events show high (>15MK) temperature and relatively low emission measure at the peak of GOES soft X-rays. (3) The distance between two ribbons in WL events is short as 10arcsec. (4) Assuming the thick-target model, the mean dissipation rate of non-thermal energy in WL events is larger than that of NWL events. (5) WL events do not tend to coincide with CME comparing to NWL. These results indicate that precipitation of large amount of accelerated electrons into a compact area within a short time plays a key role to generate a WL event.

Keywords: solar flare, white light, hinode

対流圏及び成層圏の気温に対するオゾンと太陽風の影響 Influence of solar wind and ozone on the temperatures of the troposphere and stratosphere

山下 和良^{1*}
YAMASHITA, Kazuyoshi^{1*}

¹ 横浜国立大学大学院環境情報学府
¹YOKOHAMA National University

太陽磁気活動と地球大気の温度変化は相関関係にあることは間違いないが、その原因は明らかではない。この問題に対して今までの研究成果 [1] に基づき、太陽風とオゾンが地球大気に与える影響について分析検討する。

今回、太陽風の影響を確認するため A E 及び D s t 指数データを使用し、オゾン全量と対流圏及び成層圏の気温の変化を解析した。

なお、解析を進めるにあたって次に点に注意した。低緯度でのオゾンに対する E P P - N O x の影響が U V 紫外線に匹敵する可能性がある [Callis et al.,2000,2001;Langematz et al.,2005;Rozanov et al.,2005]。低緯度で生成されたオゾンは冬極域に輸送されるため、E P P - N O x が極域のオゾン減少に影響を与えている。

以上のことから太陽風の影響による成層圏オゾンの変化は、対流圏の気候に影響を与えていることを示唆している。

[1] 伊藤公紀、地球惑星科学連合大会 2 0 0 8 - 2 0 1 3

キーワード: 対流圏, 成層圏, 気温, オゾン, 太陽風, 地磁気活動指数

Keywords: troposphere, stratosphere, temperature, ozone, solar wind, geomagnetic activity

日月振動の気候影響について On the influence of the luni-solar oscillation on the climate

伊藤 公紀^{1*}; 艾 洋¹; 河野 翔¹
ITO, Kiminori^{1*}; AI, Yang¹; KAWANO, Shoh¹

¹ 横浜国立大学環境情報研究院

¹Yokohama National University, Graduate School of Env. & Inf. Sciences

我々はこれまで、太陽風と気温の密接な関係を示し、さらに北極振動の関与を示唆してきた。一方で、日月振動と北極振動の繋がりを示唆する研究がある [1]。

このように、太陽と月の気候影響を調べることは、重要である。

最近、カナダのウサギ個体数が示す日月振動周期に対して、興味深い機構が提案された [2]。月の位置によって宇宙線強度が変調され、大気イオン化率が変化し、それがウサギの食糧である植物の活性変化に繋がる、というものである。

この機構が示唆するように、太陽と月の気候影響は独立でなく、結合している可能性がある。従って、太陽風の気候影響を考える上でも、月の寄与を考慮することは有意義であろう。ここでは、両因子の寄与をどのように解析するのが適当であるかを探る。

1) Renato Ramos da Silva and Roni Avissar, The impacts of the Luni-Solar oscillation on the Arctic oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, VOL. 32, L22703 (2005)

2) Vidar Selas, Linking '10-year' herbivore cycles to the lunisolar oscillation: the cosmic ray hypothesis, *Oikos*, Volume 123, 194-202 (2014)

キーワード: 日月振動, 北極振動, 太陽風, 気候

Keywords: Luni-solar oscillation, Arctic oscillation, Solar wind, Climate

VarSITI - Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact VarSITI - Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact

塩川 和夫^{1*}; Georgieva Katya²
SHIOKAWA, Kazuo^{1*}; GEORGIEVA, Katya²

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ²Space Research and Technologies Institute, Bulgarian Academy of Sciences

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Space Research and Technologies Institute, Bulgarian Academy of Sciences

The Scientific Committee on Solar Terrestrial Physics (SCOSTEP) is an interdisciplinary body of the International Council for Science (ICSU) to run international interdisciplinary scientific programs and promotes solar-terrestrial physics research. The last solar minimum in 2008-2009 and the current solar maximum of sunspot cycle 24 show much lower activities compared with the previous two solar cycles 22 and 23. The scientists in the solar-terrestrial physics are watching very low solar activities and their consequences on Earth, which have never been observed since modern scientific measurements become available. The SCOSTEP program "Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact (VarSITI)" (2014-2018) will focus on this particular low solar activity and their consequences on Earth, for various times scales from the order of thousands years to milliseconds, and for various locations and their connections from the solar interior to the Earth's atmosphere. In order to elucidate various sun-earth connections, we encourage communication between solar scientists (solar interior, sun, and the heliosphere) and geospace scientists (magnetosphere, ionosphere, and atmosphere). Campaign observations will be promoted for particular interval in collaboration with relevant satellite and ground-based missions as well as modeling efforts. Four scientific projects will be carried out in VarSITI as (1) Solar Evolution and Extrema (SEE), (2) International Study of Earth-Affecting Solar Transients (ISEST/Minimax24), (3) Specification and Prediction of the Coupled Inner-Magnetospheric Environment (SPeCIMEN), and (4) Role Of the Sun and the Middle atmosphere/thermosphere/ionosphere In Climate (ROSMIC).

キーワード: VarSITI, 太陽活動, 気候変動, 磁気圏, 電離圏, 大気圏

Keywords: VarSITI, solar activity, climate change, magnetosphere, ionosphere, atmosphere

内部磁気圏における多圏間相互作用環境の理解と予測 Specification and Prediction of the Coupled Inner-Magnetospheric Environment (SPeCIMEN)

三好 由純^{1*}; 大村 善治²; 加藤 雄人³; ジェイコブ ボルトニック⁴; クレイグ ロジャー⁵
MIYOSHI, Yoshizumi^{1*}; OMURA, Yoshiharu²; KATOH, Yuto³; JACOB, Bortnik⁴; CRAIG, Rodger⁵

¹名古屋大学太陽地球環境研究所, ²京都大学生存圏研究所, ³東北大学大学院理学研究科, ⁴カリフォルニア大学ロスアンゼルス校, ⁵オタゴ大学

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²RISH, Kyoto University, ³Graduate School of Science, Tohoku University, ⁴UCLA, US, ⁵University of Otago, NZ

Specification and Prediction of the Coupled Inner-Magnetospheric Environment (SPeCIMEN) is a focus group of next SCOSTEP project: VarSITI. The goals and objectives are the quantitative prediction and specification of the Earth inner magnetospheric environment based on Sun/solar wind driving inputs. Our question is how the inner magnetosphere responds as a coupled system to Sun/solar-wind driving, which will be solved by a combination of physical and statistical modeling, theory and observations from various platforms under this project. The satellite missions such as NASA/Van Allen Probes (US), JAXA/ERG (Japan) and ground-based network observations provide a comprehensive picture on the dynamical evolutions of geospace and reveal processes and consequences of the inner magnetosphere. Anticipated outcome should be a series of coupled, related models that quantitatively predict the dynamical evolution of the inner magnetospheric state including radiation belts, ring current, plasmasphere, plasma sheet. In this presentation, we give an overview of the SpeCIMEN project and the strategy of the project to gain the science output.

キーワード: 将来計画, 内部磁気圏

Keywords: future mission, inner magnetosphere

人工衛星 Geotail による磁気リコネクションの観測 Geotail observation of magnetic reconnection

長井 嗣信^{1*}; 篠原 育²
NAGAI, Tsugunobu^{1*}; SHINOHARA, Iku²

¹ 東京工業大学, ² 宇宙科学研究所

¹Tokyo Institute of Technology, ²Institute of Space and Astronautical Science/JAXA

人工衛星 Geotail は、磁気圏で起きている磁気リコネクションを観測することを主目的として、1992年7月14日に打ち上げられた。現在までに、磁気リコネクションの主要な物理過程を明らかにしてきた。特に、磁気リコネクション領域では、イオンと電子が別々になって運動していることを、観測的に証明してきた。電子は、磁気拡散領域に対応する中心部の狭い領域で強い電流層を形成し、そこから高速のジェットを形成している。この電子高速のジェットは、すぐに減速して、その後徐々に減速して、イオンとともに運動する MHD 状態になる。この電子とイオンが別々になって運動している領域は、差し渡し 10 倍のイオンの慣性長程度となっている。イオンは、速度的には、電子より圧倒的に遅いが、磁気拡散領域周辺でかなり加速され、一定速度を保ったまま MHD 状態となっている。このように、いままで考えられてきた描像とは異なる新たな磁気リコネクションの物理過程を提示している。

キーワード: 磁気リコネクション, 宇宙プラズマ, サブストーム, 磁気圏尾部
Keywords: magnetic reconnection, space plasma, substorm, magnetotail

あけぼの衛星長期観測データによる内部磁気圏ダイナミクスの解明 Global dynamics of the inner magnetosphere derived from long term observation by Akebono

笠原 禎也^{1*}; 松岡 彩子²; 長井 嗣信³; 熊本 篤志⁴; 阿部 琢美²

KASAHARA, Yoshiya^{1*}; MATSUOKA, Ayako²; NAGAI, Tsugunobu³; KUMAMOTO, Atsushi⁴; ABE, Takumi²

¹ 金沢大学, ²JAXA/ISAS, ³ 東工大, ⁴ 東北大

¹Kanazawa University, ²JAXA/ISAS, ³Tokyo Inst. Tech., ⁴Tohoku Univ.

Akebono is a Japanese scientific spacecraft which was launched in February, 1989 for observations of the Earth's magnetosphere, and has been operated successfully for 25 years. The regular data acquisition of MGF, PWS, VLF, TED, and RDM is still continued at stations in Japan and Sweden. The operation of the Akebono will be extended until March, 2015 (FY2014) in order to realize collaborative measurements with the Van Allen Probes, and further extension to the end of FY2016 is expected as an optional mission. Because of its unique orbit, the stored data is quite valuable for studying plasma physics in the auroral region as well as the radiation belt. In the present paper, we introduce important achievements of Akebono observation and discuss future science to be obtained from the long term observation data.

キーワード: あけぼの, 内部磁気圏, 放射線帯, オーロラ, プラズマ波動

Keywords: Akebono, Inner Magnetosphere, Radiation belt, Aurora, Plasma wave

ERG Science Center ERG Science Center

桂華 邦裕^{1*}; 三好 由純¹; 関 華奈子¹; 堀 智昭¹; 宮下 幸長¹; 小路 真史¹; 瀬川 朋紀¹; 篠原 育²; 高島 健²; 田中 良昌³; ERG Science Center Team⁴

KEIKA, Kunihiro^{1*}; MIYOSHI, Yoshizumi¹; SEKI, Kanako¹; HORI, Tomoaki¹; MIYASHITA, Yukinaga¹; SHOJI, Masafumi¹; SEGAWA, Tomonori¹; SHINOHARA, Iku²; TAKASHIMA, Takeshi²; TANAKA, Yoshimasa³; ERG, Science center team⁴

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ³ 国立極地研究所, ⁴ ERG Science Center Team
¹ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ² Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ³ National Institute of Polar Research, ⁴ ERG Science Center Team

ERG (Exploration of energization and Radiation in Geospace) is a Japanese geospace exploration project, and the ERG satellite will be launched in Japanese FY 2015. The project consists of the satellite observation team, the ground-based network observation team, and the integrated data analysis/simulation team. Besides these research teams, the ERG Science Center has been organized to promote close collaborations of these teams and thereby maximize scientific output. For studies of geospace, where different plasma populations are dynamically coupled with one another via cross-energy and cross-regional couplings, the environment for integrated data analysis is critical for comprehensive understanding using various kinds of data sets including data from physics-based models developed by the GEMSIS (Geospace Environment Modeling System for Integrated Studies) project of the Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University.

A standard data format and integrated data analysis tools are essential to realize the seamless data analysis environment. The ERG project data after Level-2 will be open to the public in the NASA CDF format. The integrated data analysis tool is developed as a plug-in tool of SPEDAS (Space Physics Environment Data Analysis System) in collaboration with the THEMIS (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms) and IUGONET (Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETWORK) teams. It should be noted that other project data, such as THEMIS and Van Allen Probes, can be easily analyzed with SPEDAS if the data are converted to the CDF format. Thus the integrated data analysis using many kinds of data is truly realized through SPEDAS. Other useful tools in the web browser have been developed by the science center: ERGWAT (ERG Web Analysis Tool) is an interactive visualization tool, and CEF (Conjunction Event Finder) is a web-based tool enabling users to easily find conjunctions between satellites and ground-based observations. These tools will contribute to a part of the capacity building activity of the SPeCIMEN (Specification and Prediction of the Coupled Inner-Magnetospheric Environment) project carried out under the VarSITI (Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact) program for 2014-2018.

キーワード: ERG, GEMSIS, IUGONET, 統合解析ツール, SPEDAS, SPeCIMEN

Keywords: ERG, GEMSIS, IUGONET, Integrated analysis tool, SPEDAS, SPeCIMEN

VarSITIプログラム期間における国際宇宙天気科学・教育センター／MAGDASの研究プロジェクト ICSWSE/MAGDAS Research Projects During the VarSITI Program Interval

河野 英昭^{1*}; 吉川 顕正¹; 阿部 修司¹; 魚住 禎司¹; Cardinal Maria Gracita¹; 前田 丈二¹; 湯元 清文¹; MAGDAS/CPMN Group¹

KAWANO, Hideaki^{1*}; YOSHIKAWA, Akimasa¹; ABE, Shuji¹; UOZUMI, Teiji¹; CARDINAL, Maria gracita¹; MAEDA, George¹; YUMOTO, Kiyohumi¹; MAGDAS/CPMN, Group¹

¹ 国際宇宙天気科学・教育センター

¹ International Center for Space Weather Science and Education

International Center for Space Weather Science and Education (ICSWSE) has developed a real time magnetic data acquisition system (the MAGDAS project) to monitor the space environment around the world. The number of observational sites is increasing every year in collaboration with MAGDAS host countries. Up to now, the MAGDAS Project has installed 73 real time magnetometers: It is the largest magnetometer array in the world. Using data from this global network, we are developing many research projects. In this talk, we introduce our research projects planned during the VarSITI program interval, as follows:

- (1) Global electromagnetic coupling from polar to equatorial ionosphere
- (2) Vertical coupling among the atmosphere, the ionosphere and the magnetosphere
- (3) Plasmaspheric diagnosis using the Field line resonance
- (4) Magnetospheric diagnosis using geomagnetic disturbances
- (5) Monitoring of Space weather phenomena using solar and magnetospheric indices
- (6) Modeling of Space weather parameters
- (7) Sun-atmosphere coupling

Keywords: VarSITI, MAGDAS, CPMN

磁気嵐・サブストーム時の高エネルギー電子降下現象：オーロラサブオーロラ域における VLF/LF 電波伝搬観測
Energetic electron precipitation during magnetic storm and substorm: Subionospheric VLF/LF observation

土屋 史紀^{1*}; 小原 隆博¹; 森岡 昭¹; 三澤 浩昭¹; 八木 学¹; 三好 由純²; 塩川 和夫²; 小川 泰信³; コナーズ マーチン⁴
TSUCHIYA, Fuminori^{1*}; OBARA, Takahiro¹; MORIOKA, Akira¹; MISAWA, Hiroaki¹; YAGI, Manabu¹; MIYOSHI, Yoshizumi²; SHIOKAWA, Kazuo²; OGAWA, Yasunobu³; CONNORS, Martin⁴

¹ 東北大学, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 国立極地研究所, ⁴ アサバスカ大学

¹Tohoku University, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ³National Institute of Polar Research, ⁴Athabasca University

Subionospheric VLF/LF radio observation is useful probe to investigate precipitation of high-energy (>100keV) electrons into the atmosphere and the observation at Ny-Ålesund, Norway (NAL) and Athabasca, Canada (ATH) are used to detect energetic electron precipitation in auroral and sub-auroral regions during storm and substorm. At the NAL station, radio signals which are transmitted in mid-latitude and propagate across the auroral and sub-auroral regions are recorded. During magnetic storms, the strong phase variation associated with the substorm induced electron precipitation has been detected and the phase change quantitatively corresponds to the precipitating energetic electron flux observed by the NOAA/POES satellites over the radio propagation path. Onsets of the phase change were delayed by ten to several tens of minutes from the substorm onset in the morning and noon sectors, which is consistent with the drift time of energetic electrons with energy of ~100 keV. On the other hand, the phase change in the dusk sector occurred shortly after the substorm onset and is often accompanied by Pc1 or Pi1B observed on the ground station near the radio path. These results show that the energetic electron precipitation is strongly connected with the dynamics of energetic ions and electrons and wave generations in the inner magnetosphere. The ATH station is located in the subauroral region and subionospheric signals from lower latitude are measured. The phase fluctuations with time scales of Pc5 or longer period were sometimes found during main and early recovery phases of magnetic storms. The phase fluctuations found on 5 June 2011 show good correlation with the GOES magnetic field data, suggesting Pc5 modulation of either electron injection or precipitation rates. Subionospheric radio observation provides opportunities to investigate various kinds of energetic electron precipitation processes. Part of observed data is provided through the IUGONET metadata database.

A longitudinal network of VLF/ELF antennas and induction magnetometers at subauroral latitudes - Contribution to VarSITI

A longitudinal network of VLF/ELF antennas and induction magnetometers at subauroral latitudes - Contribution to VarSITI

塩川 和夫^{1*}; 三好 由純¹; 尾崎 光紀²; 長妻 努³; 石井 守³; コナーズ マーチン⁴; ポデルスキー イゴール⁵; シェフツォフ ボリス⁵

SHIOKAWA, Kazuo^{1*}; MIYOSHI, Yoshizumi¹; OZAKI, Mitsunori²; NAGATSUMA, Tsutomu³; ISHII, Mamoru³; CONNORS, Martin⁴; PODDELSKY, Igor⁵; SHEVTSOV, Boris⁵

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 金沢大学, ³ 情報通信研究機構, ⁴ アサバスカ大学, ⁵ Institute of Cosmophysical Research and Radiowave Propagation (IKIR), FEB RAS

¹ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ² Kanazawa University, ³ National Institute of Information and Communications Technology, ⁴ Athabasca University, ⁵ Institute of Cosmophysical Research and Radiowave Propagation (IKIR), FEB RAS

We report observations of VLF/ELF chorus waves (~kHz) using loop antennas and Pc1 waves (~Hz) using induction magnetometers at longitudinally-distributed stations at subauroral latitudes. Continuous measurements of VLF waves with a sampling rate of 100 kHz have been made since September 2012 to monitor daily variations of chorus waves and their detailed structures at Athabasca (54.72N, 246.69E, MLAT=61.3). We observe various chorus emissions, such as quasi-periodic (Q-P) emissions, patchy burst emissions, rising and falling tone emissions at Athabasca. New loop antennas will be installed at Fredericton in the east-coast of Canada and at Zhigansk in the east-Siberia in Russia in 2014-2015. The induction magnetometer chain observes Pc1 geomagnetic pulsation which corresponds to electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves in the inner magnetosphere. The magnetometers have deployed in Athabasca, Magadan and Paratunka in far-eastern Russia, Moshiri and Sata in Japan, and will be deployed at Fredericton in the east-coast of Canada in 2014. These chorus waves and EMIC waves are known to contribute to the acceleration and loss of radiation belt particles. The longitudinal network of these measurements will provide continuous monitor of global distribution of the occurrence of these waves. These observations will contribute the next SCOSTEP program VarSITI, particularly to the SPeCIMEN Project.

キーワード: コーラス波動, EMIC 波動, Pc1 地磁気脈動, 地上多点観測, サブオーロラ帯

Keywords: chorus wave, EMIC wave, Pc1 geomagnetic pulsations, ground-based multi-point observation, subauroral latitudes

VarSITI 科学プログラム下の「太陽進化と極端現象 (SEE)」エレメント Solar Evolution and Extrema (SEE) under VarSITI Scientific Program

坂尾 太郎^{1*}; 鈴木 建²; 草野 完也²; マルテンス ペトラス C.³; ナンディ ディビエンドウ⁴; オブリドコ ウラディミール N.⁵; 塩川 和夫²; ジョリーバカトヤ⁶
SAKAO, Taro^{1*}; SUZUKI, Takeru²; KUSANO, Kanya²; MARTENS, Petrus C.³; NANDI, Dibyendu⁴; OBRIDKO, Vladimir N.⁵; SHIOKAWA, Kazuo²; GEORIEVA, Katya⁶

¹JAXA 宇宙科学研究所, ²名古屋大学, ³ハーバード天体物理学研究所, ⁴インド科学教育・研究所, ⁵IZMIRAN, ロシア, ⁶SRTI, ブルガリア
¹ISAS/JAXA, ²Nagoya University, ³CfA-Harvard, USA, ⁴Indian Institute of Science Education and Research, India, ⁵IZMIRAN, Russia, ⁶SRTI, Bulgaria

Following the recent unusual solar activities, the next SCOSTEP international scientific program 'Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact (VarSITI)' was launched as a 5 years program covering 2014-2018. It will focus on the the unusual solar activities and their consequences on Earth, for various times scales from the order of thousands years to milliseconds, and for various locations and their connections from the solar interior to the Earth's atmosphere.

The program consists of four elements:

(1) Solar Evolution and Extrema (SEE), (2) International Study of Earth-Affecting Solar Transients (ISEST/Minimax24), (3) Specification and Prediction of the Coupled Inner-Magnetospheric Environment (SPeCIMEN), and (4) Role Of the Sun and the Middle atmosphere/thermosphere/ionosphere In Climate (ROSMIC).

Among these elements, SEE will address, by promoting coordination of various projects between the Sun and the Earth, the following scientific questions:

(a) Are we at the verge of a new grand minimum? If not, what is the expectation for cycle 25? (b) Does our current best understanding of the evolution of solar irradiance and mass loss resolve the "Faint Young Sun" problem? What are the alternative solutions? (c) What is the largest solar eruption/flare possible? What is the expectation for periods with absence of activity?

An overview of SEE element will be presented.

Keywords: VarSITI Program, SEE Element, SCOSTEP, solar evolution, extreme solar events

太陽の磁気活動とその地球環境への影響 Solar Magnetic Activity and Their Influence on the Earth's Environment

桜井 隆^{1*}
SAKURAI, Takashi^{1*}

¹ 国立天文台
¹National Astronomical Observatory of Japan

The Sun affects the environment of the Earth in diverse ways. In a time scale of a few days, XUV emission and energetic particles from solar flares and disturbances in the solar wind (coronal mass ejections) cause various phenomena in the ionosphere and the magnetosphere. In a time scale of 2-4 weeks, the rotation of the Sun modulates its irradiance and solar wind properties. In a time scale of 11-year solar cycle, total and spectral irradiance changes in phase with the sunspot number. In this presentation I will pick up new results obtained with the Hinode mission and other ground-based instruments.

Hinode, launched on 23 September 2006, is a Japan-US-UK joint mission with contributions for downlink connections from ESA. The three primary instruments on Hinode are

- (1) solar optical telescope/magnetograph (SOT),
- (2) soft X-ray telescope (XRT), and
- (3) extreme ultraviolet imaging spectrometer (EIS).

Ulysses spacecraft showed in 1998 that fast and steady solar wind comes from polar regions, and slow and variable solar wind comes from low-latitude regions. Since low-latitude regions are basically characterized by closed magnetic field lines by the presence of active regions with bipolar magnetic field configuration, it was not clear how the solar wind could flow out of the regions. However, Hinode/XRT discovered continuous outflow from the edges of active regions. Later, EIS observations confirmed the outflow by its Doppler shift. Now this outflow is believed to be the long-sought source of the slow solar wind.

The fast solar wind originates from polar regions which are basically unipolar. Since quiet-sun magnetic field of 10 gauss or less was known to consist of intense flux tubes with a kilo-gauss field strength occupying 1% of the area, the same might be expected for polar fields. Hinode/SOT showed clearly with its high spatial resolution observations of vector magnetic fields that it is the case. Hinode/SOT observations also track the polar field reversal with an unprecedented accuracy. The time delay of the south pole reversal compared with the north pole is seen in Hinode/SOT polar field observations as well as other indices, and is speculated to be related to an unusually low activity of the present solar cycle.

Coronal mass ejections (CMEs) are the major source of geomagnetic disturbances. How such an ejection of plasma cloud takes place is explained by several models. In one scenario, a solar magnetic configuration evolves by supplies of magnetic flux and magnetic helicity from below the surface. The accumulation of magnetic helicity leads to abrupt instability of magnetic configuration, leading to a CME. Magnetic helicity is distributed basically anti-symmetrically with respect to the equator, but anomaly is often observed. Long-term observations of magnetic helicity by ground-based instruments and high accuracy measurements of helicity by Hinode/SOT are providing interesting information on the nature of magnetic field generation in the solar convection zone.

キーワード: 太陽, 太陽周期活動, 太陽風, 太陽磁場, ヘリシティ
Keywords: Sun, solar activity cycle, solar wind, solar magnetic field, helicity

日本における地磁気誘導電場のモデリング Modeling of the geomagnetically induced electric field in Japan

藤田 茂^{1*}; 遠藤 新²; 藤井 郁子³
FUJITA, Shigeru^{1*}; ENDO, Arata²; FUJII, Ikuko³

¹ 気象大学校, ² 気象庁, ³ 地磁気観測所

¹Meteorological College, ²Meteorological College, ³Magnetic Observatory

The geomagnetically induced current (GIC) happens to damage transformers of electrical power line systems in high-latitude countries like Canada and Sweden where the geomagnetic disturbances are enhanced. Thus, since it is important to evaluate the GICs associated with geomagnetic disturbances in these countries, there have been many works about GIC [Pulkkinen et al., 2005]. On the other hand, the low-latitude countries like Japan seem to be regarded to be free from dangers of the GIC disasters [Pulkkinen et al., 2008]. Indeed, Watari et al. [2009] revealed that the GICs measured along the power line in Hokkaido (the northernmost part of Japan) are as small as several Ampere. These values are negligibly small compared with the permissible current of a transformer. It is noted that the measurements by Watari et al. [2009] were carried out in the period of extremely quiet solar activity.

The result by Watari et al. [2009] seems to indicate that Japan is safe from the GIC disasters. However, it should be noted that the ground conductivity structure is quite different between Hokkaido and other Japanese areas like the most industrialized and highly-populated Kanto plain. This difference invokes the following geoelectric characters in Japan; the geomagnetically induced electric field at Kakioka in Kanto plain is sometimes about 10-times larger than that at Memambetus in Hokkaido. This difference probably comes from difference in the ground conductivity structure. As a result, we have to employ a realistic 3D ground conductivity model to present a reliable conclusion on the GIC.

In the talk, we will present the first numerical result of the geomagnetically induced electric field in Japan based on the 3D electric conductivity in the Earth. The conductivity is compiled after the resistivity suitable to the characteristic layers based on the crustal layer structure after the database on the bathymetry and that on the thickness of the sediment layer together. Our initial results reveal several localized enhancements of the induced electric field in the coastline regions when the induced electric current tends to converge into a bay-shaped area. The enhanced electric field appears in the different areas depending on the direction of the external source current in the magnetosphere. Combination of the induced electric field calculated and quantities of the severe space weather event yields the info for evaluation of the extreme severe GIC in Japan.

References

- Pulkkinen, A. et al. (2005), Space Weather, 3, S08C03, doi:10.1029/2004SW000123.
- Pulkkinen, A. et al. (2008), Space Weather, 6, S07001, doi:10.1029/2008SW000388.
- Watari, S., et al. (2009), Space Weather, 7, S03002, doi:10.1029/2008SW000417.

キーワード: 地磁気誘導電流, 宇宙天気, 電気伝導度, 数値計算, 非一様性

Keywords: geomagnetically induced current, space weather, electric conductivity, numerical modeling, nonuniformity

太陽表面大規模磁場構造形成における表面磁気対流の働き Role of magneto-convection from the point of view of large-scale magnetic structure formation on the solar surface

飯田 佑輔^{1*}
IIDA, Yusuke^{1*}

¹ 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所
¹ ISAS/JAXA

The roles of magneto-convection on the solar surface in the formation of large scale magnetic field, which are revealed by the recent observation, are reported in this presentation.

Many energetic activities on the solar surface, e.g. filament formation, solar jet, and slow solar wind etc., root in the large-scale magnetic configurations. The circumstances around the photosphere, e.g. actual visible surface, is at high plasma beta condition. So the magnetic field is transported mainly by the surface convection there. Simultaneously its configuration is significantly affected and changed from its birth to solar surface. Hence, understanding of magneto-convection on the solar surface is thought to be a basic but an important issue in the solar physics for long time.

Despite of its importance, it is very difficult to give the conclusion to roles of solar surface convection to global structure, namely to answer how does it transport magnetic field and how does it change states of magnetic field. The difficulties come from the smallness and short time scale of the element structures of magneto-convection on the solar surface (<1,000km and order of minutes). The first difficulty is its smallness and short time scale in absolute value. We need stable high spatial and temporal resolution to catch up their element structure. We can say this difficulty is nearly solved thanks to the recent satellite observation. However, there is the second difficulty, smallness and short time scale compared to large scale structure (~700,000km and order of years). We need a new method of analysis to overcome the problem, huge scale difference.

To solve this problem, we develop auto-recognition and tracking method of patches and apply it to the actual data. In the presentation, we report the results about reformation of patch structures by surface convection, especially the frequency distribution of flux content in each patch structure. We find that it is re-formed in 30 minutes, which is much shorter than flux supply time scale. This result indicates that most magnetic structures on the solar surface is decided by the local convection nature.

キーワード: 太陽, 光球, 磁気対流
Keywords: the Sun, magnetic field, convection

Solar Magnetism: Exploration with Local Convective Dynamo Modeling

MASADA, Youhei^{1*}
MASADA, Youhei^{1*}

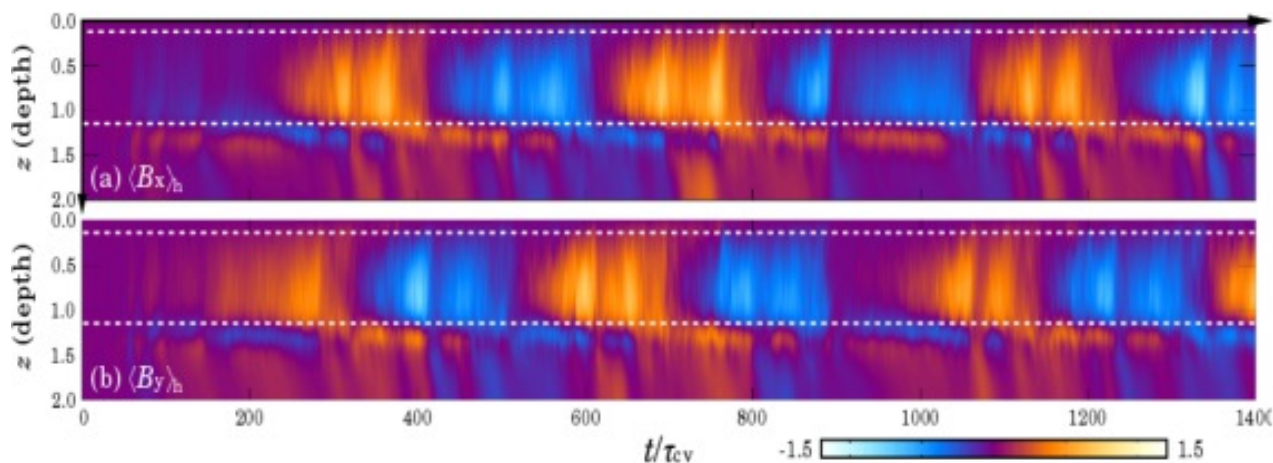
¹Department of Computational Science, Kobe University
¹Department of Computational Science, Kobe University

A grand challenge in astrophysics is the origin of self-organizing properties of the magnetic field in highly turbulent flows. The solar magnetism is the front line in this area. The solar magnetic field shows a remarkable spatiotemporal coherence though it is generated by turbulent convective dynamo operating within its interior. Our understanding on the solar magnetism has been accelerated over the past decade in response to broadening, deepening and refining of numerical dynamo modelings. However, it is still unclear what dynamo mode is excited in the solar interior and how it regulates magnetic cycle with equatorward sunspot migration and periodicity of 22 years. To gain a deeper understanding of the solar dynamo mechanism, we are currently working on the convective dynamo simulation in a local stratified system.

Here we report a successful direct numerical simulation (DNS) of oscillatory large-scale dynamo spontaneously excited in a rotating stratified convection. The figure shown below is the simulation result; the time-radius diagram of the mean horizontal magnetic fields. Our simulation model consists of three layers like as the solar interior: bottom and top stably stratified layers and mid-convection zone (the area between white-dashed lines). It is found that the large-scale magnetic field is organized in the bulk of the convection zone and shows a well-regulated oscillatory behavior. The mean-field component is the strongest at around the mid-convection zone and propagates from there to top and base of the convection zone. The polarity is then gradually reversed over the period of about 200 convective turn-over time. It is noteworthy that there is a phase difference of about $\pi/2$ between B_x and B_y . The simulated spatiotemporal evolution of the large-scale magnetic field is quite reminiscent of the solar butterfly diagram although there is a difference in the propagation direction between the simulated field and the sunspot field.

To explore the underlying dynamo mechanism, we construct a mean-field electrodynamics model with dynamo coefficients directly computed from the DNS. The nonlinear back-reaction of the mean-field on the dynamo coefficients (both α - and η -quenching) is self-consistently taken into account. We demonstrate that the simulated large-scale dynamo is quantitatively reproduced by our DNS-driven mean-field dynamo model, and is interpreted as a manifestation of oscillatory α^2 -dynamo mode. We will describe the basic physics which characterizes the cycle period and amplitude of the large-scale magnetic field sustained by the α^2 -dynamo, and then discuss its playing role in the solar magnetism. This is the first to quantitatively demonstrate the presence of the oscillatory α^2 -dynamo mode as a natural outcome of the rotating stratified convection, and raises an unignorable question about the conventional solar dynamo model relying strongly on the profiles of the mean flows, such as the differential rotation and meridional circulation.

キーワード: Sun, MHD, Convection, Dynamo
Keywords: Sun, MHD, Convection, Dynamo



深宇宙探査技術実験機 DESTINY から太陽極域探査機 SOLAR-D へ From Deep Space Explorer DESTINY towards Solar Polar Region Observer SOLAR-D

川勝 康弘^{1*}
KAWAKATSU, Yasuhiro^{1*}

¹ 宇宙航空研究開発機構
¹ ISAS/JAXA

DESTINY which stands for "Demonstration and Experiment of Space Technology for INterplanetary voYage" is a mission candidate for the next space science small program. The next mission is planned to be decided in 2014, and the select one is scheduled to be launched in 2018.

As illustrated in the Figure, DESTINY will be launched by an Epsilon launch vehicle and firstly placed into a low elliptical orbit, where then its altitude raised by the use of ion engine. When the orbit raising reaches the Moon, DESTINY subsequently is injected into transfer orbit for L₂ Halo orbit of the Sun-Earth system by using lunar gravity assist. Upon arrived at L₂ Halo orbit, DESTINY will conduct its engineering experiment as well as scientific observations for at least a half year. If conditions permit, DESTINY will leave L₂ Halo orbit, and transfer to the next destination.

On the way to L₂ Halo orbit, DESTINY will conduct demonstration and experiment on key advanced technologies for future deep space missions. Major items of the technology demonstration are listed as follows.

1) Ultra-Lightweight solar panel.

In order to generate large electric power to run $\mu 20$ ion engine, "Ultra-Lightweight Solar Panel", which is under development at JAXA, is applied and its performance is evaluated. This solar panel is estimated to achieve power to mass ratio at least double to conventional ones. Future application is expected in outer planet probes (JMO, MELOS) or probes with large ion engines.

2) Large scale ion engine $\mu 20$.

DESTINY is inserted into an elliptical orbit and reaches to a Halo orbit by its own orbital maneuver. For this maneuver, a large ion engine ($\mu 20$) which is under R&D at JAXA will be adopted and its performance is evaluated. This ion engine has thrust five times as much as $\mu 10$ used by Hayabusa and will be expected to be applied to large probes such as SOLAR-D or Hayabusa Mk2.

3) Advanced thermal control.

In order to manage large amount of heat generated by the large ion engine, advanced thermal control techniques by way of Loop Heat Pipe will be adopted.

4) Orbit determination under low thrust operation.

DESTINY will reach to Halo orbit by running ion engine over long duration. In order to reduce burdens to shut down the ion engine each time of orbit determinations, orbit determination under ion engine operation is conducted and its performance is evaluated.

5) Automatic/autonomous onboard operation.

In order to increase the efficiency of operation, autonomous and highly functioned spacecraft management system is developed demonstrated on board. This technique is expected to be adopted especially in the deep space missions usually operated under severe communication condition.

The technologies demonstrated by DESTINY will be applied to various future solar system exploration programs. One of them is a solar polar region observer, SOLAR-D, which is planned to be launched in 2020s.

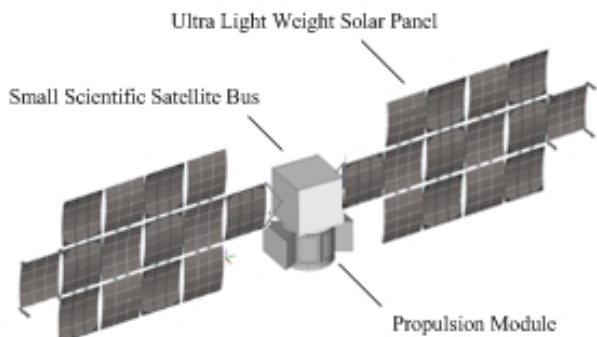
SOLAR-D aims at the observation of the polar region of the Sun from out-of-ecliptic view point. It requires the observation from the high latitude point of the Sun, namely 45deg. To observe the Sun from the high latitude point, the space observatory (spacecraft) must be on the orbit largely inclined with the ecliptic plane. It is not an easy task to inject the spacecraft into the orbit largely inclined with the ecliptic plane. The mission plan under consideration supposes the use of solar electric propulsion, whose major technology challenges are going to be demonstrated in DESTINY.

The over view of DESTINY mission, and its effect on the future SOLAR-D mission will be introduced in the presentation.

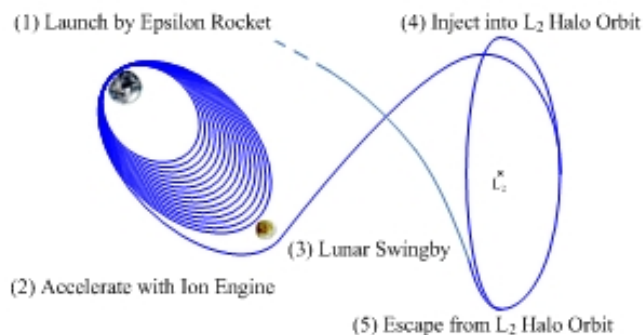
PEM09-14

会場:211

時間:4月28日 12:30-12:45



DESTINY Overview



Mission Profile

Overview of CAWSES II Overview of CAWSES II: Advancing the understanding of the Sun-Earth interaction

津田 敏隆^{1*}
TSUDA, Toshitaka^{1*}

¹ 京都大学生存圏研究所

¹ Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University

CAWSES (Climate and Weather of the Sun-Earth System) was established as an international program by SCOSTEP (Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics) in order to enhance our understanding of the Solar Terrestrial relations, which impacts on life and society. In particular, we put special emphasis on the short and long-term variability of solar activity and its effects on the geospace and Earth's environment.

We carried out the first five-year project of CAWSES in 2003-2007. On the basis of its successful achievements, we conducted the second phase of CAWSES during 2009-2013. CAWSES-Phase II especially promoted science and application of the following four themes, which are related to the fundamental questions of the Sun-Earth system.

TG1: What are the solar influences on the Earth's climate?

TG2: How will geospace respond to an altered climate?

TG3: How does short-term solar variability affect the geospace environment?

TG4: What is the geospace response to variable waves from the lower atmosphere?

We have enhanced international collaboration of ground-based observations, numerical modeling and satellite missions. Database is also very important for CAWSES-II. We also help capacity building activities to involve researchers in developing countries as well, and provide educational opportunities for students of all levels. We review in this talk recent achievements of CAWSES-II.

Keywords: CAWSES, SCOSTEP

VarSITIにおけるICSU世界データシステム（WDS）の役割 The Role of ICSU World Data System in VarSITI

渡辺 堯^{1*}

WATANABE, Takashi^{1*}

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ²ICSU-WDS 国際プログラムオフィス (NICT)

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²ICSU-WDS International Programme Office (NICT)

VarSITI がカバーする太陽から地球大気までの領域の研究は学際科学の典型例であり、様々な領域における観測データや研究情報を共有するメカニズムの構築が重要である。ICSU（国際科学連合）は早くからこのテーマに取り組んでおり、1957 - 58 年に実施された国際地球観測年（IGY）において、World Data Center (WDC) と Federation of Astronomical and Geophysical data-analysis Services (FAGS) を発足させ、Full and Open Access のポリシーのもとで、半世紀にわたって活動を続けて来た。これらの実績をもとに、ICSU は 2008 年に、それまでカバーしてきた地球科学系分野に留まらず、社会系科学までを視野に入れた広範囲のデータ活動を行うため、World Data System (WDS) を発足させた。データセンター等、WDS に所属するメンバーの多くは WDC や FAGS の流れを汲んでおり、観測データや研究情報の国際共有に向けた、WDS と VarSITI との連携は非常に重要である。特に我が国は WDS の国際プログラムオフィス (WDS-IPO) の設置国であるため、WDS を軸とした国内データ活動の充実と国際展開への環境整備が、強く望まれる。

キーワード: VarSITI, データベース, 国際連携, 学際連携

Keywords: VarSITI, Database, International collaboration, Interdisciplinary collaboration

地球に影響を及ぼす太陽の短期変動に関する国際研究 (ISEST)/Minimax24 International Study of Earth-affecting Solar Transients (ISEST)/MiniMax24

片岡 龍峰^{1*}; 清水 敏文²; 浅井 歩³; Zhang Jie⁴; Manuela Temmer⁵; Gopalswamy Nat⁶
KATAOKA, Ryuho^{1*}; SHIMIZU, Toshifumi²; ASAI, Ayumi³; ZHANG, Jie⁴; MANUELA, Temmer⁵; GOPALSWAMY,
Nat⁶

¹ 極地研, ² 宇宙研, ³ 京都大学, ⁴George Mason University, ⁵University of Graz, ⁶NASA/GSFC
¹NIPR, ²JAXA, ³Kyoto University, ⁴George Mason University, ⁵University of Graz, ⁶NASA/GSFC

We introduce the project ISEST (International Study of Earth-affecting Solar Transients)/Minimax24 of VarSITI, internationally led by Jie Zhang (USA), Manuela Temmer (Austria), and Nat Gopalswamy (USA). Goals and objectives are to understand the propagation of solar transients through the space between the Sun and the Earth, and develop space weather prediction capability. How do coronal mass ejections (CMEs) and corotating interaction regions (CIRs) propagate and evolve, drive shocks and accelerate energetic particles in the heliosphere? To answer this question, we need data/theory/modeling as follows: Establish a database of Earth-affecting solar transient events including CMEs, CIRs, flares, and energetic particle events based on remote sensing and in-situ observations from an array of spacecraft, run observation campaigns such as MiniMax24, develop empirical, theoretical, and numerical models of CME propagation and prediction, validate models using observations. As anticipated outcome, a comprehensive database of Earth-affecting solar transients will be created, and space weather prediction capability will be significantly improved.

キーワード: コロナ質量放出, 共回転相互作用領域, 太陽フレア, 太陽高エネルギー粒子
Keywords: coronal mass ejection, corotating interaction region, flares, solar energetic particles

次期スペース太陽天文台 SOLAR-C The next-generation space solar observatory SOLAR-C

原 弘久^{1*}
HARA, Hirohisa^{1*}

¹ 国立天文台
¹National Astronomical Observatory of Japan

SOLAR-Cは、JAXAのワーキンググループが主導する日本で4代目のスペース太陽天文台計画であり、ひので衛星の後継機にあたる。ひので衛星は3つの観測装置で光球からコロナまでを同時にとらえ、微小双極子磁場の浮上と沈降が普遍的に起こっていること、光球のベクトル磁場観測からkGの磁束密度をもつ磁束管の形成、予想もしなかった激しい現象を示す彩層、分光学的に彩層近傍でとらえられた角分解能以下のコロナ加熱現象の兆候などを明らかにした。これらは最も近い恒星の普遍的な磁気プラズマ活動であり、これらの現象の本質的なエネルギー源は光球の対流と結合している磁場である。新たにみつかった太陽活動現象や、太陽物理学で長年取り組まれてきている問題を解決するために、スペースにおかれた高解像度(0.1-0.3秒角分解能)装置によって、太陽磁場と太陽面活動現象間の因果関係を真の意味で理解しようとしている。SOLAR-Cは、イメージングにより光球と彩層活動を観測し、偏光分光によって光球磁場に加えて彩層磁場の測定を行う。SOLAR-Cは彩層・コロナ加熱に対応するダイナミックな事象の現場を、事象と同等の解像度をもったイメージングと分光、そして彩層磁場で可視化する。さらに、SOLAR-Cは彩層磁場の観測を通してコロナ中に蓄積された磁気エネルギーを評価することで宇宙天気の本質的な貢献をする。

野辺山太陽電波ヘリオグラフと黒点スケッチを用いたジャイロレゾナンス源の統計的解析 Statistical analysis of the gyroresonance sources using Nobeyama Radioheliograph and sunspot sketches

大辻 賢一^{1*}; 柴崎 清登¹; 田中 悠基²; 宮腰 剛広³
OTSUJI, Kenichi^{1*}; SHIBASAKI, Kiyoto¹; TANAKA, Yuuki²; MIYAGOSHI, Takehiro³

¹ 国立天文台, ² 京都大学, ³ 海洋研究開発機構
¹NAOJ, ²Kyoto University, ³JAMSTEC

国立天文台野辺山太陽電波観測所では、電波ヘリオグラフを用いた太陽全面観測を1992年から毎日継続して行っている。電波ヘリオグラフからは、電波強度及び円偏波の測定を行うことで、ジャイロレゾナンスが発生している領域をとらえることができる。ジャイロレゾナンスは、電子が黒点の磁力線の周囲を旋回運動する際に円偏波と共鳴して高い円偏波率を持つ電波が放射される機構で、その強度は黒点の磁場強度と観測周波数に依存する。野辺山太陽電波観測所では、17GHzでの観測を行っており、2000G程度の磁場強度領域からのジャイロレゾナンス放射を捉えていると考えられる。しかしこれまでは、電波によるジャイロレゾナンス源と磁場データや活動領域データとを統合した統計的解析は限られており、これらを含めたデータベース作成が急務となっていた。

今回、我々は野辺山太陽電波観測所の電波ヘリオグラフによる観測データからジャイロレゾナンス源の検出を行い、NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) による活動領域番号と対応付けた上で光球磁場強度と併せたデータベース作成を行った。電波ヘリオグラフによる観測データからは、ジャイロレゾナンス源毎にその座標、電波強度及び円偏波強度、面積をリスト化し、NOAAによる活動領域データベースからは、ジャイロレゾナンス源に対応する活動領域の面積、マッキントッシュ分類、黒点数、磁場配置タイプをリスト化した。また、光球磁場強度としては、太陽全面をカバーでき、かつサチュレーション効果が無いデータを用いるため、Mt.Wilson及びCrimeaの黒点スケッチから磁場強度読み取りを行った。この際、スケッチの画像データから半自動的にfitsファイルの作成を行い、データベース作成の効率化を図った。今回作成したデータベースは1992年から2013年に渡り、太陽活動周期のほぼ2周期分に相当する。

このデータベースを用いて、種々の統計解析を行った結果、サイクル23の後半(2002-2007)ではジャイロレゾナンスを伴う活動領域の割合が増加していることが判明した。これはサイクル22では確認されておらず、サイクル23に特有の現象である可能性がある。また、ジャイロレゾナンス発生数と活動領域数との間には2次の相関が見られた。すなわち、ジャイロレゾナンスを伴う活動領域の割合は、活動領域の数そのものに比例していることになる。さらに、ジャイロレゾナンスを伴う活動領域を、その磁場配置タイプで分類すると、複雑な磁場配置($\beta\gamma\delta$ 型等)が多数を占める結果となった。これらのジャイロレゾナンスの統計解析は、これまでの太陽活動の周期的変化をとらえ、今後の太陽活動の予測に繋がるものと期待される。

キーワード: 太陽, 電波, 黒点
Keywords: Sun, Radio, Sunspot

太陽フレアの3次元電流シート中での粒子加速と太陽電波観測との比較 Particle acceleration in a 3D current sheet of a Solar flare and comparison with solar radio observations

西塚 直人^{1*}; 西田 圭佑²

NISHIZUKA, Naoto^{1*}; NISHIDA, Keisuke²

¹ 国立天文台, ² 京都大学大学院理学研究科附属天文台

¹National Astronomical Observatory of Japan, ²Kwasan and Hida observatories, Kyoto Uni.

Solar flares show intermittent time variability in nonthermal emissions, because particles are impulsively accelerated in small acceleration regions, i.e. multiple X-points, reconnection outflows, colliding plasmoids and internal shocks in a fragmented current sheet. We performed 3D MHD simulation of a solar flare, in which a horizontal flux rope in an unstable but equilibrium state are triggered by small amplitude of perturbation to be flown upward. The eruption of a flux rope forms a current sheet just below the flux rope, and when the width of a current sheet becomes enough thin, it becomes unstable for the tearing instability and generate small scale plasmoid inside. The formation and interaction of the plasmoids make the current sheet complex and turbulent structure. When a small scale plasmoid is ejected out or when two plasmoids collide with each other, the electric field in a current sheet is locally and intermittently enhanced.

In this 3D MHD simulation result, we inserted test particles, which are forced by electromagnetic field varying in time. Particles are trapped in the turbulent current sheet, or more exactly between multiple plasmoids, and accelerated by locally enhanced electric field along the current sheet. At that time, particles are intermittently accelerated at several heights and repeat multistep acceleration moving to other X-points. Sometimes, particles escape upward into the erupting flux rope and propagate along the field line of the flux rope. Particles are slightly accelerated by the curvature drift acceleration in the erupting flux rope and finally precipitate to another X-point connected to the different pair of loop-foot points. We also compared this simulation result with radio spectrograph data observed in Ondrejov observatory in Czech Republic. The radio spectrograph data shows similar intermittent time variability of type III bursts, i.e. electron beams, and sometimes slowly drifting pulsating structures, i.e. trapped electron beams in a plasmoid.

In this talk, we mainly talk about the test particle acceleration in 3D MHD simulation of an erupting solar flare and the comparison with the radio observation data. We are also aiming at simulating the propagation of a flux rope eruption into the interplanetary space, i.e. coronal mass ejection, forming a shock at the propagation front and reconnecting with open field in the interplanetary space. We welcome discussion and collaboration in VarSITI.

キーワード: 太陽フレア, コロナ質量放出, 粒子加速, 宇宙天気, 数値シミュレーション, 電波観測

Keywords: Solar Flare, Coronal Mass Ejection, Particle Acceleration, Space Weather, Numerical Simulation, Radio Observation

Role of the Japanese SuperDARN network in the VarSITI Program Role of the Japanese SuperDARN network in the VarSITI Program

西谷 望^{1*}; 行松 彰²; 長妻 努³

NISHITANI, Nozomu^{1*}; YUKIMATU, Akira sessai²; NAGATSUMA, Tsutomu³

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²National Institute of Polar Research, ³National Institute of Information and Communications Technology

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²National Institute of Polar Research, ³National Institute of Information and Communications Technology

The Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) is a network of HF radars operated under the international collaboration of 12 countries. At present, total of 33 radars have been operating in both hemispheres, monitoring important ionospheric parameters such as the global convection pattern and plasma density perturbations with high time (1 to 2 min) resolution. In addition to normal operation modes, SuperDARN frequently operates special observation modes for conjunction studies with spacecraft programs, such as THEMIS, VAP and ERG missions. Japan has been operating total of 4 radars in Antarctica, Alaska and Hokkaido, contributing to the operation of the network. Judging from the characteristics of the network, it is expected to play important roles in several projects of the VarSITI programs, such as: ISEST (International Study of Earth-affecting Solar Transients/MiniMax24), SPeCIMEN (Specification and Prediction of the Coupled Inner-Magnetospheric Environment), and ROSMIC (Role Of the Sun and the Middle atmosphere/ thermosphere/ionosphere In Climate). Details of the SuperDARN network's role in the VarSITI program will be presented.

キーワード: SuperDARN, midlatitude, ionosphere, thermosphere, dynamics, VarSiti

Keywords: SuperDARN, midlatitude, ionosphere, thermosphere, dynamics, VarSiti

What determines the severity of space weather? What determines the severity of space weather?

Nanan Balan^{5*}; Skong R.²; Tulasi Ram S.³; Rajesh P. K.⁵; 塩川 和夫¹; Hsu R.⁵; Su T. H.⁵; Liu J. Y.⁴
NANAN, Balan^{5*}; SKONG, R.²; TULASI RAM, S.³; RAJESH, P. K.⁵; SHIOKAWA, Kazuo¹; HSU, R.⁵; SU, T. H.⁵; LIU, J. Y.⁴

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ²Los Alamos National Laboratory, ³Indian Institute of Geomagnetism, ⁴National Central University, ⁵National Cheng Kung University

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Los Alamos National Laboratory, ³Indian Institute of Geomagnetism, ⁴National Central University, ⁵National Cheng Kung University

Thanks to the works of a number of scientists it is known that severe space weather can cause extensive social and economic disruptions in the modern high-tech society. It is therefore important to understand what determines the severity of space weather, and whether it can be predicted. We present the results obtained from the analysis of solar-geophysical data during 30 space weather events that occurred since 1957 and produced geomagnetic storms of intensity less than -275 nT, and the Carrington event of 1859. The results seem to indicate that (1) space weather can become severe occasionally (7 since 1957) as experienced by satellite systems, Earth-based systems and Earth's environment. (2) It is the impulsive energy (or power) at the leading edge of the CMEs (coronal mass ejections) mainly due to impulsive leading edge velocity and partly due to density that determines the severity of space weather in the heliosphere; the higher the impulsive velocity (sudden increase by over 275 km s⁻¹ over the background), the more severe the space weather. (3) Such CMEs with IMF Bz also southward from the leading edge cause severe space weather on Earth though the magnitude of southward Bz does not seem important, and the minimum impulsive velocity for severe space weather on Earth seems higher than that for severe space weather in heliosphere. (4) CMEs having northward IMF Bz at the leading edge do not seem to cause severe space weather on Earth though they can lead to geomagnetic storms of long duration main phase with intensity less than even -420 nT. Measurements of the rate of energy release during CME eruption (or measurements of the velocity and density of CMEs as close to the Sun as possible) and orientation of IMF Bz in CMEs may be used for predicting severe space weather.

キーワード: 極端宇宙天気現象, 太陽フレア, CME, 磁気嵐
Keywords: Severe space weather, solar flare, CME, geomagnetic storm

NICT 宇宙天気研究および定常業務活動について Research and operational activity of NICT space weather

石井 守^{1*}
ISHII, Mamoru^{1*}

¹ 情報通信研究機構
¹NICT

ICT has been managing operational space weather forecast since 1988 as a member of International Space Environment Services (ISES). We provide the space weather forecast information every day including holidays with email and web site, and the number of subscribers is over 9,000.

In addition to these operational activity, we have research activities for improving the performance of space weather forecast. We have three research projects, (1)sun and solar wind (2)magnetosphere, and (3)ionosphere with three approaches as follows: observation, simulation and informatics. These activities are progressing under the cooperation with domestic/international organizations which is suitable to the concept of VarSITI. Especially the connection to the operational users of space weather is important but very few institute only works for that including NICT. In this meaning we NICT can contribute to the activity of VarSITI.

キーワード: 宇宙天気
Keywords: space weather

Researches on solar eruptive phenomena and solar activities using chromospheric imaging data with the CHAIN

Researches on solar eruptive phenomena and solar activities using chromospheric imaging data with the CHAIN

上野 悟^{1*}; 柴田 一成¹; 浅井 歩¹; 北井 礼三郎¹; 森田 諭²; 大辻 賢一²; Cabezas Denis P.³; G. Escate Maria V.³; イシツカ ホセ⁴; 山口 雅史¹; 渡邊 皓子¹; 木村 剛一¹; 一本 潔¹; 永田 伸一¹; 仲谷 善一¹
UENO, Satoru^{1*}; SHIBATA, Kazunari¹; ASAI, Ayumi¹; KITAI, Reizaburo¹; MORITA, Satoshi²; OTSUJI, Kenichi²; CABEZAS, Denis P.³; G. ESCATE, Maria V.³; ISHITSUKA I., Jose K.⁴; YAMAGUCHI, Masashi¹; WATANABE, Hiroko¹; KIMURA, Goichi¹; ICHIMOTO, Kiyoshi¹; NAGATA, Shin'ichi¹; NAKATANI, Yoshikazu¹

¹ 京都大学, ² 国立天文台, ³ Presbiteriana Mackenzie 大学大学院、ブラジル, ⁴ ペルー地球物理学研究所
¹ Kyoto University, Japan, ² NAOJ, ³ Presbiteriana Mackenzie University, Brazil, ⁴ Institute of Geophysics in Peru

In 2010, Kyoto University moved the Flare Monitoring Telescope (FMT) from Japan to Peru, and currently we are technically supporting two projects of building new solar telescopes in Saudi Arabia and Algeria under the Continuous H-Alpha Imaging Network (CHAIN) project. We also held international data analysis workshops three times during this four years to train foreign and domestic young researchers to analyze the data obtained by the FMT and Solar Magnetic Research Telescope (SMART) at Hida Observatory in Japan.

Current main scientific themes of the CHAIN project are

(1) 3D velocity field measurement of eruptive phenomena on the solar surface:

By applying "cloud model fitting" to multi-wavelength H-alpha chromospheric images, we can calculate physical parameters of moving features on the chromosphere. We especially focus on the 3D velocity field of erupting filaments to understand the process of growth and propagation of CMEs. Morimoto & Kurokawa (2003) statistically investigated time evolution of 3D velocity field of disappearing phenomena of chromospheric H-alpha filaments, and they observationally showed that if H-alpha filaments actually erupted, then CMEs necessary appears. On the other hand, however, when filaments are disappeared without eruption, sometimes CMEs occur. We have to know how to CMEs are generated in such a case, comparing with other observational data or MHD simulations. Moreover, we will statistically investigate relationship between characteristics of filament eruptions and geo-effectiveness of the CMEs.

(2) Detection of shock waves (Moreton wave) generated by solar explosive phenomena:

The FMT is quite effective to detect Moreton wave that was explained as the intersection of coronal shock wave on the solar chromosphere. Narukage et al. (2002) and Asai et al. (2012) observationally showed that Moreton waves detected in H-alpha chromospheric images actually correspond to foot-point of coronal shock waves observed with X-ray telescope or EUV telescope on satellites. On the other hand, even if flares that has almost the same intensity, sometimes they are accompanied by Moreton waves and sometimes they are not accompanied by them. We are investigating what are differences between flares "with" and "without" Moreton waves. According to our preliminary statistical study, the angle of filament eruption from the solar surface seems to be the most important parameter. We promote more investigation for more cases more accurately by combining with other satellite data or MHD simulations. Moreover, after that, we want to compare with characteristics of radio bursts and to investigate time evolution of various shock waves from solar surface to interstellar space.

(3) Estimation of solar UV radiation and comparison with ionospheric variation:

Solar radiation is also one of very important element for understanding the change of space weather. Especially solar UV around from 50 to 140 nm has strong influence for the ionosphere of the earth. One of good index of the change of ionosphere is the "geomagnetic solar daily quiet variation (Sq)". It basically changes well obeying the variation of solar UV radiation. When we investigate long-term variation of solar component and terrestrial component of Sq, currently we usually use F10.7 flux, sunspot number etc. as indexes of solar activity, because actual UV observations started just after around 1995. However, the indexes such as F10.7 do not accurately express variation of UV radiation and we cannot know accurate variation of terrestrial component of Sq. Therefore, we are currently trying to reproduce UV intensity from chromospheric images that have been obtained during longer-term than UV data. After this, by using estimated variation of solar UV radiation, we want to investigate relationship between solar activities and other physical parameters of ionosphere, too.

PEM09-24

会場:211

時間:4月28日 16:45-17:00

In this talk, we introduce our recent results and plans in VarSITI period on these themes.

キーワード: CHAIN, 太陽フレア, フィラメント噴出, モートン波, 彩層, 太陽紫外線放射
Keywords: CHAIN, solar flare, filament eruption, Moreton wave, chromosphere, solar UV radiation

EISCAT_3D計画 The EISCAT_3D project

野澤 悟徳^{1*}; 宮岡 宏²; 小川 泰信²; 大山 伸一郎¹; 中村 卓司²; 藤井 良一¹
NOZAWA, Satonori^{1*}; MIYAOKA, Hiroshi²; OGAWA, Yasunobu²; OYAMA, Shin-ichiro¹; NAKAMURA, Takuji²; FUJII, Ryoichi¹

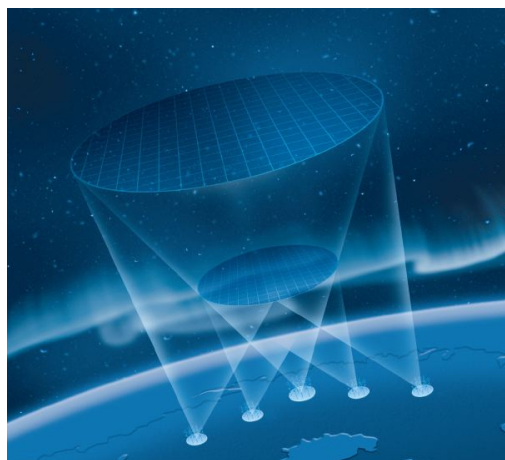
¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 国立極地研究所
¹STEL, Nagoya University, ²NIPR

The EISCAT (European Incoherent SCATter) Scientific Association is an international research organization, which operates incoherent scatter (IS) radars in northern Scandinavia and Svalbard for studies of physical and environmental processes in the middle/upper atmosphere and near-Earth space. Since 1996, National Institute of Polar Research, in collaboration with STEL, Nagoya University, has promoted EISCAT collaborations for the user community in Japan to utilize the EISCAT facility as well as EISCAT data for their scientific subjects. Japanese scientists have been studying several scientific topics such as 3-D ionospheric current system, aurora dynamics, ion upflow, neutral wind dynamics, using EISCAT data, and published 110 papers from 1995 to 2013.

EISCAT_3D is the major upgrade of the existing EISCAT radars in northern Scandinavia. The EISCAT_3D radar is a new phased array IS radar using the center frequency 233 MHz. The idea was firstly presented as 'E-prime' in 2003. The EISCAT community has been doing large efforts to make it happen since then. The design study was conducted from 2005 to 2009, and the preparatory phase program has been conducting since 2009 (until September 2014). With a multi static phased array system composed of one central active (transmitter-receiver) site and four receiver sites, the EISCAT 3D system is expected to provide us 10 times higher temporal and spatial resolution and capabilities than the present EISCAT radars. Furthermore, continuous observations can be made, and will provide us with long-term data sets of the polar ionosphere, which can be used to investigate variations of the ionosphere as well as the neutral wind dynamics (in particular, studies of planetary waves and tidal waves). In this presentation, we will overview the EISCAT_3D project, and present our strategic plan of national funding for the EISCAT_3D as well as science targets.

キーワード: EISCAT_3D, Incoherent Scatter radar, polar ionosphere, Magnetosphere-Ionosphere-Thermosphere coupling, 3D imaging observation, Mesosphere

Keywords: EISCAT_3D, Incoherent Scatter radar, polar ionosphere, Magnetosphere-Ionosphere-Thermosphere coupling, 3D imaging observation, Mesosphere



Introduction of ROSMIC project in SCOSTEP/VarSITI program Introduction of ROSMIC project in SCOSTEP/VarSITI program

大塚 雄一^{1*}; 中村 卓司²; 高橋 幸弘³; Luebken Franz-Josef⁴; Ward William⁵; Seppala Annika⁶
OTSUKA, Yuichi^{1*}; NAKAMURA, Takuji²; TAKAHASHI, Yukihiko³; LUEBKEN, Franz-josef⁴; WARD, William⁵; SEP-
PALA, Annika⁶

¹Nagoya University, ²National Institute of Polar Research, ³Hokkaido University, ⁴Leibniz Institute of Atmospheric Physics, Germany, ⁵University of New Brunswick, Canada, ⁶Finnish Meteorological Institute, Finland

¹Nagoya University, ²National Institute of Polar Research, ³Hokkaido University, ⁴Leibniz Institute of Atmospheric Physics, Germany, ⁵University of New Brunswick, Canada, ⁶Finnish Meteorological Institute, Finland

ROSMIC (Role Of the Sun and the Middle atmosphere/thermosphere/ionosphere In Climate, co-leaders: F.-J. Luebken, A. Seppala, W. Ward) is one of the four projects in VarSITI started in 2014 as a five year project. The goal of the project is to understand the impact of the Sun on the terrestrial middle atmosphere/lower thermosphere /ionosphere (MALTI) and Earth's climate and its importance relative to anthropogenic forcing over various time scales from minutes to centuries. ROSMIC project consists of four sub-projects: 1) Coupling through solar variability (radiative, electrodynamics, ionospheric and photochemical effects), 2) Coupling by dynamics, 3) Trends in Mesosphere and Lower Thermosphere, 4) Trends and solar cycle effects in the thermosphere (incl. technological aspects). The project will be conducted under close collaborations between observations and modelings. Observations include both usage of existing data records and new measurements from a wide range of ground based (lidars, radars, mappers), in-situ (rockets, balloons, aircraft), and satellite (e.g., AIM, TIMED) instruments. Dedicated models are used and developed for a better understanding of specific processes (e.g. gravity wave breaking, ice formation). Global scale models will be modified and applied from the ocean to the thermosphere. Through the five year projects, we expect better understanding of the impact of solar activity on the entire atmosphere, relative to anthropogenic forcing and natural long term variability. In the paper, we will introduce outline of ROSMIC project and discuss how Japanese activities contribute to the ROSMIC project.

キーワード: Sun, middle atmosphere, thermosphere, ionosphere, climate
Keywords: Sun, middle atmosphere, thermosphere, ionosphere, climate

VarSITIプログラムへのIUGONETの貢献 Contribution of IUGONET to the VarSITI program

田中 良昌^{1*}; 谷田貝 亜紀代²; 新堀 淳樹³; 小山 幸伸⁴; 阿部 修司⁵; 梅村 宜生²; 佐藤 由佳¹; 八木 学⁶; 上野 悟⁷; 堀智昭²

TANAKA, Yoshimasa^{1*}; YATAGAI, Akiyo²; SHINBORI, Atsuki³; KOYAMA, Yukinobu⁴; ABE, Shuji⁵; UMEMURA, Norio²; SATO, Yuka¹; YAGI, Manabu⁶; UENO, Satoru⁷; HORI, Tomoaki²

¹ 国立極地研究所, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 京都大学生存圏研究所, ⁴ 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター, ⁵ 九州大学国際宇宙天気科学・教育センター, ⁶ 東北大学理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター, ⁷ 京都大学大学院理学研究科附属天文台

¹National Institute of Polar Research, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ³Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ⁴World Data Center for Geomagnetism, Kyoto University, ⁵International Center for Space Weather Science and Education, Kyushu University, ⁶Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Tohoku University, ⁷Kwasan and Hida Observatories, School of Science, Kyoto University

The Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact (VarSITI) program aims at understanding the current extremely low solar activity and its influence on the Earth for various time scales and locations. In order to achieve these goals, it is necessary to conduct an interdisciplinary study that uses various types of data from multiple regions, such as solar interior, solar surface, heliosphere, magnetosphere, ionosphere, and atmosphere. The Inter-university Upper atmosphere Global Observation NETWORK (IUGONET) project has developed the research infrastructure to promote such an interdisciplinary study. The IUGONET is an inter-university project by five Japanese institutes and universities (Tohoku University, Nagoya University, Kyoto University, Kyushu University, and the National Institute of Polar Research) that have been developing a worldwide ground-based observation network of the upper atmosphere, Sun and planets. The main tools developed by the IUGONET are metadata database and data analysis software.

The IUGONET metadata database (IUGONET-MDB) enables cross-searching of data distributed across the member institutes/universities of IUGONET. The metadata of various ground-based observational data have already been registered not only by the members of IUGONET but also by the other Japanese institutes, for example, the National Institute of Information and Communications Technology (NICT), the Solar Observatory of National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), and the Kakioka magnetometer observatory, Japan Meteorological Agency. We also consider including data from the satellites and the numerical simulation in the future. The iUgonet Data Analysis Software (UDAS) is a plug-in software of Space Physics Environment Data Analysis System (SPEDAS), which is an integrated analysis platform for visualizing and analyzing the ground-based and satellite observation data. The UDAS has provided many routines to load the ground-based observational data from various types of instruments, including solar telescope, solar radio telescope, ionosphere and atmosphere radars, imagers, magnetometers, and so on. The SPEDAS also includes a plug-in tool from a Japanese satellite mission, Energization and Radiation in Geospace (ERG), which will explore the dynamics of the radiation belts in the Earth's inner magnetosphere. Thus, they will be powerful tools for four projects of the VarSITI, in particular, Specification and Prediction of the Coupled Inner-Magnetospheric Environments (SPeCIMEN) and Role Of the Sun and Middle atmosphere thermosphere/ionosphere in Climate (ROSMIC). In the presentation we will show some examples of scientific researches that the IUGONET has done using the upper atmospheric data and discuss our possible contribution to the VarSITI program.

キーワード: IUGONET, 超高層大気, 地上観測, メタデータデータベース, データ解析ソフトウェア, 分野横断研究

Keywords: IUGONET, upper atmosphere, ground-based observation, metadata database, data analysis software, interdisciplinary study

ISS 搭載 IMAP/VISI による下部・上部熱圏大気光ならびにオーロラ発光分布観測 Characteristics of airglow and auroral emissions in the lower- and upper-thermosphere obtained with IMAP/VISI on ISS

坂野井 健^{1*}; Perwitasari Septi¹; 坂本 大樹¹; 齊藤 昭則²; 大塚 雄一³; 秋谷 祐亮²; 穂積 裕太²; 山崎 敦⁴; 鈴木 臣³
SAKANOI, Takeshi^{1*}; PERWITASARI, Septi¹; SAKAMOTO, Daiki¹; SAITO, Akinori²; OTSUKA, Yuichi³; AKIYA,
Yusuke²; HOZUMI, Yuta²; YAMAZAKI, Atsushi⁴; SUZUKI, Shin³

¹ 東北大学大学院理学研究科, ² 京都大学大学院理学研究科, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ⁴ 宇宙科学研究所
¹Grad. School of Science, Tohoku University, ²Grad. School of Science, Kyoto University, ³STEL, Nagoya University, ⁴ISAS /
JAXA

We report the recent highlights of results on airglow and auroral distribution in the lower- and upper-thermosphere based on IMAP/VISI measurement data, and also report the current status of the operation VISI. IMAP/VISI is a visible imaging spectrometer which aims to measure nightglow emissions from ISS (~400 km altitude) covering the wide range from +51 deg. to ~50 deg. in geographical latitude. VISI adopts two field-of-views (+/-45 deg. to nadir) to make a stereoscopic measurement of the airglow and aurora emission to subtract background contaminations from clouds and ground structures. Each field-of-view has 90 deg width faced perpendicular to the orbital plane, which is mapped to ~600 km width at 100 km altitude and ~300 km width at 250 km altitude. A continuous line-scanning for all emissions lines in the nightside hemisphere in the latitudinal range from +51 deg. to -51 deg. is carried out by VISI with the successive exposure cycle with a time interval of 1 - several sec, which corresponds to a spatial resolution of 10 km ~ a few tens km. From VISI data, we obtain the global distribution of airglow emissions (O 630 nm at 250 km alt., OH Meinel band 730 nm at 87km alt., and O2 (0-0) atmospheric band 762 nm at 95 km alt.) and auroral emissions (O 630 nm at 250 km alt., N2 1P 730 nm at ~110 km alt. and O2 762 nm at ~120 km alt.).

Since the successful launch of IMAP on August 2012, we found that meso-scale (~10 - 50 km) wave pattern is always seen in the airglow emission at O2 762 nm mainly at mid-latitudes. The typical O2 airglow intensity is several hundreds R to several kR. Most of O2 airglow shows straight-shaped pattern, which indicates plane atmospheric gravity waves. In addition, we found more than 30 events on the concentric gravity wave (CGW) pattern in O2 airglow emission, which suggests that the local generation source in the lower-atmosphere. 26 CGW events out of total 30 events happened in March and April in 2013, which suggests its seasonal effect.

VISI sometimes measured auroral emissions at high-latitudes during geomagnetically disturbed period. One of major purposes of auroral measurement with VISI is to understand the generation process of gravity wave by auroral activity. However, we could not obtain the gravity wave event caused by aurora so far. Another target of VISI high-latitude measurement is SAR arc in the sub-auroral region. Even though the solar activity is expected to be maximum in 2012 ~ 2013, we could not obtain the SAR arc data so far. However, we still expect to measure the SAR arc event caused with a major storm during a solar declining phase.

In addition, in the low-latitude region around the magnetic equator, we frequently obtained the enhanced O630 nm emission associated with equatorial ionization anomaly (EIA) overlapped with small-scale dark filament pattern, i.e., plasma bubble. We found the seasonal dependence of O630 nm intensity in the EIA which is consistent with the vertical motion of ionospheric plasma due to the dragged by thermospheric day-to night tidal winds. The O630 nm intensity associated with EIA significantly decreased during the main phase of magnetic storm when the Dst index is larger than 90 nT. This fact suggests that the westward electric field associated with Region-2 current system penetrates to the ionosphere in the lower latitude that reduce the upwelling of EIA. We also obtained the MSTID pattern in O 630 nm emission in the eastside of North America on August 1 2013 by comparing the O 630 nm emission and TEC map. We carried the special operation for the measurement of MSTID last winter, and will summarize the result.

Acknowledgements

We thank the IMAP science team and the MCE team for their kind support.

キーワード: 国際宇宙ステーション, 大気光, 熱圏, 電離圏, 船外プラットフォーム, 重力波
Keywords: ISS, airglow, thermosphere, ionosphere, JEM, gravity wave

屋久島の気象にみる太陽活動の影響 The effect of Solar radiation on the Climate of Yakushima

村木 綏^{1*}; 柴田 祥一²; 柴田 隆³
MURAKI, Yasushi^{1*}; SHIBATA, Shoichi²; SHIBATA, Takashi³

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 中部大学工学部, ³ 名古屋大学環境学研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Department of Engineering, Chubu University, ³Graduate School of Environment Studies, Nagoya University

Yakushima (Yaku-island) is located to the south of Kyushu in Japan and is known as one of the world natural heritages of UNESCO. There are mountains on the island with heights of about 2,000m where cedar trees have lived for more than 2000 years. We analyzed meteorological data for the island from 1938 to 2013 and found several interesting results:

- (1) Eleven and 20-30-year-periodicities are present in the data on daylight hours. Similar periodicities are, however, not seen in the data on temperature or water vapor pressure.
- (2) The 11-year-periodicity appears strongly in June, the rainy season of the island, while the 20-30-year-periodicity is seen throughout the year except in April.
- (3) An 11-year-periodicity can be also seen in the data for June and July at the other remote island Hachijyojima situated 300km to the south of Tokyo. Both islands are located on the Kuroshio warm current.
- (4) The daylight hour data for January increased systematically around 1976. This may be related to the change of the North Hemisphere Temperature (NHT) in 1976.

In order to explain the observations, we examined the following hypothesis. Ocean waves produce large numbers of tiny salty droplets which contain plankton on the sea surface. These droplets (aerosols) are winded up and reach at the top of the mountain. They may act as cloud condensation nuclei (CCN).

It is known that the intensity of the UV light from the Sun is modulated by solar activity. It is also possible that the growth rate of CCN is affected by the solar UV radiation in the early stage of the aerosol formation process. We speculate that this may be why solar activity is recognized in the daylight hour data. We have not accounted for the 20-30-year-periodicity in the data, but we speculate that this could be related to the Pacific Decadal Oscillation (PDO). Details will be presented at the conference.

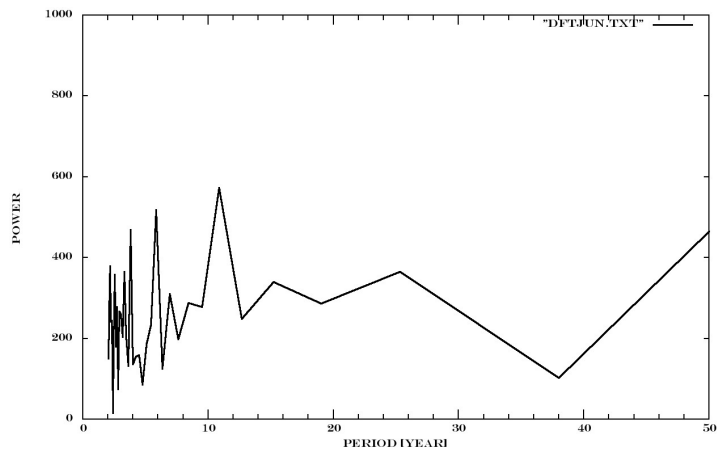
キーワード: 太陽活動, 太陽紫外線, 雲量, 日照時間, エアロゾル, 太平洋 10 年振動

Keywords: solar activity, solar Ultra-Violet light, cloud, daylight hours, aerosols, Pacific Decadal Oscillation

PEM09-29

会場:501

時間:4月29日 11:00-11:15



観測ロケットによる熱圏—電離圏—磁気圏結合の観測 Sounding rocket observation of the thermosphere-ionosphere-magnetosphere coupling

阿部 琢美^{1*}; 斎藤 義文¹
ABE, Takumi^{1*}; SAITO, Yoshifumi¹

¹ 宇宙航空研究開発機構

¹ Japan Aerospace Exploration Agency

The polar ionosphere is an open window of the Earth atmosphere to the outside space such as the magnetosphere and the solar wind, because energy and/or mass tends to be injected along the magnetic fields via various physical processes. In this connection, there exist numerous unique and unrevealed phenomena in the polar ionosphere.

Sounding rocket is a powerful platform which provides opportunity to make a vertical sounding through the lower thermosphere, ionosphere and magnetosphere while satellite generally flies in a horizontal direction, and it has an advantage so that it can enable us to make a brief survey of the upper atmosphere in the vertical direction. The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) of Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has conducted sounding rocket experiments in Norway to investigate the upper atmospheric dynamics and chemistry induced by the auroral energy input. The primary objectives of these experiments include various topics; pulsating aurora, ozone chemistry affected by the auroral activity, fine structure of the auroral arc, and the cusp ion outflow. These subjects arise from phenomena that is caused by interaction between the solar wind or magnetospheric plasma and the upper atmosphere. It is necessary to make a comprehensive observation of the energy input, the response and consequences for better understanding of the causal relationship.

There are several candidates of the sounding rocket experiment which should be conducted in the auroral region for a direct measurement of the energy input from higher altitudes and the ionospheric response. To obtain the high-time resolution data of the ionospheric ion outflow which is one of the most significant phenomena of the magnetosphere-ionosphere coupling, it is necessary for the sounding rocket equipped with plasma and field instruments to reach up to 1000 km altitude. For such an experiment, it will be a key to get information on the wave-particle interaction which may play an important role in accelerating ionospheric ions. It is well known that the polar lower thermosphere has a significant response to auroral energy input from higher altitudes. This indicates an existence of energy inputs from the magnetosphere probably in the form of electric fields or energetic particles. It is important to understand quantitatively the momentum transfer between the neutrals and plasma by observing the neutral wind and ion drift simultaneously. The sounding rocket experiment to elucidate such a neutral-plasma coupling is also under consideration.

Thus, we are considering several candidates of the sounding rocket experiments which should be conducted in the auroral region to investigate the upper atmospheric response against the energy input from higher altitudes. In this presentation, we will briefly introduce some of the promising experiments.

キーワード: 観測ロケット, 熱圏, 電離圏磁気圏結合, その場観測, オーロラ

Keywords: sounding rocket, thermosphere, M-I coupling, in-situ observation, aurora

Trend of SST anomalies and Solar Activity Trend of SST anomalies and Solar Activity

YAMASHIKI, Yosuke^{1*}
YAMASHIKI, Yosuke^{1*}

¹GSAIS, Kyoto University, ²APL, JAMSTEC
¹GSAIS, Kyoto University, ²APL, JAMSTEC

The tendency of anomalies of SST during the fluctuation of Sunspot numbers are studied using composite SST and fluctuation of SSN.

In general, El Nino tendency is observed during Sunspot numbers (SSN) minimum, while La Nina tendency is observed in SSN maximum. It is generally accepted that the frequency of Solar Activity varies in 11 years, during those years there are SSN maximum and minimum. On the other hand, SST anomalies do not correspond well to the frequency of the solar activity. In addition, the thermal structure of sea surface temperature (SST) varies during El Nino and La Nina. Moreover, the impact of large-scale solar flare on the SST has not been clearly evident for the 4 days backward and forward comparison for the flare event on 2 April 2001 and 28 October 2003 on SST, wind velocity and OLR. Since the ocean has higher heat capacity, this might prevent the appearance of immediate SSN effect through the surge of any frequency in any band of electromagnetic waves from the SUN. The subtle impact might be confirmed either through cloud or wind. The long-term impact should also be considered by precise integration of the total energy on each wavelength. Numerical simulation is also expected to validate this issue.

キーワード: Solar activity, SST, Anomalies
Keywords: Solar activity, SST, Anomalies

Recent observations by Rayleigh/Raman lidar and developments of tunable resonance scattering lidar system in JARE

Recent observations by Rayleigh/Raman lidar and developments of tunable resonance scattering lidar system in JARE

江尻省^{1*}; 津田卓雄¹; 西山尚典¹; 阿保真²; 富川喜弘¹; 鈴木秀彦³; 川原琢也⁴; 堤雅基¹; 中村卓司¹
EJIRI, Mitsumu K.^{1*}; TSUDA, Takuo¹; NISHIYAMA, Takanori¹; ABO, Makoto²; TOMIKAWA, Yoshihiro¹; SUZUKI, Hidehiko³; KAWAHARA, Takuya⁴; TSUTSUMI, Masaki¹; NAKAMURA, Takuji¹

¹ 国立極地研究所, ² 首都大学東京大学院システムデザイン研究科, ³ 立教大学理学部, ⁴ 信州大学工学部
¹National Institute of Polar Research, ²Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University, ³College of Science, Rikkyo university, ⁴Faculty of Engineering, Shinshu University

The National Institute of Polar Research (NIPR) is leading a six year prioritized project of the Antarctic research observations since 2010. One of the sub-project is entitled "the global environmental change revealed through the Antarctic middle and upper atmosphere". Profiling dynamical parameters such as temperature and wind, as well as minor constituents is the key component of observations in this project, together with a long term observations using existent various instruments in Syowa, Antarctica (69S, 39E). As a part of the sub-project, Rayleigh/Raman lidar was installed at Syowa Station in January, 2011 and has been operated at more than 350 nights (>3000 hours clear sky) by February, 2014. The Rayleigh/Raman lidar observes temperature and clouds in the mesosphere, the stratosphere and part of the troposphere, and providing seasonal and yearly variations of temperature profiles and data of gravity wave characteristics in the middle atmosphere, as well as high altitude clouds of PMC (polar mesospheric clouds) and PSC (polar stratospheric clouds). In order to extend the height coverage to include mesosphere and lower thermosphere region, and also to extend the parameters observed, a new resonance scattering lidar system with tunable wavelengths is developed at NIPR in Tachikawa (36N, 139E). The lidar transmitter is based on injection-seeded, pulsed alexandrite laser for 768-788 nm (fundamental wavelengths) and a second-harmonic generation (SHG) unit for 384-394 nm (second harmonic wavelengths). The laser wavelengths are tuned in to the resonance wavelengths by a wavemeter that is well calibrated using a wavelength-stabilized He-Ne laser. The new lidar has capabilities to measure density variations of minor constituents such as atomic iron (Fe, 386 nm), atomic potassium (K, 770 nm), calcium ion (Ca⁺, 393 nm), and aurorally excited nitrogen ion (N₂⁺, 390-391 nm) and temperature profiles in the mesosphere and lower thermosphere (MLT) region using resonance scatter of K. Currently, the fundamental laser pulses are transmitted with 120-160 mJ/pulse at approximately 25 Hz (i.e., ~3-4 W) and the backscattered signal is received with a 35 cm diameter telescope. The new lidar system will be installed two years later at Syowa Station and provide information on the mesosphere and lower thermosphere as well as the ionosphere. This unique observation is expected to make important contribution to studies on the atmospheric vertical coupling process and the neutral and charged particle interaction. In this talk, current status of the research, observations, and system developments will be presented.

キーワード: ライダー, 共鳴散乱, レイリー/ラマン, 南極観測, 昭和基地
Keywords: Lidar, Resonance scatter, Rayleigh/Raman, Antarctic observation, Syowa Station

気候変動の準20年周期成分に起きる400年毎の振幅拡大—中部日本の夏季降水量の場合 400 years interval of amplification in quasi bi-decadal climate variability: a case of summer precipitation in Japan

中塚 武^{1*}
NAKATSUKA, Takeshi^{1*}

¹ 総合地球環境学研究所

¹ Research Institute for Humanity and Nature

●はじめに

年単位の古気候データを解析してみると、約20年の周期をもつ変動が、あらゆる時代に普遍的に見られる。20年の周期性には、大気海洋相互作用などの気候の内部振動も関係していると考えられるが、一方で、気候の外力にも、月の公転軌道の変化など、準20年の周期性をもつものが多く、太陽活動の変動は、その典型である。こうした気候の数十年周期変動の振幅は、しばしば非常に大きくなり、歴史上、数々の異常気象を引き起こし、飢饉や戦乱、体制の崩壊など、人間社会に大きな影響を与えてきた。このような自然の気候変動の振幅変動が、なぜ起きるのか。そのメカニズムを理解し、将来の振幅拡大を事前に予測できるようになれば、気候変動への社会の適応可能性を向上させていく上で、地球温暖化予測研究とは別の意味で、過去の気候から未来の気候変動を予測する研究が、重要性を増していくものと思われる。本講演では、樹木年輪の酸素同位体比を用いて過去2千年以上に亘って年単位で復元された、中部日本の夏季降水量の時系列データに基づいて、気候の準20年周期変動の成分が、ほぼ正確に400年に一度、振幅拡大を引き起こし、それが洪水や干ばつ等の自然災害の頻発を介して、歴史上の日本社会の体制変化につながった可能性を示すと共に、振幅変動のメカニズムの解明に向けて、年輪セルロースの各種同位体比のデータを用いて、振幅拡大時の気候学的様相を議論する。

●年輪酸素同位体比を用いた夏季降水量の復元

最近まで日本では、降水量の経年変動は、古日記の天候記録が得られる江戸時代以降についてだけ議論されてきたが、近年、樹木年輪セルロースの酸素同位体比を用いて、過去の夏季降水量の変動を復元する研究が、日本を含むアジアモンスーン地域で広く行われるようになってきた。セルロースの酸素同位体比は、その原料となる糖類が作られた光合成の際の葉内水の酸素同位体比を反映するが、それは降水の酸素同位体比と相対湿度を介して、降水量と顕著な負の相関を示すことが知られている。一般に、樹木は数百年以下の寿命しか持たないが、日本では古い建築物の材木、遺跡からの出土木製品、土砂崩れに巻き込まれた埋没木など、さまざまな時代から多数の木材試料を取得することが可能であり、それらの木材の年輪セルロース酸素同位体比のデータを組み合わせると、中部日本における夏季降水量の変動が、年単位で過去2千年以上に亘って復元された。

●400年に一度起きる準20年周期変動の振幅拡大

年輪セルロース酸素同位体比の時系列データを、ウェーブレット解析に掛けると、約400年に一度、即ち、2世紀、6世紀、10世紀、14世紀、18世紀に、20-50年の数十年周期（特に、準20年周期）変動の振幅が拡大（長期に亘る洪水や干ばつが発生）したことが分る。2, 6, 14世紀は弥生、古墳時代の終焉期、及び中世の動乱期（鎌倉時代の末期から南北朝期）に対応し、10, 18世紀も、平安時代中期の律令制度の崩壊や、江戸時代における大飢饉の発生など、社会変化が生じた時代である。その歴史的な因果関係については、別途研究を進めるとして、本講演では、その気候学的メカニズムについて、考察したい。400年に一度起きる準20年周期変動の振幅拡大は、突然の酸素同位体比の低下（降水量の増大）で始まるが、多くの場合、それに炭素安定同位体比の増大と14C濃度の低下が伴っている。現時点で、これら全ての要素の変化を統一的に解明できるメカニズムとしては、低緯度地域からの大規模な空気塊の移流、即ち夏季モンスーンの突然の活発化が考えられる。特に14世紀には、この変動に対応した急激な温暖化が、アジアを含む南北両半球の中・低緯度地域で起きたことが分っており、夏季モンスーンの変動によるものであることが例証される。準20年周期変動の振幅拡大が、太陽活動の800年周期変動の極大・極小期における振幅拡大などに対応しているとしたら、今後、その間をつなぐ天文学的、気候学的なメカニズムを詳細に明らかにして行く必要があるであろう。

キーワード: 樹木年輪, 酸素同位体, 20年周期変動, 降水量

Keywords: tree ring, oxygen isotope, bi-decadal change, precipitation

高解像度 GPS 全電子数観測を利用した電離圏研究 Ionospheric studies using high-resolution GPS total electron content observations

津川 卓也^{1*}; 西岡 未知¹; 齊藤 昭則²; 大塚 雄一³; 石井 守¹
TSUGAWA, Takuya^{1*}; NISHIOKA, Michi¹; SAITO, Akinori²; OTSUKA, Yuichi³; ISHII, Mamoru¹

¹ 情報通信研究機構, ² 京都大学大学院理学研究科, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹National Institute of Information and Communications Technology, ²Graduate School of Science, Kyoto University, ³Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

Two-dimensional total electron content (TEC) observations using dense GPS receiver networks have been applied to studies of various ionospheric disturbances since mid-1990s. For the purpose of monitoring and researching the ionospheric disturbances, we have developed high-resolution TEC maps using dense GPS receiver networks. We have been collecting all the available GNSS receiver data in the world to expand the TEC observation area. These GNSS data are provided by IGS, UNAVCO, SOPAC, and other regional data centers. Currently, we are providing global and regional maps of absolute TEC, detrended TEC, and rate of TEC change index (ROTI). These data and quick-look maps are archived and available in DRAWING-TEC website (<http://seg-web.nict.go.jp/GPS/DRAWING-TEC/>).

These high-resolution GPS-TEC maps have been applied to studies of various ionospheric disturbances. Sudden increase in TEC caused by solar flares were studied using global TEC observations. Regional TEC observations have revealed new characteristics of large- and medium-scale traveling ionospheric disturbances (LSTIDs and MSTIDs). Recently, clear concentric waves and short-period oscillations were observed after huge earthquakes/tsunamis and massive tornadoes, indicating that acoustic and/or gravity waves propagate upward from the lower atmosphere and reach the ionosphere.

These GPS-TEC observations will contribute the next SCOSTEP program VarSITI, particularly to the ROSMIC (Role Of the Sun and the Middle atmosphere/thermosphere/ionosphere In Climate) project.

キーワード: 電離圏, GPS, 全電子数, 熱圏

Keywords: ionosphere, GPS, TEC, thermosphere

太陽活動の変動に伴うグリーンランド気温の変化 Modulation of Greenland temperature through changes in solar activity

小端 拓郎^{1*}; 川村 賢二¹; 東 久美子¹
KOBASHI, Takuro^{1*}; KAWAMURA, Kenji¹; GOTO-AZUMA, Kumiko¹

¹ 国立極地研究所

¹National Institute of Polar Research

During the past decades, Greenland climate has undergone rapid warming and ice sheet ablation in coastal region with a nearly 1 mm/y sea level contribution. For sea level projection, it is critical to understand the mechanisms of Greenland temperature variability. Greenland temperature is known to be affected by the North Atlantic Oscillation (NAO), and it is also highly correlated with North Atlantic average temperature. Using the Greenland temperature reconstructed from argon and nitrogen isotopes in occluded air in GISP2 ice core (Kobashi et al., 2011), we found Greenland temperature deviated negatively (positively) from North Hemispheric (NH) temperature trend during stronger (weaker) solar activity over the past 800 years (Kobashi et al., 2013b). We also confirmed this effects continued over the past 4000 years (Kobashi et al., 2013a). Climate modeling suggests that the deviation was caused by solar induced atmospheric circulation changes (like NAO). The model also suggests that Atlantic meridional circulation weakens during the stronger sun by similar processes as enhanced greenhouse effect (Kobashi et al., 2013b). From the past relation between Greenland temperature anomaly and solar variability, it can be speculated that future grand solar minimum may induce additional 2 °C warming in Greenland with increased melting of the ice-sheet.

Kobashi, T., Kawamura, K., Severinghaus, J. P., Barnola, J.-M., Nakaegawa, T., Vinther, B. M., Johnsen, S. J., and Box, J. E.: High variability of Greenland surface temperature over the past 4000 years estimated from trapped air in an ice core, *Geophysical Research Letters*, 38, 10.1029/2011GL049444, 2011.

Kobashi, T., Goto-Azuma, K., Box, J. E., Gao, C.-C., and Nakaegawa, T.: Causes of Greenland temperature variability over the past 4000 years: Implications for Northern Hemispheric temperature change *Climate of the Past*, 9, 2299-2317, 2013a.

Kobashi, T., Shindell, D. T., Koder, K., Box, J. E., Nakaegawa, T., and Kawamura, K.: On the origin of Greenland temperature anomalies over the past 800 years, *Climate of the Past*, 9, 583-596, 2013b.

キーワード: 太陽活動, グリーンランド, 気温, 氷床コア, 気候変動

Keywords: solar activity, Greenland, temperature, ice core, climate change

Study of equatorial atmosphere/ionosphere under RISH/LAPAN collaboration Study of equatorial atmosphere/ionosphere under RISH/LAPAN collaboration

山本 衛^{1*}; Yatini Clara²; Budiyono Afif²; Hermawan Eddy²; 橋口 浩之¹
YAMAMOTO, Mamoru^{1*}; YATINI, Clara²; BUDIYONO, Afif²; HERMAWAN, Eddy²; HASHIGUCHI, Hiroyuki¹

¹ 京都大学生存圏研究所, ² インドネシア航空宇宙庁

¹RISH, Kyoto University, ²National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN)

The Earth's atmosphere is vertically coupled with atmospheric waves. Momentum/energy transfer from lower to upper atmosphere through wave propagation plays an big role of determining the dynamics of the atmosphere. The energy input from the sun is the maximum at the equator that leads to the intense convection, and then variety of atmospheric waves are generated in the region. The equatorial atmosphere could be regarded as an engine for dynamics of the whole atmosphere. RISH-LAPAN started collaboration for the study of equatorial atmosphere/ionosphere since mid 1980s, and conducted radiosonde observation campaigns, meteor and MF radars, etc. The Equatorial Atmosphere Radar (EAR) was installed over the geographic equator on Sumatra Island in 2001. We continued long-term experiment for more than 10 years, and have found that troposphere-stratosphere air mass exchange is controlled by the modulation of the tropopause by Kelvin waves. Turbulent structures of the tropopause region is also revealed by the EAR. In the ionosphere, spatial and temporal variability of the equatorial Spread-F are clearly observed by the multibeam experiment. With research collaboration with other Japanese university/institutes, the EAR site now became a complete observatory that consists of many instruments, i.e., a meteor radar, a boundary-layer radar, a meteorological radar, lidars, an ionosonde, GPS receivers, etc. The next big project of our own is to improve the EAR ability by building the Equatorial MU radar (EMU) aside of the EAR, which is now included in the Japanese Master Plan. RISH-LAPAN recently obtained a fund of "JSPS Bilateral Joint Research Projects" for FY2014-2016. We will have more chances to discuss collaborative research program for the equatorial atmosphere/ionosphere. In the presentation we summarize our collaboration, and discuss future direction of research including the new EMU.

Keywords: Atmosphere, Ionosphere, Indonesia, Equatorial Atmosphere Radar

ミリ波放射分光観測装置ネットワークによる中間圏大気組成分布の変動モニタリング Monitoring of molecular compositions in mesosphere with a network of ground-based millimeter-wave radiometers

長浜 智生^{1*}; 水野 亮¹; 中島 拓¹; 大山 博史¹; 磯野 靖子¹; 児島 康介¹; 堤 雅基²; 中村 卓司²; 前澤 裕之³; 小川 英夫³
NAGAHAMA, Tomoo^{1*}; MIZUNO, Akira¹; NAKAJIMA, Tac¹; OHYAMA, Hirofumi¹; ISONO, Yasuko¹; KOJIMA, Yasusuke¹; TSUTSUMI, Masaki²; NAKAMURA, Takuji²; MAEZAWA, Hiroyuki³; OGAWA, Hideo³

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 国立極地研究所, ³ 大阪府立大学

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²National Institute of Polar Research, ³Osaka Prefecture University

中間圏の大気組成は太陽地球系環境の変動の影響を大きく受ける。例えば、高エネルギー粒子の地球大気への侵入により中間圏・下部熱圏の大気組成が変動することが観測され、また大気重力波の活動性の変化が気温変動を通じて大気組成に影響することが見出されている。

このような地球内外の環境変動に伴う大気組成変動現象を把握しメカニズムを理解するために、名古屋大学 STE 研では高感度ミリ波超伝導受信機を搭載したミリ波放射分光観測装置ネットワークによるオゾンなどの中間圏大気微量分子の連続観測を開始した。これまでに3台のミリ波観測装置を南半球のチリ・アタカマ高地、アルゼンチン・リオガジェゴス市、南極・昭和基地に、また北海道・陸別町にも装置を設置して観測を進めている。特に、昭和基地においては250 GHz帯のミリ波分光観測により、オゾンとともに一酸化窒素(NO)の中間圏・熱圏でのカラム量を同時に計測しており、これまでにNOの季節変動と高エネルギー電子の侵入の影響と思われる突然増加現象を見出してきた。

本発表では、ネットワーク観測の詳細とこれらの観測結果、今後の計画について報告する。

キーワード: 中間圏, 大気組成変動, ミリ波観測

Keywords: mesosphere, composition change, millimeter-wave measurement

観測とGCMシミュレーションによる太陽活動変動に対する大気応答の研究 Observations and modeling studies for understanding atmospheric responses to unusual solar activities

藤原 均^{1*}; 三好 勉信²; 陣 英克³; 品川 裕之³; 野澤 悟徳⁴; 小川 泰信⁵; 片岡 龍峰⁵
FUJIWARA, Hitoshi^{1*}; MIYOSHI, Yasunobu²; JIN, Hidekatsu³; SHINAGAWA, Hiroyuki³; NOZAWA, Satonori⁴; OGAWA, Yasunobu⁵; KATAOKA, Ryuhô⁵

¹ 成蹊大学理工学部, ² 九州大学大学院理学研究院, ³ 情報通信研究 機構, ⁴ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ⁵ 国立極地研究所

¹Faculty of Science and Technology, Seikei University, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, ³National Institute of Information and Communications Technology, ⁴Solar Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ⁵National Institute of Polar Research

As pointed out by many researchers, the recent solar activities are very unusual; the solar activity during the last minimum in 2008-2009 was extremely low and that during the next maximum of sunspot cycle 24 shows much lower activities compared with the previous two solar maximums in cycle 22 and 23. In order to understand the complex system of the Earth's middle and upper atmosphere, these solar activities will give us important information and/or good opportunities for searching the basic states of the system both from the observations and GCM simulations. Comprehensive studies by observations from space, ground-based ones, and numerical simulations will enable us to understand the polar mesosphere, thermosphere, and ionosphere quantitatively. In order to understand variations of the polar ionosphere from the solar minimum to maximum periods, we have made EISCAT experiments in January 2011, March, 2012, and March 2013. For example, ionospheric variations were observed during solar flare and CME events on March 12, 2012. These EISCAT data clearly show an example of the solar wind, magnetosphere, and ionosphere coupling. In addition to the EISCAT observations, we have also investigated variations of the polar thermosphere during periods of significant solar activities from GCM simulations. In this presentation, we will introduce our research activities mainly related to the "Role Of the Sun and the Middle atmosphere/thermosphere/ionosphere In Climate (ROSMIC)" project in VarSITI.

キーワード: 熱圏, 電離圏, 中層大気, 大気大循環モデル, レーダー, 超高層物理学
Keywords: thermosphere, ionosphere, middle atmosphere, GCM, radar, aeronomy

Enhancing our understanding of the atmosphere-ionosphere coupling with Low Earth Orbiting satellite missions
Enhancing our understanding of the atmosphere-ionosphere coupling with Low Earth Orbiting satellite missions

Liu Huixin^{1*} ; Luehr Hermann²
LIU, Huixin^{1*} ; LUEHR, Hermann²

¹Kyushu University, Japan, ²GFZ, Germany

¹Kyushu University, Japan, ²GFZ, Germany

Low Earth Orbiting (LEO) satellites provide unique opportunities to observe the near-Earth space environment. Recent LEO satellite mission have been making rapid contribution to our understanding of the coupled atmosphere-ionosphere system by providing unprecedented observational evidences for the connection between ionospheric/thermospheric phenomena and their meteorological causes. This talk will briefly summarize the achievements of the decade-long CHAMP mission from the vertical coupling point of view, which is followed by a scientific perspective on the newly launched 3-satellite constellation SWARM mission.

中間圏重力波の多地点光学イメージング観測 Multipoint airglow imaging measurements of mesospheric gravity waves over Japan

鈴木 臣^{1*}; 塩川 和夫¹; 大塚 雄一¹
SUZUKI, Shin^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; OTSUKA, Yuichi¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

Atmospheric gravity waves significantly contribute to the wind/thermal balances in the mesosphere and lower thermosphere (MLT) through their vertical transport of horizontal momentum. It has been reported that the gravity wave momentum flux preferentially associated with the scale of the waves; the momentum fluxes of the waves with a horizontal scale of 10-100 km are particularly significant. Airglow imaging is a useful technique to observe two-dimensional structure of small-scale (<100 km) gravity waves in the MLT region and has been used to investigate global behavior of the waves. The Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, has made long-term airglow imaging observations with ground-based all-sky airglow imagers using the Optical Mesosphere and Thermosphere Imager (OMTI) system. Each airglow imager of OMTI has interference filters on rotating wheels to observe airglow emissions in the vicinity of the mesopause (OI 557.7-nm, emission height ~96 km; OH Meinel-bands, ~86 km) and the ionosphere (OI 630.0-nm, ~250 km). Four airglow imagers, which each has the field-of-view with a size of 5 deg x 5 deg in longitude and latitude at the mesopause height, has been in operation in Japan and, as a whole system, they nearly cover all part of Japan. This multipoint network enables us to detect propagation signatures and the spatial extent of MLT waves over a much wide range than ever.

In the presentation, we will report recent results of the MLT gravity waves having a very large spatial extent based on the OMTI multipoint measurements, such as a coherent gravity wave ducting and large concentric gravity wave rings possibly induced by a typhoon; these results offer new insight into dynamical coupling process between the lower and upper atmosphere.

太陽惑星圏進化学の開拓に向けて：恒星変動と惑星大気流出 Exploration into evolution of solar-planetary environments: Solar variation and a variation and atmospheric escape

関 華奈子^{1*}; 寺田 直樹²; 横山 央明³; 鈴木 建⁴; 今村 剛⁵; 中村 卓司⁶; 中川 広務²; 黒田 剛史²; 藤本 正樹⁵; ESPE
プロジェクトチーム¹

SEKI, Kanako^{1*}; TERADA, Naoki²; YOKOYAMA, Takaaki³; SUZUKI, Takeru⁴; IMAMURA, Takeshi⁵; NAKAMURA,
Takuji⁶; NAKAGAWA, Hiromu²; KURODA, Takeshi²; FUJIMOTO, Masaki⁵; ESPE, Project team¹

¹名古屋大学太陽地球環境研究所, ²東北大学大学院理学研究科, ³東京大学大学院理学系研究科, ⁴名古屋大学大学院理学
研究科, ⁵JAXA 宇宙科学研究所, ⁶国立極地研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Graduate School of Science, Tohoku University, ³School of
Science, University of Tokyo, ⁴School of Science, Nagoya University, ⁵Institute of Space and Astronautical Science, JAXA,
⁶National Institute of Polar Research

中心星である太陽の進化に対し、太陽系内の惑星の大気がどのように応答し進化してきたのか。この太陽と惑星圏の共進化の問いに答えようと、世界的には惑星探査計画が推進され、分野横断的研究の機運が高まり、飛躍的に発展しようとしている。2014年9月にはNASAの火星探査機 MAVEN が火星に到着し、2015年末には我が国の金星気象探査機「あかつき」が金星に到着し、最新のデータをもたらすことが予定されている。また、2014年から始まる VarSITI では次期重点課題の一つに太陽進化が含まれており、国際共同研究を実施する機運が高まっている。現在の太陽や惑星圏の理解に重きを置いた従来の学問の枠組みに対し、過去約40億年の太陽惑星圏環境の変遷を理解しようという試みは世界的にも黎明期にある。本講演では、太陽物理学、超高層物理学、気象学の連携を軸に、国際共同研究を展開しながら、大規模数値シミュレーションと最新の観測を組み合わせ、太陽進化と惑星圏進化とのつながりを明らかにし、太陽惑星圏の進化学を開拓しようとする試みについて紹介する。

キーワード: 大気進化, 惑星圏, 大気散逸, 大気上下結合, 気候変動, 惑星大気進化

Keywords: solar evolution, planetosphere, atmospheric escape, coupling of lower and upper atmosphere, climate change, evolution of planetary atmosphere

太陽地球気候結合におけるグローバルサーキットの役割 Role of global electric circuit in solar-climate connection

高橋 幸弘^{1*}; 佐藤 光輝¹
TAKAHASHI, Yukihiro^{1*}; SATO, Mitsuteru¹

¹ 北海道大学・宇宙理学専攻

¹Department of CosmoSciences, Hokkaido University

Global electric circuit model was proposed long time ago, in 1930s, in which thunderstorm plays a role of generator, and the ground and the ionosphere work as a spherical capacitor. We need to reconstruct this simple model, taking into account 3 aspects: 1) global-scale nonuniformities both of ionospheric conductivity and of the distribution of the generators, 2) connections between the troposphere and D-region, considering the effects of TLEs, such as sprites and blue jets, 3) establishing the observational methodology for global electric field, excluding the effect of cloud existing just above the observation sites. Recently, the relationship between the global circuit and solar-climate connection was pointed out. Here we introduce an example, which indicates the roles of thunderstorm or its resultant electric circuit in solar-climate connection. Global relationship between thunderstorm/cloud activities and solar parameters are examined based on lightning measurement by Global ELF observation Network (GEON) operated by Hokkaido University and Outgoing Longwave Radiation (OLR) intensity. It was found that the number of lightning strokes in Asia Maritime Continent (AMC) varies with about month periodicity in the period from February to June 2004 and shows positive correlation ($R \sim 0.8$) with OLR in the Western Pacific Warm Pool (WPWP). On the other hand, OLRs in the central Africa and some other tropical areas show negative correlation with the number of lightning strokes in the AMC in that period. It is also found that the galactic cosmic rays or UV intensity associated with solar activity indicates good correlation with tropical OLR or lightning activity in AMC. One explanation to connect such global variations in thunderstorm / cloud amount with solar parameters would be the electrical circuit involving lower and upper atmospheres. If the ionospheric electric field modulates the potential gradient in the lower atmosphere, it could cause the re-distribution of ionized atmospheric particles, which may, in turn, change the generation / reduction speed of cloud particles.

キーワード: グローバルサーキット, 太陽地球気候結合, TLEs, 積乱雲活動, アジア海洋大陸

Keywords: global electric circuit, solar-climate connection, TLEs, thunderstorm activity, Asia Maritime Continent

A Realistic Whole Atmosphere-Ionosphere Modeling and Collaboration with Observations

A Realistic Whole Atmosphere-Ionosphere Modeling and Collaboration with Observations

陣 英克^{1*}; 三好 勉信²; 藤原 均³; 品川 裕之¹; 松尾 朋子⁴
JIN, Hidekatsu^{1*}; MIYOSHI, Yasunobu²; FUJIWARA, Hitoshi³; SHINAGAWA, Hiroyuki¹; MATSUO, Tomoko⁴

¹ 情報通信研究機構, ² 九州大学, ³ 成蹊大学, ⁴ アメリカ海洋大気庁

¹National Institute of Information and Communications Technology, ²Kyushu University, ³Seikei University, ⁴National Oceanic and Atmospheric Administration

There has been an increasing number of collaboration between modeling and observation for the study of upper atmospheric variability and its relation to the lower atmosphere. Observations are used as the forcing inputs to models as well as for their validation. Outputs from models can be useful for the interpretation of observed phenomena owing to their sufficient spatial and temporal coverage, especially for the analysis of phenomena whose effects extend beyond the several atmospheric layers. Recently, we have examined the effects of a prominent stratospheric sudden warming (SSW) in January 2009 on the upper atmospheric variability, by using a whole atmosphere-ionosphere coupled model called GAIA. The model used the meteorological reanalysis data as realistic lower atmospheric forcing, and we compared the model outputs with the satellite observations of upper atmosphere [Jin et al., 2012; Liu et al., 2012]. The comparison suggests that the model can reproduce the overall major features of the observed perturbed variations in the upper atmosphere during the SSW period, which ensures the usage of model output for the detail analysis of vertical coupling mechanism during the event.

In this study, we applied the same method for the inclusion of realistic lower atmospheric forcing and carried out a whole atmosphere-ionosphere simulation for longer period. We will show the relation of ionospheric variability to the climatological and irregular variations in the lower atmosphere including several SSW events. Initial results from data assimilation experiment will also be shown as an example of model-observation collaboration.

キーワード: 電離圏, 熱圏, 大気上下結合, シミュレーション, データ同化, 宇宙天気

Keywords: ionosphere, thermosphere, atmospheric vertical coupling, simulation, data assimilation, space weather

Contribution of the Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTIs) to VarSITI Contribution of the Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTIs) to VarSITI

大塚 雄一^{1*}; 塩川 和夫¹

OTSUKA, Yuichi^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

The Optical Mesosphere Thermosphere Imagers (OMTIs) consist of thirteen all-sky cooled-CCD imagers, five Fabry-Perot interferometers (FPIs), three meridian scanning photometers, and four airglow temperature photometers. They measure two-dimensional pattern, Doppler wind, and temperature through airglow emissions from oxygen (wavelength: 557.7 nm) and OH (near infrared band) in the mesopause region (80-100 km) and from oxygen (630.0 nm) in the thermosphere/ionosphere (200-300 km). They are in automatic operation at Australia, Indonesia, Thailand, far-east Russia, Japan, Canada, Hawaii, and Norway. Station information and quick look plots are available at <http://stdb2.stelab.nagoya-u.ac.jp/omti/>. We show recent results obtained by OMTIs particularly focusing on the penetration of short-period gravity wave from the lower atmosphere to the thermosphere and the ionosphere, which are often recognized as meridum-scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs) in the ionosphere. We also show some results obtained by the multi-point Fabry-Perot interferometers. These observations will contribute the next SCOSTEP program VarSITI, particularly to the ROSMIC Project.

キーワード: airglow, ionosphere, thermosphere, mesosphere, gravity wave, traveling ionospheric disturbance

Keywords: airglow, ionosphere, thermosphere, mesosphere, gravity wave, traveling ionospheric disturbance

PEM10-01

会場:414

時間:4月29日 14:15-14:35

Modeling Turbulence in Space Plasmas Modeling Turbulence in Space Plasmas

CHO, Jungyeon^{1*}
CHO, Jungyeon^{1*}

¹Chungnam National University
¹Chungnam National University

Space plasmas are magnetized and in turbulent states. I will briefly introduce properties of turbulence in a strongly magnetized medium. Turbulence in space plasmas is involved with various length scales. In general, different descriptions should be used for different scales. On large scales, plasma turbulence can be described in the framework of magnetohydrodynamics (MHD). In the first part of the talk, I will focus on MHD turbulence in the presence of a strong mean field. I will discuss energy cascade and structure of turbulence in this regime. On the other hand, on small scales near the proton gyro-scale, we cannot use MHD. In the second part of the talk, I will discuss how we can treat magnetized turbulence on small scales. I will also discuss properties and scaling relations of waves and turbulence in this regime.

キーワード: turbulence, MHD, waves, magnetic field
Keywords: turbulence, MHD, waves, magnetic field

加速膨張する太陽風プラズマにおける振幅変調アルヴェン乱流の非線形発展
Nonlinear evolution of envelope-modulated Alfvénic turbulence in expanding accelerating solar wind plasmas

成行 泰裕^{1*}; 羽田 亨²; 坪内 健³

NARIYUKI, Yasuhiro^{1*}; HADA, Tohru²; TSUBOUCHI, Ken³

¹ 富山大学人間発達科学部, ² 九州大学大学院総合理工学研究院, ³ 東京工業大学大学院理工学研究科

¹Faculty of Human Development, University of Toyama, ²E.S.S.T., Kyushu University, ³Tokyo Institute of Technology

It is well known that low-frequency Alfvénic turbulence is ubiquitously observed in solar wind plasmas. There is great interest in nonlinear evolution of the Alfvénic turbulence, since the observational studies clarified that the Alfvénic turbulence disappear with the increasing heliocentric distance and the fully-developed turbulence becomes dominant. Although most past studies on Alfvénic turbulence assumes uniform background plasmas and magnetic fields, the effects of the inhomogeneity may not be negligible in the inner-heliosphere, in which several future spacecraft missions are planned. It is important that even if the wave reflection due to the inhomogeneity is negligible, the inhomogeneity of background plasmas and magnetic field may affect the nonlinear interaction among waves through contraction and reflection of the waves and the radial dependence of the background parameters such as the Alfvén velocity and the ion cyclotron frequency. In the present study, the nonlinear evolution of low-frequency, quasi-parallel propagating Alfvénic turbulence is studied by using the two-dimensional hybrid accelerating expanding box model. The dependence of the nonlinear evolution of Alfvénic turbulence on the effects of the inhomogeneity is discussed.

キーワード: 太陽風, アルヴェン乱流, イオン運動論

Keywords: solar wind, Alfvénic turbulence, ion kinetics

Development and Properties of Compressible MHD Turbulence in High-Beta Plasmas Development and Properties of Compressible MHD Turbulence in High-Beta Plasmas

JONES, Thomas^{1*} ; RYU, Dongsu² ; PORTER, David¹ ; EMMERICK, Andrew¹ ; CHO, Jungyeon³
JONES, Thomas^{1*} ; RYU, Dongsu² ; PORTER, David¹ ; EMMERICK, Andrew¹ ; CHO, Jungyeon³

¹University of Minnesota, ²Ulsan National Institute of Science and Technology, ³Chungnam National University

¹University of Minnesota, ²Ulsan National Institute of Science and Technology, ³Chungnam National University

Many cosmic plasmas, including those in the solar wind and extra-galactic environments, are high beta = $P_g/P_B > 1$, so that as turbulence develops, magnetic stresses are, at least initially, weak. As the turbulence evolves, magnetic stresses become increasingly important on scales below the driving scales. Depending on the initial field strength and topology this evolution can take many large-scale eddy times to reach saturation. Even in subsonic turbulence, shocks can form and influence turbulence evolution and properties. We have carried out an extensive set of high resolution compressible MHD simulations of the evolution of such turbulence for a range of initial magnetic field strengths and topologies. Here we report on their properties and the astrophysical implications of those properties. This work is supported at the University of Minnesota by the US National Science Foundation and the Minnesota Supercomputing Institute.

キーワード: MHD Turbulence, High Beta Plasma

Keywords: MHD Turbulence, High Beta Plasma

Instabilities and turbulence near the heliopause Instabilities and turbulence near the heliopause

POGORELOV, Nikolai^{1*} ; BOROVNIKOV, Sergey² ; ZANK, Gary¹ ; ZHANG, Ming³
POGORELOV, Nikolai^{1*} ; BOROVNIKOV, Sergey² ; ZANK, Gary¹ ; ZHANG, Ming³

¹Department of Space Science, University of Alabama in Huntsville, ²CSPAR, University of Alabama in Huntsville, ³Department of Physics and Space Sciences, Florida Institute of Technology

¹Department of Space Science, University of Alabama in Huntsville, ²CSPAR, University of Alabama in Huntsville, ³Department of Physics and Space Sciences, Florida Institute of Technology

Recent observations from the Voyager 1 spacecraft show that it is sampling the local interstellar medium (LISM). This is quite surprising because no realistic, steady-state model of the solar wind (SW) interaction with the LISM gives the inner heliosheath width as narrow as 30. This includes such models that assume a strong redistribution of the ion energy to the tails in the pickup ion distribution function. We show that the heliopause (HP), which separates the SW from the LISM, is not a smooth tangential discontinuity, but rather a surface subject to Rayleigh-Taylor-type instabilities which can result in the LISM material penetration deep inside the SW. We also show that the HP flanks are always subject to a Kelvin-Helmholtz instability. The instabilities are considerably suppressed near the HP nose by the heliospheric magnetic field in steady-state models, but reveal themselves in the presence of solar cycle effects. We argue that Voyager 1 may be in one of such instability regions and therefore observing plasma densities much higher than those in the pristine SW. These results may be an explanation of the Voyager 1 early penetration into the LISM. We also show that there is a possibility that the spacecraft may enter the SW again before it finally leaves the heliosphere.

We demonstrate a spontaneous transition to chaotic behavior in the heliosheath region covered by the heliospheric current sheet. Additionally, we analyze the behavior of the heliopause in the heliotail and show that it becomes violently unstable beyond 1000 AU, which results in the interpenetration of the solar and interstellar plasma.

キーワード: ISM: kinematics and dynamics, ISM: magnetic fields, solar wind, Sun: heliosphere, turbulence
Keywords: ISM: kinematics and dynamics, ISM: magnetic fields, solar wind, Sun: heliosphere, turbulence

活動的な太陽型星の恒星風における、波反射による降着相の出現 Wave reflection-driven accretion in active solar-type star winds

鈴木 建^{1*}; 寺西 恭雅¹
SUZUKI, Takeru^{1*}; TERANISHI, Yasumasa¹

¹ 名古屋大学
¹ Nagoya University

活動的な太陽型恒星における恒星風駆動の磁気流体数値シミュレーション (Suzuki et al.2013) において、非定常的な降着が引き起こされる現象が見られている。本研究では、この降着現象を引き起こすメカニズムを詳細に解析した結果を紹介する。密度ムラに捕捉されたアルフベン波による密度ムラの自己増幅により、波の反射が引き起こされ、外向きに流れ出していた恒星風が内向きに逆流し、長時間の降着相が出現していることが判明した。

キーワード: 波, 磁気流体, 恒星風, 降着
Keywords: Wave, MHD, stellar wind, accretion

Physical Picture of 2-1/2D Driven Collisionless Magnetic Reconnection Physical Picture of 2-1/2D Driven Collisionless Magnetic Reconnection

CHENG, Chio^{1*}; INOUE, S.²; ONO, Y.³; HORIUCHI, R.⁴
CHENG, Chio^{1*}; INOUE, S.²; ONO, Y.³; HORIUCHI, R.⁴

¹Plasma and Space Science Center, National Cheng Kung University, Taiwan, ²Graduate School of Engineering, University of Tokyo, Japan, ³Department of Advanced Energy, University of Tokyo, Japan, ⁴National Institute of Fusion Science, Japan
¹Plasma and Space Science Center, National Cheng Kung University, Taiwan, ²Graduate School of Engineering, University of Tokyo, Japan, ³Department of Advanced Energy, University of Tokyo, Japan, ⁴National Institute of Fusion Science, Japan

The physical picture of how electrons and ions flow, how the electric and magnetic fields change, and how particles gain energy will be presented for the 2-1/2D collisionless driven magnetic reconnection. The 2-1/2 dimensional collisionless reconnection studies are performed using the particle simulation PASMO code [1] and theoretical analysis. In particular, we will provide the physical mechanism of how the poloidal current (including the Hall current in the downstream region) is generated and how the electrostatic potential is produced in the poloidal plane. The physical picture of how the quadrupole magnetic field and electrostatic potential are generated in the 2-dimensional (poloidal) plane is different from the one presented by Uzdensky and Kulsrud.[2]

[1] H. Ohtani and R. Horiuchi, Plasma Fusion Res., 4, 024 (2009)

[2] D. A. Uzdensky and R. M. Kulsrud, Phys. Plasma, 13, 062305 (2006)

キーワード: magnetic reconnection, numerical simulation, space plasma, laboratory experiment
Keywords: magnetic reconnection, numerical simulation, space plasma, laboratory experiment

Turbulence and shocks in high-beta plasmas Turbulence and shocks in high-beta plasmas

RYU, Dongsu^{1*}
RYU, Dongsu^{1*}

¹Department of Physics, UNIST
¹Department of Physics, UNIST

High-beta plasmas are common in astrophysical environments, such as the intracluster medium (ICM) of galaxy clusters and the interplanetary medium (IPM) of the solar system. Observations and theoretical arguments suggest that the plasmas in such environments are in the state of turbulence, where highly nonlinear and complex physics is involved. Here we report high-resolution simulations to study the turbulence in high-beta plasmas. Along with the properties of the turbulence, we discuss the role of shocks and the energy dissipation.

キーワード: turbulence, shock wave, high-beta plasma
Keywords: turbulence, shock wave, high-beta plasma

Acceleration and Diffusion of Cosmic Rays in Supernova Remnants in a Multi-Phase interstellar Medium Acceleration and Diffusion of Cosmic Rays in Supernova Remnants in a Multi-Phase interstellar Medium

ROH, Soonyoung^{1*}; INUTSUKA, Shu-ichiro²; INOUE, Tsuyoshi³
ROH, Soonyoung^{1*}; INUTSUKA, Shu-ichiro²; INOUE, Tsuyoshi³

¹Graduate School of Science, Nagoya University, ²Graduate School of Science, Nagoya University, ³Department of Physics and Mathematics, Aoyama Gakuin University

¹Graduate School of Science, Nagoya University, ²Graduate School of Science, Nagoya University, ³Department of Physics and Mathematics, Aoyama Gakuin University

Supernova remnants (SNRs) are one of the most powerful cosmic phenomena and are thought to be the dominant source of Galactic cosmic rays (CRs). A recent report by Funk et al. (2013) has shown an unequivocal signature of pion-decay in the gamma-ray spectra of SNRs. This provides strong evidence that high-energy protons are accelerated in SNRs. On the other hand, Fukui et al. (2012) showed that pion-decay from protons dominates in emission from SNR RX J1713 based on the spatial correlation of gamma-rays and molecular line emission. The actual gamma-ray emission from pion-decay should depend on the diffusion of CRs in a multi-phase interstellar medium with molecular clouds (Inoue et al. 2012). In order to quantitatively describe the diffusion of high energy CRs from acceleration sites, we have performed test particle numerical simulations using a three-dimensional magnetohydrodynamics (MHD) simulation data cube provided by Inoue et al. (2012). In this presentation, we analyze a realistic diffusion coefficient of cosmic rays in simulated SNRs, and discuss the possible implications for X-ray and gamma-ray observations.

キーワード: Supernova Remnants, Diffusion of Cosmic Rays, Acceleration of Cosmic Rays, Pion-decay
Keywords: Supernova Remnants, Diffusion of Cosmic Rays, Acceleration of Cosmic Rays, Pion-decay

Superdiffusion in turbulence and shock acceleration Superdiffusion in turbulence and shock acceleration

YAN, Huirong^{1*}
YAN, Huirong^{1*}

¹Kavli Institute of Astronomy & Astrophysics, Peking U

¹Kavli Institute of Astronomy & Astrophysics, Peking U

Cosmic ray (CR) transport and acceleration are determined by the properties of turbulent magnetic field. We use the models of magnetohydrodynamic turbulence that were tested in numerical simulation, in which turbulence is injected at large scale and cascades to small scales. I shall address, in particular, the cross field transport of CRs. I shall demonstrate both analytically and numerically that particles are superdiffusive on small scales. We consider both super- and sub-Alfvénic cases. In the sub-Alfvénic case, the transport in the perpendicular direction is proportional with M_A^4 , consistent with our earlier analytical prediction. Implication for shock acceleration is discussed and we show that the difference between acceleration at perpendicular shock and parallel shock is marginalized in the presence of superdiffusion.

キーワード: turbulence, superdiffusion, particle, shock, acceleration, transport
Keywords: turbulence, superdiffusion, particle, shock, acceleration, transport

マイクロ Type-III 電波と外部コロナ域 Micro-TypeIII radio bursts and outer corona

森岡 昭^{1*}; 三好 由純²; 笠羽 康正³; 増田 智²; 岩井 一正⁴; 三澤 浩昭¹
MORIOKA, Akira^{1*}; MIYOSHI, Yoshizumi²; KASABA, Yasumasa³; MASUDA, Satoshi²; IWAI, Kazumasa⁴; MISAWA, Hiroaki¹

¹ 東北大学理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 東北大学理学研究科, ⁴ 国立天文台 野辺山太陽電波観測所

¹PPARC, Tohoku University, ²STEL, Nagoya University, ³Dep. of Gephys. Tohoku University, ⁴NSRO, NAOJ

我々は、Type-III 型太陽電波の亜種としてマイクロ Type-III (μ T-III) 電波と称されるべき電波が存在する事を示した (Morioka et al., 2007, ApJ)。この電波は通常のフレアに伴う Type-III 型電波に比べて、強度、頻発性、強度対発生頻度特性、スペクトル構造が明らかに異なり、電波放射をおこす電子ビームの発生源が異なることを示している。今回、この μ T-III の特性をさらに詳しく調べるとともに、その特性から外部コロナ域の探測を試みる。

得られた特性の主なものは、

1. 太陽活動に対する出現特性は、heliospheric current sheet (HCS) の緯度分布変化と良い相関を示す。このことは、 μ T-III の発生域がコロナホール近傍の streamer の出現と深く関係していることを示唆する。

2. 頻発する μ T-III のグループ (継続時間: 数日~10 日) はグループ毎に一定の下限周波数を持ち、かつその下限周波数の分布は統計的に 200 kHz 付近で最大となり 100 kHz を下ることではない。このことは μ T-III を励起する電子ビームは、ある高度までは進めるが、 $f_p=100$ kHz の高度 (およそ 50 Rs) より先には進めない事を示している。

3. この下限周波数の分布は太陽活動依存性を示し、活動期にはより低い周波数 (~100 kHz) まで伸びる。このことは、streamer のプラズマ圧の太陽活動依存性を示唆しているかも知れない。

4. コロナー惑星間空間のプラズマ密度分布を仮定することにより、 μ T-III の周波数トレースから電波が放射されている磁力線形状を推定することが出来る。その結果、太陽面から開き角 $\pm 10-15^\circ$, apex 距離 20-30 Rs の磁力線が導出された。太陽面上に孤立した active region が現れた時のこの磁場形状と STEREO 衛星による streamer 観測とを照合すると、streamer を取り囲むように μ T-III 磁力線が張り出している様子が推定された。

キーワード: マイクロタイプ III バースト, 外部コロナ, 太陽電波, 惑星間空間, 内部陽圏

Keywords: micro-type-III burst, outer corona, solar radio burst, interplanetary space, inner-heliosphere

野辺山電波ヘリオグラフと衛星多視線観測によるコロナのベクトル磁場の導出 Coronal vector magnetic field and the plasma beta determined from the NoRH and multiple satellites observations

岩井 一正^{1*}; 柴崎 清登¹; 野澤 恵²; 高橋 卓也³; 澤田 真平²; 北川 潤⁴; 宮脇 駿²; 柏木 啓良⁵
IWAI, Kazumasa^{1*}; SHIBASAKI, Kiyoto¹; NOZAWA, Satoshi²; TAKAHASHI, Takuya³; SAWADA, Shinpei²; KITAGAWA, Jun⁴; MIYAWAKI, Shun²; KASHIWAGI, Hirota⁵

¹ 国立天文台野辺山太陽電波観測所, ² 茨城大学理学部, ³ 京都大学大学院理学研究科, ⁴ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ⁵ 東北大学惑星プラズマ・大気研究センター

¹Nobeyama Solar Radio Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, ²Department of Science, Ibaraki University, ³Graduate School of Science, Kyoto University, ⁴Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ⁵Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Tohoku University

太陽コロナでは、フレアやコロナ質量放出現象に代表される爆発現象が数多く発生する。これらはコロナの磁場とプラズマの相互作用によって引き起こされる。よって、コロナ中の磁場、プラズマ密度、温度という環境パラメータを正確に計測することは、コロナにおける諸現象を理解するうえで非常に重要である。

本研究では、野辺山電波ヘリオグラフ (NoRH) による熱制動放射の観測と、STEREO 衛星・SDO 衛星による紫外線の多視線観測を組み合わせることで、コロナのベクトル磁場、プラズマ密度、温度を精密に計測することに成功した。観測では、2013年4月11日に西のリムで発生したフレアのポストフレアループを対象とした。ポストフレアループの視線方向磁場は、NoRHによる熱制動放射の偏波観測によって導出された。ループの地球から見た場合の傾き角はSTEREO衛星から導出された。両者を合わせることで、コロナループのベクトル磁場が導出された。プラズマ密度と温度はSDO衛星に搭載された紫外撮像装置AIAの6枚のフィルタの撮像データから導出された。NoRHによる熱制動放射の電波強度とAIAから求められたプラズマ温度を組み合わせることで、電波放射に寄与するプラズマの密度も導出された。その結果、電波観測から導出された密度は、紫外線観測から導出された密度に対して約40%大きかった。この原因は、AIAの温度感度外の低温プラズマの影響によるものと考えられる。導出された磁場、密度、温度を用いてコロナループの磁気圧とプラズマ圧の比(プラズマベータ)を導出した結果、ループトップ領域で 6.2×10^{-3} であった。本研究で導出したプラズマパラメータはすべて観測に基づいており、特にコロナのベクトル磁場はこれまで導出された中で、最も仮定やモデルの影響が小さいものの一つである。

キーワード: 太陽, コロナ, 磁場, 偏波観測, 野辺山電波ヘリオグラフ

Keywords: Sun, corona, magnetic fields, polarization observation, Nobeyama Radioheliograph

宇宙線強度と光球磁場および太陽風速度 Relationships among cosmic ray intensity, the photospheric magnetic field, and solar wind speed

袴田 和幸^{1*}; 徳丸 宗利²; 藤木 謙一²; 小島 正宜²
HAKAMADA, Kazuyuki^{1*}; TOKUMARU, Munetoshi²; FUJIKI, Ken'ichi²; KOJIMA, Masayoshi²

¹ 中部大学, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹ Chubu University, ² Solar-Terrestrial Environment Laboratory

本研究ではまず、袴田が開発したコロナ磁場モデル (Radial-Field Model) とキットピークの光球磁場観測値を用いてコロナ中の磁力線三次元構造を可視化し、光球面から惑星間空間へと開いた磁力線上の、光球磁場動径成分 (Br_{pho}) とソース面上のコロナ磁場動径成分 (Br_{sou}) を計算する。また、名古屋大学太陽地球環境研究所の IPS 観測を用いて太陽風速度 (SWS) を求める。今までに行った、カリントンローテーション毎のデータ解析によれば、 $\text{Log}_{10}|Br_{pho}|$ と $\text{Log}_{10}|Br_{sou}|$ の値が、(1) $-1.0 \leq \text{Log}_{10}|Br_{pho}| \leq 1.5$, ($0.1 \text{ G} \leq |Br_{pho}| \leq 31.6 \text{ G}$), (2) $-1.5 \leq \text{Log}_{10}|Br_{sou}| \leq 0.0$, ($0.0316 \text{ G} \leq |Br_{sou}| \leq 1.0 \text{ G}$), の範囲の磁力線に限ると、SWS, $\text{Log}_{10}|Br_{sou}|$, $\text{Log}_{10}|Br_{pho}|$ の間に強い相関のあることが分かっている。本研究では、さらに、Oulu 中性子モニター強度 (NM) を加え、NM, SWS, $\text{Log}_{10}|Br_{pho}|$ のカリントン周期にわたる平均値の関係について調べた。その結果、(1) と (2) の範囲の磁力線に限ると、 $\text{Log}_{10}|Br_{pho}|$ -NM の間には単相関係数で $r=-0.773$ の良い負の相関があり、SWS-NM の間には単相関係数で $r=0.703$ の良い正の相関があることが分かった。また同時に、 $NM = a + b * SWS + c * \text{Log}_{10}|Br_{pho}|$ の回帰式を仮定すると、 $a = 6363$, $b = 1.186$, $c = -1400.0$, となり、NM, SWS, $\text{Log}_{10}|Br_{pho}|$ の間には $r = 0.785$ の良い重相関のあることも分かった。しかしながら、以前の研究結果から、 $\text{Log}_{10}|Br_{pho}|$ -SWS の間にも単相関係数で $r=-0.802$ の非常に良い負の相関があることが分かっているため、(a) $\text{Log}_{10}|Br_{pho}|$ -NM, (b) SWS-NM, (c) $\text{Log}_{10}|Br_{pho}|$ -SWS の間の偏相関係数を調べたところ、それぞれの間に、(a) $r=-0.294$, (b) $r=0.130$, (c) $r=-0.364$ の偏相関のあることが分かった。この結果は、中性子モニターで観測される地球周辺の宇宙線強度は、太陽から惑星間空間へと開いている磁力線の根元の光球磁場強度と、その磁力線が満たす惑星間空間の太陽風速度により決まっているが、光球磁場強度への依存性の方が太陽風速度への依存性よりも強いことを示している。

キーワード: 宇宙線強度, 光球磁場, 太陽風速度
Keywords: cosmic ray intensity, photospheric magnetic field, solar wind speed

アイソン彗星 (C/2012 S1) のプラズマテイルは惑星間空間シンチレーションを引き起こしたか？

Does a Plasma Tail of Comet ISON (C/2012 S1) Cause the Interplanetary Scintillation?

伊集 朝哉^{1*}; 阿部 新助²; 徳丸 宗利³
IJU, Tomoya^{1*}; ABE, Shinsuke²; TOKUMARU, Munetoshi³

¹ 名大・理学・素粒子宇宙物理, ² 日大・理工・航空宇宙工学, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹Particle and Astrophysical Science, Nagoya-University, ²Aerospace Engineering, CST, Nihon-University, ³Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya-University

C/2012 S1 (ISON) (以下アイソン彗星) は、2013年11月28日の近日点通過までの間に0.1天文単位以上に発達したプラズマテイルを見せた。プラズマテイルは、彗星核から噴出して電離したガスが太陽からのプラズマ流(太陽風)と相互作用して太陽と反対の方向にたなびいたものである。今回我々は、惑星間空間シンチレーション(IPS)データを用いてアイソン彗星のプラズマテイルを調査した。IPSは、太陽風のプラズマ密度ゆらぎによる電波の散乱現象であり、コロナ質量放出(CME)のような惑星間擾乱がIPSの突発的増加を引き起こすことが良く知られている。彗星のプラズマテイルもIPS増加の原因になりうると予想されており、これまでに複数の研究者によってC/1973 E1 (Kohoutek) や1P/Halleyなどを対象に調査が行われた(e.g. Ananthakrishnan *et al.*, 1975, 1987; Slee *et al.*, 1987; Abe *et al.*, 1997; Roy *et al.*, 2007)。しかしながら、現在のところ彗星プラズマテイルによるIPSについて確定的な結論は得られていない。我々は、11月1日から28日までの期間にアイソン彗星のプラズマテイルに接近した電波天体を特定し、名古屋大学太陽地球環境研究所のSolar Wind Imaging Facility (Tokumaru *et al.*, 2011) で取得したIPS観測データを解析した。その結果、プラズマテイル由来のIPSの可能性のあるシンチレーション指数の増加を4例確認した。本発表では、これら4例の初期観測成果を報告し、彗星プラズマテイルによるIPSについて議論する。

キーワード: アイソン彗星 (C/2012 S1), 彗星プラズマテイル, 電波シンチレーション
Keywords: Comet ISON (C/2012 S1), Cometary plasma tail, Radio scintillation

太陽風中で観測される波動スペクトルに対する位相速度と群速度の影響 Effects of phase and group velocities on wave spectra observed in the solar wind

津川 靖基^{1*}; 加藤 雄人¹; 寺田 直樹¹
TSUGAWA, Yasunori^{1*}; KATOH, Yuto¹; TERADA, Naoki¹

¹ 東北大学理学研究科地球物理学専攻
¹Department of Geophysics, Tohoku University

Waves propagating in a plasma medium which has a relative velocity to the observer are differently observed in the spectra from those in the plasma rest frame. As known in general, the observed frequency is Doppler shifted by the relative velocity between the medium and the observer, V_{rel} . The frequency shift is the result of the difference of the phase velocities of the waves in the medium rest frame and in the observer frame. When the wave vector has a finite angle with respect to V_{rel} and the component of V_{rel} parallel to the wave vector is considerable to the phase velocity, the difference of the phase velocities between the frames and the frequency shift become significant.

We note that the observed spectral density is also modified by V_{rel} . The modification of the spectral density is the result of the difference of the group velocities of the waves in the medium rest frame and in the observer frame. When the component of V_{rel} parallel to the group velocity vector is considerable to the group velocity, the difference of the group velocities between the frames and the modification of the spectral density become significant. In order to estimate the amount of the modification, we derive the analytical expression of the modified spectral density in the observer frame.

It is important to consider not only the frequency shift but also the modification of the spectral density of waves observed by spacecraft in a moving plasma, such as the solar wind. Indeed, the phase and group velocities of whistler-mode waves cause significant frequency shift and modification of the spectral density in the solar wind. By the modification of the spectral density, we can explain the characteristic properties of '1 Hz waves', which have been generally observed in the upstream regions of various bodies, and suggest that the broadband upstream whistlers are the same source waves. The understanding of the effects is necessary to reveal the true nature of waves propagating in a moving plasma and to discuss their generation processes.

かぐや衛星によって月の昼夜境界付近で観測された8Hzホイッスラー波 Monochromatic whistler waves at 8 Hz observed by Kaguya above the terminator of the Moon

橋本 彰¹; 中川 朋子^{1*}; 綱川 秀夫²; 高橋 太²; 渋谷 秀敏³; 清水 久芳⁴; 松島 政貴²
HASHIMOTO, Akira¹; NAKAGAWA, Tomoko^{1*}; TSUNAKAWA, Hideo²; TAKAHASHI, Futoshi²; SHIBUYA, Hidetoshi³
; SHIMIZU, Hisayoshi⁴; MATSUSHIMA, Masaki²

¹ 東北工業大学工学部情報通信工学科, ² 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, ³ 熊本大学大学院自然科学研究科, ⁴ 東京大学地震研究所

¹Information and Communication Engineering, Tohoku Institute of Technology, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ³Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto, ⁴Earthquake Research Institute, University of Tokyo

月には地球のような大規模な磁場がなく、太陽風プラズマが直接月面や局所磁場に衝突するため、地球とは異なる太陽風相互作用が起きている。月の近傍、特に昼間側及び昼夜境界付近で観測される磁場変動には、大きく分けて(1)月面で反射した太陽風イオンとのサイクロトロン共鳴によって起こる約100秒周期の磁気流体(MHD)波動と、(2)反射された太陽風電子との共鳴で起こる0.3-10HzのELF帯のホイッスラー波があるが、(2)のホイッスラー波のうち、帯域の狭いもの周波数は1-2Hzのことが多い。これは、反射粒子によって太陽風の上流に向かって伝搬する波の位相速度が太陽風速より遅く、衛星座標から見た場合にドップラーシフトによって周波数が下がって見えるためである。偏波も、もともと背景磁場に対して右回りだったホイッスラー波が衛星から見た場合に左回りに裏返って見えることが多い。

今般、かぐや衛星によって8 Hz付近に周波数幅の狭い波が発見された。2008年1月1日から9月30日までの間で月が太陽風にさらされていた期間中に観測された磁場データ(サンプリング周波数32Hz)を使用し、32秒ずつフーリエ変換してえたスペクトル中4-16 Hzの範囲で周波数幅0.15Hz以上にわたって周囲の周波数帯よりも10倍以上パワーが強くなっている場合4529例を現象として検出した。発生頻度の分布をとると、昼夜境界と極付近(これも昼夜境界)に多かった。月に固定した座標で見た場合は、地球から遠い側の南半球に集中していたが、これは月の磁気異常の位置と一致する。最小変化法で伝搬方向を求めると背景磁場に沿っており、偏波方向は右回りであった。これらの性質から、この波は反射電子との共鳴によって励起されたホイッスラー波が下流に向かって伝搬し、ドップラーシフトによって周波数が上昇して観測されたものと考えられる。

キーワード: 月, かぐや衛星, ホイッスラー波, ホイスラ, 太陽風, ドップラーシフト
Keywords: moon, SELENE, KAGUYA, MAP/LMAG, whistler wave, solar wind

宇宙環境計測ミッション装置の中性子モニタ計測結果 Measurement result of the neutron monitor onboard the Space Environment Data Acquisition Equipment (SEDA-AP)

古賀 清一^{1*}; 村木 綏²; 柴田 祥一³; 山本 常夏⁴; 松本 晴久¹; 奥平 修¹; 河野 英昭⁵; 湯元 清文⁵
KOGA, Kiyokazu^{1*}; MURAKI, Yasushi²; SHIBATA, Shoichi³; YAMAMOTO, Tokonatsu⁴; MATSUMOTO, Haruhisa¹; OKUDAIRA, Osamu¹; KAWANO, Hideaki⁵; YUMOTO, Kiyohumi⁵

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 名古屋大学, ³ 中部大学, ⁴ 甲南大学, ⁵ 九州大学
¹JAXA, ²Nagoya University, ³Chubu University, ⁴Konan University, ⁵Kyushu University

To support future space activities, it is crucial to acquire space environmental data related to the space-radiation degradation of space parts and materials, and spacecraft anomalies. Such data are useful for spacecraft design and manned space activity.

SEDA-AP was mounted on "Kibo" of the ISS (International Space Station) to measure the space environment at a 400-kilometer altitude.

Neutrons are very harmful radiation, with electrical neutrality that makes them strongly permeable. SEDA-AP measures the energy of neutrons from thermal to 100 MeV in real time using a Bonner Ball Detector (BBND) and a Scintillation Fiber Detector (FIB). BBND detects neutrons using He-3 counters, which have high sensitivity to thermal neutrons. Neutron energy is derived using the relative response function of polyethylene moderators of 6 different thicknesses. FIB measures the tracks of recoil protons caused by neutrons within a cubic arrayed sensor of 512 scintillation fibers. The charged particles are excluded using an anti-scintillator which surrounds the cube sensor, and the neutron energy is obtained from the track length of a recoil proton.

There are three sources of neutrons in space;

1. Albedo Neutrons

Produced by reactions of galactic cosmic rays or radiation belt particles with the atmosphere

2. Local Neutrons

Produced by the reactions of galactic cosmic rays or radiation belt particles with spacecraft

3. Solar Neutrons

Produced by accelerated particles in solar flares

An accurate energy spectrum of the solar neutrons includes important information on high-energy particle generation mechanism in a solar flare, because neutrons are unaffected by interplanetary magnetic fields. These data will become useful to forecast solar energetic particles in future. Some candidate events involving solar neutrons were found as a result of analyzing data of the solar flare of $M > 2$ since September 2009.

Moreover, it is important to measure albedo neutrons, since protons generated by neutron decays are thought to originate from the radiation belt. This theory is called CRAND (Cosmic Ray Albedo Neutron Decay). Our observation result is consistent with the CRAND theory prediction in the case of low-energy parts. Moreover, the flux and angular distribution of local neutrons were estimated using the nuclear simulation code "PHITS" to evaluate the influence of local neutrons on the structure of SEDA-AP and "Kibo".

The results of our analyses on solar and albedo neutrons are reported in this paper.

ひさき (SPRINT-A) 衛星で観測される惑星間空間からの散乱光 Interplanetary emission observed by HISAKI (SPRINT-A) satellite

山崎 敦^{1*}; 吉岡 和夫¹; 村上 豪¹; 木村 智樹¹; 土屋 史紀²; 鍵谷 将人²; 坂野井 健²; 寺田 直樹³; 笠羽 康正³; 吉川 一朗⁴

YAMAZAKI, Atsushi^{1*}; YOSHIOKA, Kazuo¹; MURAKAMI, Go¹; KIMURA, Tomoki¹; TSUCHIYA, Fuminori²; KAGITANI, Masato²; SAKANOI, Takeshi²; TERADA, Naoki³; KASABA, Yasumasa³; YOSHIKAWA, Ichiro⁴

¹宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ²東北大学大学院理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター, ³東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻, ⁴東京大学

¹Institute of Space and Astronautical Science / Japan Aerospace Exploration Agency, ²Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, ³Dep. Geophysics Graduate School of Science Tohoku University, ⁴The University of Tokyo

昨年夏季に打ち上げられたひさき (SPRINT-A) 衛星は順調に惑星観測を続けている。主な科学目的である惑星周辺プラズマからの散乱光とともに、惑星間空間からの極端紫外散乱光も分光観測している。本講演では、ひさき衛星で観測する惑星間空間からの散乱光を導出し、ひさき衛星を用いた惑星間空間のリモートセンシングを議論する。

キーワード: ひさき (SPRINT-A) 衛星, 極端紫外光, 惑星間空間, 散乱光

Keywords: HISAKI (SPRINT-A) satellite, extreme ultra violet emission, interplanetary, resonance scattering

マグネトグラム観測データを用いた太陽面上の磁場分布の振る舞いと太陽極小期 The Behavior of Distributions for Magnetic Polarities on the Surface of the Sun and Solar Minimum

清野 光弘^{1*}; 島袋 知巳¹

SEINO, Mitsuhiko^{1*}; SHIMABUKURO, Tomomi¹

¹ 琉球大学理学部物質地球科学科

¹ Department of Physics and Earth Sciences, Faculty of Science, University of the Ryukyus

Time series of satellite image data for SOHO/MDI Continuum and Magnetogram from 1997 to 2010, and for SDO/HMI Continuum and Magnetogram from 2011 to 2013 are analyzed. The new time series data derived from fractal analysis of the time series images illustrated in 1200x1200 pixels from 1997 to 2013 are generated and fractal measures and packing exponents are analyzed by box-counting method. Then the occupancies of sunspot pixels in Continuum and of pixels for the positive and negative magnetic polarities in Magnetogram are calculated and packing exponents for sunspot pixels in Continuum and packing exponents for positive polarity pixels and negative polarity pixels in Magnetogram are evaluated. For packing exponents of Continuum and Magnetogram from 1997 to 2013, power spectra with peaks are calculated by using Fourier transform, respectively. A first peak which appears the power spectra is determined, and time intervals between nearest neighbor peaks are valued. The correlations between sunspot numbers and occupancies of the positive and negative magnetic polarities for 17 years are anatomized. As the correlation coefficients are calculated by using the least squares method, the correlation between sunspot number and occupancy of positive magnetic polarities has a very high correlational relationship because the correlation coefficient is 0.86 and it for negative magnetic polarities is low.

Furthermore, the behavior of occupancies of sunspot pixels in Continuum and of pixels for the positive and negative magnetic polarities in Magnetogram and the packing exponents represented with time series are described in detail and discussed. Fluctuations for occupancies of positive magnetic polarities are similar to it for Zurich number from 1997 to 2013. As observing the occupancies and packing exponents of positive and negative magnetic polarities, the two and three different fluctuations appear in (1) 1997-2005 and 2009 and (2) 2006-2008 including the time period that solar cycle 24 began on January 4, 2008, respectively. In addition, the occupancies and packing exponents of them have a single fluctuation in (3) 2010-2013. Therefore, the periods for characterizing solar activity from 1997 to 2013 are divided into three periods in (1), (2), and (3). Specially, for 2 years before solar minimum on 2008, the packing exponents start fluctuating suddenly and sharply in 2006 and the fluctuation disappear in the end of 2009.

Keywords: Time Series Analysis, Fourier Analysis, SOHO/MDI Continuum, Magnetogram, Solar Minimum

AMATERASによって観測された太陽電波II型バースト中のスペクトル微細構造 Fine spectral structures of a solar radio type-II burst observed with AMATERAS

佐藤 伸太郎¹; 三澤 浩昭^{1*}; 土屋 史紀¹; 小原 隆博¹; 岩井 一正²; 増田 智³; 三好 由純³
SATO, Shintaro¹; MISAWA, Hiroaki^{1*}; TSUCHIYA, Fuminori¹; OBARA, Takahiro¹; IWAI, Kazumasa²; MASUDA,
Satoshi³; MIYOSHI, Yoshizumi³

¹ 東北大学惑星プラズマ・大気研究センター, ² 国立天文台野辺山太陽電波観測所, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹PPARC, Tohoku Univ., ²Nobeyama Solar Radio Observatory, NAOJ, ³STE Lab., Nagoya Univ.

Solar radio type-II bursts are metric to hectometric radio bursts that show frequency drifting spectral structures caused by the plasma emission from shock-accelerated electrons. The bursts are known to sometimes show rapidly drifting fine structures; for example, about 20% of type-II bursts are composed of both negative and positive rapidly drifting elements, which are called as "herringbone" structure (hereafter HB) [Roberts, 1959]. Such the drifting fine structures are interpreted as the motion of non-thermal energetic electron beams accelerated by the shock. However, their particle acceleration mechanisms and regions have not been understood well. The purpose of this study is to extract characteristics of the fine spectral structures of type-II bursts from high-resolution observations and investigate their acceleration processes.

AMATERAS is a ground-based solar radio receiving system developed in 2010 by Tohoku University [Iwai et al., 2012]. This system enables us to observe radio phenomena in 150 - 500 MHz with the 10 ms accumulation time and 61 kHz bandwidth. So far some type-II bursts with fine spectral structures have been observed. Among them, a type-II burst observed on November 12, 2010 around 200MHz showed distinctive fine structures whose spectral characteristics were different from those of HB. The fine structures showed no core structure which were normally confirmed in HB, but showed various rapidly drifting nature and composed whole body of a slowly negative-drifting type-II burst. The statistical drift rate analysis showed that negative drift cases were dominant and some of them indicated more than 100MHz/s. The particle speed for the drift rate by assuming a general coronal plasma density model, for example the Newkirk model [Newkirk, 1961], is estimated to be unrealistically fast. This implies that the rapidly drifting fine structures were generated by energetic electron beams in an outward moving steep density gradient region such as a shock front.

In this presentation, we will show revealed statistical characteristics of the fine structures and discuss inferred generation processes of the type-II burst. We will also introduce characteristics of fine spectral structures of the other events of type-II burst.

キーワード: 太陽, 電波, II型バースト, 微細構造, 発生過程

Keywords: Sun, radio wave, type-II burst, fine structure, generation process

AMATERASによって観測された太陽電波IV型バースト中の zebra pattern の出現特性 Spectral fine structure of solar radio bursts observed with IPRT/AMATERAS: Characteristics of Zebra Pattern

金田 和鷹^{1*}; 三澤 浩昭¹; 土屋 史紀¹; 小原 隆博¹; 岩井 一正²
KANEDA, Kazutaka^{1*}; MISAWA, Hiroaki¹; TSUCHIYA, Fuminori¹; OBARA, Takahiro¹; IWAI, Kazumasa²

¹ 東北大学 惑星プラズマ・大気研究センター, ² 国立天文台野辺山太陽電波観測所
¹PPARC, Tohoku University, ²NSRO/NAOJ

It is known that there are a variety of complex fine structures in solar radio bursts in the meter to decimeter wave bands such as broadband pulsations, narrowband spikes, fiber bursts and zebra patterns (hereafter ZP). Since they are thought to be caused by some inhomogeneities or modulations of wave generation and/or radio propagation processes, they have significant information about plasma parameters and dynamical plasma processes in the solar corona. Among the various fine structures, ZP has a particularly characteristic spectral pattern with parallel drifting narrow stripes of enhanced emission. Although several models for generating ZP have been proposed so far, the generation mechanisms have not been revealed well yet.

AMATERAS (the Assembly of Metric-band Aperture Telescope and Real-time Analysis System) is a radio spectro-polarimeter installed in a large radio telescope named IPRT in Fukushima, which was developed for solar radio observations in 2010 by Tohoku University (Iwai et al., 2012). The specifications of this system are time resolution of 10 ms, frequency resolution of 61 kHz and the minimum detectable flux of 0.7 s.f.u. in the frequency range of 150 MHz to 500 MHz, which are enough to observe fine structures of solar radio bursts and analyze their spectral characteristics. In this study we focus on an event on June 21, 2011 associated with C7.7 class flare. In this event enhanced ZP appeared around 200MHz with about 30 stripes in fast drifting envelopes like type III bursts or broadband pulsations. The emission was strongly polarized in right-handed and shows a distinctive time delay of the left-handed component relative to the right-handed component by several tens msec increasing with emission frequency. In the presentation, we will show the characteristics of ZP precisely and also discuss the expected generation processes.

Keywords: solar radio, AMATERAS, zebra pattern

多地点 IPS 観測システムの更新とサイクル 24 極大期の太陽風観測 Upgrade of the multi-station IPS system and solar wind observations at the cycle 24 maximum

徳丸 宗利^{1*}; 藤木 謙一¹; 丸山 一夫¹; 丸山 益史¹; 山崎 高幸¹; 伊集 朝哉¹
TOKUMARU, Munetoshi^{1*}; FUJIKI, Ken'ichi¹; MARUYAMA, Kazuo¹; MARUYAMA, Yasushi¹; YAMASAKI, Takayuki¹
; IJU, Tomoya¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

惑星間空間シンチレーション (interplanetary scintillation; IPS) は太陽風のグローバルな分布を決定する有効な手段となることから、名古屋大学太陽地球環境研究所 (STE 研) において多地点システムにより 30 年以上にわたって定常的な観測が実施されてきた。このような長期にわたる観測を可能したのは、絶え間なくシステムを維持・更新してきたからである。現在 STE 研では豊川・富士・木曾・菅平の 4 箇所に大型の IPS 観測専用アンテナを有しているが、その内、豊川の IPS アンテナは 2008 年に新型アンテナ (太陽圏イメージング装置、SWIFT, Tokumaru et al., 2011) に更新されている。その後、科研費を使って富士・木曾アンテナの観測制御・データ収集システムを更新し、2010 年より豊川・富士・木曾アンテナによる 3 地点 IPS 観測が可能になった。ただ、富士・木曾アンテナの心臓部であるフェーズドアレイ型低雑音受信機は従来のままであり、アンテナ反射面や駆動モータ・ギアなどとともに老朽化していた。これを改良するため、2012 年度の補正予算および 2013 年度からの科研費基盤 (A) により富士・木曾・菅平アンテナについて大規模な更新作業が行われている。

今回の更新内容は次の通り。1) HEMT を用いた低雑音受信機 FE327-V5 を搭載し、これをフェーズドアレイとして機能させるための制御システムを開発する。木曾アンテナでは、バックエンド部の開発も必要になる。2) 富士・木曾アンテナではループ法による受信機位相・利得校正システムおよびノイズソースを用いた受信機温度測定システムを開発する。3) アンテナ反射面、駆動ギア、およびモータ (木曾のみ) を新しいものと交換し、防錆塗装・防水対策を実施する。2013 年末までに項目 3) および項目 1)、2) の富士アンテナについて作業が概ね完了し、2014 年春以降に木曾アンテナについて項目 1)、2) を実施する予定である。

この更新作業に伴って 2013 年の IPS 観測は 4~8 月の期間のみとなった。得られたデータからは、北半球で高速風領域が出現しているのに対し、南半球ではまだ出現しておらず、低速風が支配的であることがわかった。極大期において北半球における高速風の消滅・再出現が南半球に先行して起ることは、過去の 2 サイクルにも見られたことから、太陽ダイナモ活動の共通する特徴であるといえる。また、今サイクルにおいても高速風と極磁場との間でよい相関が見られるが、その傾きは過去とは異なっていることも明らかとなった。これは今サイクルでは高次の磁気モーメントが作る高速風領域がより過去と比べ大きな寄与をしているためと考えられる。今後、太陽風は次の極小期に向けた構造変化が顕著になってくると予想される。その変化を見逃さないために、IPS システムの更新作業を早急に完成させたい。

キーワード: 太陽風, 惑星間空間シンチレーション, 太陽圏, 太陽活動周期, 宇宙天気
Keywords: solar wind, interplanetary scintillation, heliosphere, solar cycle, space weather

地磁気急始に伴う中低緯度電離圏電場応答の磁気地方時依存性 MLT dependence in the response of ionospheric electric fields at mid-low latitude during geomagnetic sudden commencement

高橋 直子^{1*}; 笠羽 康正¹; 新堀 淳樹²; 西村 幸敏³; 菊池 崇⁴; 長妻 努⁵

TAKAHASHI, Naoko^{1*}; KASABA, Yasumasa¹; SHINBORI, Atsuki²; NISHIMURA, Yukitoshi³; KIKUCHI, Takashi⁴; NAGATSUMA, Tsutomu⁵

¹ 東北大学大学院理学研究科, ² 京都大学生存圏研究所, ³ University of California, Los Angeles, ⁴ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ⁵ 情報通信研究機構

¹ Graduate School of Science, Tohoku University, ² Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, ³ University of California, Los Angeles, ⁴ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ⁵ National Institute of Information and Communications Technology

The geomagnetic sudden commencement (SC) is one of the geomagnetic disturbance phenomena triggered by an enhancement of the magnetopause current associated with the compression of the magnetosphere due to solar wind disturbances [e.g., Araki, 1994]. Detailed evolution and propagating processes of the electromagnetic field associated with SCs are observed three-dimensionally in the entire geospace. Unlike magnetic storms and substorms which involve complex plasma physical processes, SCs can be identified as distinct magnetic variations that sharply change on a global scale. However, the characteristics of SCs have been extensively investigated mainly by means of the magnetic field variations obtained by ground-based observations, which could be affected by conductivities when deducing electric fields. Thus, investigating the electric field variations is needed to understand the transport of electromagnetic energy (Poynting fluxes, $E \times B / \mu$) associated with SCs. In this study, we examined two critical subjects about the ionospheric electric field associated with SCs using the in-situ electric field data.

The in-situ ionospheric electric field was derived from the drift velocity observed by the Ionospheric Plasma and Electrodynamics Instrument (IPEI) onboard ROCSAT-1, which orbited at an ionospheric altitude (about 600 km), with magnetic field from the IGRF-10 model. We also used the geomagnetic field data from ground stations at the subauroral region, mid and low latitudes, and dip equator with a high time resolution of 1 second.

The first subject is the transmission time of the ionospheric electric field from the subauroral region to the dip equator. We found the simultaneous SC onset between the ionospheric electric field by the ROCSAT-1 observations and geomagnetic fields by ground-based observations, and the time delay in the peak amplitudes of the preliminary impulse (PI) and main impulse (MI) occur irrespective of the magnetic local time (MLT). In statistical analyses, we showed that peak signatures of the ionospheric electric field at the low latitude appeared simultaneously with that of the geomagnetic field at the subauroral region. We also found that the peak signature at the equatorial region was observed with the time delay, and its value is about 20-40 seconds in the PI peak and 80-140 seconds in the MI peak. The instantaneous onset can be explained by means of the TM_0 mode waves propagating at the speed of light in the Earth-ionosphere waveguide, while the time delay in the peaks is interpreted as the difference of the time constant L/R of an equivalent circuit. From these results, we demonstrated the transmission of the electric field from the subauroral region and the common energy transport process for both the PI and MI.

The second subject is the global structure of the ionospheric field. Ground-based observations are limited to mid and low latitudes, and provide only the horizontal component (E_{phi}) of the electric field. Thus, it is difficult to estimate the global electric field variation, especially at the terminator sector where SC signatures tend to appear in the radial component (E_r) of the electric field. We found the MLT dependence of the SC amplitude both the PI and MI signatures in the E_r and E_{phi} electric fields. In addition, the dayside characteristics of the PI signature extended to the evening terminator sector (18-21 h MLT) with an enhancement around 20 h MLT. This tendency is consistent with previous results obtained by the ground-based observations and model calculations. We consider that enhancements associated with SCs are influenced by the non-uniform ionospheric conductivity.

In the present study, we revealed the global instant response of the ionospheric electric field during SCs based on the in-situ ionospheric electric field observations. Our results can serve as a basis for understanding energy transmission paths during rapid reconfigurations of ionospheric convection.

磁気急始に伴う電離圏の過渡的対流

Evolution of convection vortices associated with sudden impulses observed by SuperDARN

堀 智昭^{1*}; 新堀 淳樹²; 西谷 望¹; 藤田 茂³

HORI, Tomoaki^{1*}; SHINBORI, Atsuki²; NISHITANI, Nozomu¹; FUJITA, Shigeru³

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 京都大学生存圏研究所, ³ 気象庁気象大学校

¹STE lab, Nagoya Univ, ²RISH, Kyoto Univ, ³Meteorological College

Spatial evolution of transient ionospheric convection induced by sudden impulses (SIs) recorded by ground magnetometers is studied statistically by using SuperDARN (SD) data. An advantage of using SD data instead of ground magnetic fields is that ionospheric flows measured by the radars are not virtually biased by the spatially-varying ionospheric conductance or the magnetospheric currents. First we surveyed the Sym-H index for Jan., 2007 to Dec., 2012 to identify SI events with a peak amplitude $|d\text{Sym-H}|$ greater than 10 nT. Next we searched all SD data over the northern hemisphere during the SI events for ionospheric backscatters which give us the light-of-sight velocity of horizontal ionospheric flows. For each SI event, the collected ionospheric flow data were sorted into the four periods: the pre-SI period, the pre-Main Impulse (MI), middle-MI, and post-MI periods. In the present study, we examine the differences in flow velocity between the pre-SI period and the three MI periods to clarify how ionospheric flows change in association with SIs. As a result, the ionospheric flow shifts eastward on the dusk side and westward on the dawn side at the higher latitudes during positive SIs (SI+), while it shows a roughly westward/eastward shift on the dusk/dawn side, respectively, during negative SIs (SI-). These polarities of flow shifts are basically consistent with the higher latitude portions of the DP current for the MI phase as shown by Araki [1994] and Araki and Nagano [1988]. The high latitude flow shifts are basically larger for SI events with larger Sym-H variations, in the same fashion as ground magnetic field variations at high latitudes. In addition to the major dependence on SI amplitude, the flow shift magnitude shows a minor dawn-dusk asymmetry particularly under strong IMF-By conditions. We speculate that the interaction with pre-existing convection cells might cause the selective enhancement of either side of flow shifts.

キーワード: 磁気急始, SuperDARN, 電離圏対流

Keywords: sudden impulse, SuperDARN, ionospheric convection

磁気嵐時の地磁気変動に見られるグローバルな電離圏電流分布について Global distributions of storm-time ionospheric currents as seen in geomagnetic field variations

新堀 淳樹^{1*}; 堀 智昭²; 田中 良昌³; 小山 幸伸⁴; 菊池 崇²; 長妻 努⁵

SHINBORI, Atsuki^{1*}; HORI, Tomoaki²; TANAKA, Yoshimasa³; KOYAMA, Yukinobu⁴; KIKUCHI, Takashi²; NAGATSUMA, Tsutomu⁵

¹ 京都大学生存圏研究所, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所 ジオスペース研究センター, ³ 国立極地研究所, ⁴ 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター, ⁵ 独立行政法人 情報通信研究機構

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, ²Nagoya University Solar Terrestrial Environment Laboratory Geospace Research Center, ³National Institute of Polar Research, ⁴Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism Graduate School of Science, Kyoto University, ⁵National Institute of Information and Communications Technology

To investigate temporal and spatial evolution of global geomagnetic field variations from high-latitude to the equator during geomagnetic storms, we analyzed ground geomagnetic field disturbances from high latitudes to the magnetic equator. The daytime ionospheric equivalent current during the storm main phase showed that twin-vortex ionospheric currents driven by the Region 1 field-aligned currents (R1 FACs) are intensified significantly and expand to the low-latitude region of ~30 degrees magnetic latitude. Centers of the currents were located around 70 and 65 degrees in the morning and afternoon, respectively. Corresponding to intensification of the R1 FACs, an enhancement of the eastward/westward equatorial electrojet occurred at the daytime/nighttime dip equator. This signature suggests that the enhanced convection electric field penetrates to both the daytime and nighttime equator. During the recovery phase, the daytime equivalent current showed that two new pairs of twin vortices, which are different from two-cell ionospheric currents driven by the R1 FACs, appear in the polar cap and mid latitude. The former led to enhanced northward Bz (NBZ) FACs driven by lobe reconnection tailward of the cusps, owing to the northward interplanetary magnetic field (IMF). The latter was generated by enhanced Region 2 field-aligned currents (R2 FACs). Associated with these magnetic field variations in the mid-latitudes and polar cap, the equatorial magnetic field variation showed a strongly negative signature, produced by the westward equatorial electrojet current caused by the dusk-to-dawn electric field.

キーワード: 磁気嵐, 対流電場, 遮蔽電場, 電離圏擾乱ダイナモ, 惑星空間磁場, 太陽風

Keywords: geomagnetic storm, convection electric field, shielding electric field, ionospheric disturbance dynamo, interplanetary magnetic field, solar wind

磁気赤道における DP2 侵入電場の午前・午後非対称性について The forenoon-afternoon asymmetry of DP2 electric field penetrated to the dip equator

松下 拓輝^{1*}; 吉川 顕正²; 魚住 禎司³; 池田 昭大⁴; 大谷 晋一⁵

MATSUSHITA, Hiroki^{1*}; YOSHIKAWA, Akimasa²; UOZUMI, Teiji³; IKEDA, Akihiro⁴; OHTANI, Shinichi⁵

¹九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, ²九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, ³九州大学国際宇宙天気科学・教育センター, ⁴鹿児島工業高等専門学校, ⁵ジョンホプキンス大学応用物理研究所

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu university, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu university, ³International Center for Space Weather Science and Education, Kyushu University, ⁴Kagoshima National College of Technology, ⁵The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory

DP2 変動は、数十分から数時間の周期を持つ準周期的な変動で、太陽風擾乱と同期していること [Nishida, 1968]、地上でグローバルに観測される特徴を持つ [Nishida, 1968], [Kikuchi et al., 1996] ことがよく知られている。この2つの特徴は太陽風擾乱に伴う電磁場擾乱が極域電離圏に入り込み、中低緯度領域をまたいで、磁気赤道領まで侵入する様な磁気圏-電離圏結合電流系を励起していることを示唆しているが、極域から磁気赤道域への侵入経路・メカニズムは未だ明らかになっていない。

本研究では、磁気圏-電離圏結合の終着点でもある磁気赤道域において、DP2 変動時における電磁場構造の空間構造を調べることで、極域の電場がどのようなメカニズムで磁気赤道にまで侵入して来ているかを明らかにし、DP2 電流系を推定することを目標とした。電場は磁場と電気伝導度からオームの法則に基づいて計算し、磁場データは、MAGDAS/CPMN [K. Yumoto et al., 2006 and 2007] の地上観測点のうち、ILR, AAB, TIR, LKW, DAV, CEB, YAP の磁気赤道観測点群を、電気伝導度は京都大学 WDC の電気伝導度モデルを用いて、得られたカウリング伝導度をそれぞれ使用した。これらのデータを用いて、2007 年~2008 年の2年間にわたって解析を行い、電場の LT 分布を導出した。

解析の結果、DP2 変動に対応する電場が磁気赤道域において、午前・午後の間に明瞭な非対称構造を持つことが明らかになった。この非対称構造は南北半球における極域の電場のみから作り出されるポテンシャル構造では説明が難しく、極域から磁気赤道に電場が侵入する間にこの構造を作り出す何かしらのメカニズムが存在することを示唆している。我々はこのメカニズムとして、Cowling channel model [Yoshikawa et al., 2012, AGU] での、昼夜境界領域や磁気赤道域で生成された分極電場が全球的なポテンシャル構造を歪曲させたと考えており、このモデルに基づいたポテンシャル分布の計算結果と今回の結果は矛盾しない。

キーワード: DP2 変動, 磁気赤道, 電離圏電流

Keywords: DP2 oscillation, dip equator, ionospheric current

サブストーム時の夜側低緯度の電離圏電場 Substorm electric fields at nightside low latitude

橋本 久美子^{1*}; 菊池 崇²; 富澤 一郎³; 長妻 努⁴

HASHIMOTO, Kumiko^{1*}; KIKUCHI, Takashi²; TOMIZAWA, Ichiro³; NAGATSUMA, Tsutomu⁴

¹ 吉備国際大学, ² 名古屋大学, ³ 電気通信大学, ⁴ 情報通信研究機構

¹Kibi International University, ²Nagoya University, ³University of Electro-Communications, ⁴National Institute of Information and Communications Technology

The convection electric field penetrates from the polar ionosphere to low latitude and drives the DP2 currents in the global ionosphere with an intensified equatorial electrojet (EEJ). The electric field often reverses its direction, that is, the overshielding occurs and causes the equatorial counter electrojet (CEJ) during storm and substorms. In this paper we report that the overshielding electric field is detected by the HF Doppler sounders at low latitude on the nightside. We analyzed the Doppler frequency of the HF radio signals propagated over 120 km in Japan at frequencies of 5 and 8 MHz and compared with the equatorial EEJ/CEJ during the substorm expansion phase. We found that the overshielding electric field reaches around 2 mV/m during major substorms (AL < -1800 nT). Taking the geometrical attenuation into account, we estimate the equatorial electric field to be about 1.5 mV/m. We also found that the electric field drives the eastward electrojets in the equatorial ionosphere on the night side. It is to be noted that the overshielding electric field is observed on the nightside at low latitude during the major substorms, while the convection electric field is dominant during smaller size substorms, as the CEJ flows on the dayside. These results suggest that the overshielding electric field associated with the Region-2 field-aligned currents becomes dominant during substorms at low latitude on the nightside as well as on the dayside. On the other hand, we found strong seasonal dependence of the overshielding in the sub-auroral latitudes. Although the substorm CEJs at Huancayo do not depend on season, the overshielding frequently occurs at subauroral latitudes during the winter period from November to February. In contrast, the convection electric field is dominant at the subauroral and low-latitudes during the summer period from April to August. The strong seasonal dependence may suggest that the Region-1 field aligned currents (FACs) have a constant voltage source, while the Region-2 FACs have a constant current source, which results in the convection and overshielding electric fields being dominant in summer and winter, respectively.

キーワード: サブストーム, 中緯度電離圏, 対流電場, 過遮蔽, 赤道カウンタージェット電流

Keywords: substorm, midlatitude ionosphere, convection electric field, overshielding, equatorial counter electrojet

プラズマ対流速度の磁気圏電離圏結合シミュレーションから得られる計算値と SuperDARN レーダーデータから得られる観測値の比較 Comparing the ionospheric plasma drift obtained from the global MHD simulation and that measured by SuperDARN radars

才田 聡子^{1*}; 藤田 茂²; 門倉 昭³; 田中 高史⁴; 行松 彰³; 田中 良昌³; 大谷 晋一⁵; 村田 健史⁶; 樋口 知之⁷
SAITA, Satoko^{1*}; FUJITA, Shigeru²; KADOKURA, Akira³; TANAKA, Takashi⁴; YUKIMATU, Akira sessai³; TANAKA, Yoshimasa³; OHTANI, Shinichi⁵; MURATA, Ken T.⁶; HIGUCHI, Tomoyuki⁷

¹ 情報・システム研究機構, ² 気象大学校, ³ 国立極地研究所, ⁴ 九州大学 国際宇宙天気科学・教育センター, ⁵ ジョンズホプキンス大学応用物理研究所, ⁶ 情報通信研究機構, ⁷ 統計数理研究所
¹Research Organization of Information and Systems, ²Meteorological College, ³National Institute of Polar Research, ⁴International Center for Space Weather Science and Education, Kyushu University, ⁵Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, ⁶National Institute of Information and Communications Technology, ⁷The Institute of Statistical Mathematics

グローバル電磁流体力学的 (MHD) シミュレーション (Tanaka *et al.*, 2010) による太陽風の変動に対する地球磁気圏や電離圏の応答を調べる研究は発展を続けており、太陽風から取り込まれた磁気圏のエネルギーが突然開放されるサブストームと呼ばれる現象を再現し、そのときの地球磁気圏のダイナミクスを議論できる程度にまで成長してきた。

磁気圏-電離圏相互作用過程は現在も十分に解明されていないために、シミュレーションモデルにおける磁気圏と電離圏の境界における関係式にはいくつか任意に決定されている係数がある。これらの係数の値によって、オーロラ発生時の磁気圏や電離圏における物理量分布は変化する。

本研究の最終的な目的はデータ同化手法を用いて最適な組み合わせの係数を推定することである。磁気圏モデルの内部境界における関係式から、磁気圏から入力される沿磁力線電流や、プラズマ圧などの電離圏電気伝導度への寄与を変えると、磁気圏にフィードバックされる沿磁力線電流やポテンシャルが変化し、最終的には磁気圏・電離圏の対流構造も大きく変わってくることが予想される。

本発表では衛星 ACE によって観測された太陽風パラメータを入力してシミュレーションを実行して得た電離圏のプラズマ対流速度と SuperDARN レーダーで観測されたプラズマ対流速度の比較を行う。また、シミュレーションでは再現されなかったプラズマ対流構造を紹介し、太陽風中の磁場が南を向いて磁気圏・電離圏対流が活発な状態における磁気圏-電離圏結合過程におけるシミュレーションモデルの関係式の改良とモデルパラメータの最適値推定について考察する。

References:

Tanaka, T., A. Nakamizo, A. Yoshikawa, S. Fujita, H. Shinagawa, H. Shimazu, T. Kikuchi, and K. K. Hashimoto (2010), Sub-storm convection and current system deduced from the global simulation, *J. Geophys. Res.*, 115, A05220, doi:10.1029/2009JA014676.

キーワード: 電離圏対流, SuperDARN, シミュレーション

Keywords: the ionospheric convection, SuperDARN, simulation

プロトンオーロラ・電子オーロラサブストーム総合モデルの構築に向けて： 昭和
基地地上観測
Toward construction of comprehensive proton and electron auroral substorm model: Ground-
based observation at Syowa

門倉 昭^{1*}; 福田 陽子²; 井 智史³; 宮道 光平⁴; 宮岡 宏¹; 佐藤 夏雄¹
KADOKURA, Akira^{1*}; FUKUDA, Yoko²; I, Tomofumi³; MIYAJI, Kohei⁴; MIYAOKA, Hiroshi¹; SATO, Natsuo¹

¹ 極地研, ² 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ³ 気象庁地磁気観測所技術課, ⁴ 名古屋大学大学院理学研究科
¹NIPR, ²Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, ³Kakioka Magnetic
Observatory, Japan Meteorological Agency, ⁴Graduate School of Science, Nagoya University

極地研では、南極地域観測第Ⅷ期6ヵ年計画の下、昭和基地でのオーロラ光学観測システムの整備を進めている。「モニタリング観測」機器としては、(1)全天単色デジタルCCDイメージャ4式(427.8, 557.7, 485.0, 481.0nm)と(2)全天カラーデジタルカメラ、「一般研究観測」機器としては、(1)全天TVカメラと(2)8色掃天フォトメータ、の導入を進めてきた。2014年のシーズンには、電子オーロラ2波長(427.8, 557.7nm)とプロトンオーロラ2波長(481.0, 485.0nm)の全天CCDイメージャ4式による同時観測が実現出来ているので、その初期結果を中心に報告する。上記4式のイメージャの撮像間隔は15秒で共通にし、同じ時間分解能で電子オーロラとプロトンオーロラの空間分布を観測することを目的としている。微弱なプロトンオーロラを観測するため、プロトンイメージャについては、元々512x512の画素数のCCD出力に対し8x8のビンニングを行い、空間解像度を64x64に落としている。

8色掃天フォトメータの波長構成(中心波長(半値幅))は、482.5(0.6), 483.5(0.6), 484.5(0.6), 485.5(0.6), 486.5(0.6), 487.5(0.6), 670.5(5.0), 844.6(0.6) nmで、プロトンオーロラ(H β)のスペクトル用6波長と電子オーロラ用2波長からなる。掃天速度は180度/10秒で、サンプリング速度は20Hzである。

こうした全天イメージャと掃天フォトメータの電子オーロラ、プロトンオーロラ同時観測データにより、降下電子や降下プロトンのエネルギー情報も含んだ、オーロラサブストーム発達過程の総合的なモデルを構築することが1つの目標となる。目標としているモデルの概要についても紹介する予定である。

キーワード: オーロラ, サブストーム, 地上光学観測, 昭和基地

Keywords: aurora, substorm, ground-based observation, Syowa Station

朝夕昼夜境界付近で観測される Pi 2 型地磁気脈動の性質 Characteristics of Pi 2 pulsations around the dawn and dusk terminator

今城 峻^{1*}; 吉川 顕正²; 魚住 禎司²; 大谷 晋一³; 中溝 葵⁴; Marshall Richard⁵; Shevtsov Boris M.⁶; Akulichev Victor A.⁷; Sukhbaatar Usnikh⁸; 湯元 清文²
IMAJO, Shun^{1*}; YOSHIKAWA, Akimasa²; UOZUMI, Teiji²; OHTANI, Shinichi³; NAKAMIZO, Aoi⁴; MARSHALL, Richard⁵; SHEVTSOV, Boris M.⁶; AKULICHEV, Victor A.⁷; SUKHBAAATAR, Usnikh⁸; YUMOTO, Kiyohumi²

¹九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, ²九州大学国際宇宙天気科学・教育センター, ³ジョンホプキンス大学応用物理学研究所, ⁴FMI, Arctic Research Unit, ⁵IPS Radio and Space Services, Bureau of Meteorology, Australia, ⁶Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation, ⁷Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, ⁸The Research Center of Astronomy and Geophysics of Mongolian Academy of Sciences

¹Dept. Earth Planet. Sci., Kyushu Univ., ²ICSWSE, Kyushu Univ., ³APL, Johns Hopkins Univ., ⁴FMI, Arctic Research Unit, ⁵IPS Radio and Space Services, Bureau of Meteorology, Australia, ⁶Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation, ⁷Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, ⁸The Research Center of Astronomy and Geophysics of Mongolian Academy of Sciences

We statistically investigate low-latitude Pi 2 pulsations observed around the dawn and dusk terminator. The main observational results of this study are: (1) Pi 2 pulsations tended to have east-west polarity in the sunlit side of the dawn terminator, while these in the sunlit side of the dusk terminator tended to have north-south polarity. (2) Phase reversals of D-component oscillations occurred near the dawn terminator and 2-3 hours before the dusk terminator. (3) Peaks of D/H (maximum amplitude ratio between D and H component) appear 3 hours after the dawn terminator and near the dusk terminator.

We suggest that there is the dawn-dusk asymmetry of meridional ionospheric currents connecting between equatorial Cowling current and oscillating nightside FACs; meridional currents around dawn is more intense than around dusk. This asymmetry current system can be qualitatively explained by the deformation of potential pattern caused by polarization charges at the terminator.

キーワード: Pi 2 型地磁気脈動, 朝夕昼夜境界, 電離層電流, 沿磁力線電流

Keywords: Pi 2 pulsations, The dawn and dusk terminator, Ionospheric currents, FACs

北海道 - 陸別 HF レーダーの RBSP モードを用いた Pc5 波動自動検出 Automatic identification of Pc5 waves using RBSP mode data from the SuperDARN Hokkaido HF radar

松下 敏法^{1*}; 関 華奈子¹; 西谷 望¹; 堀 智昭¹

MATSUSHITA, Toshinori^{1*}; SEKI, Kanako¹; NISHITANI, Nozomu¹; HORI, Tomoaki¹

¹ 名古屋大学 太陽地球環境研究所

¹STEL, Nagoya University

Ultra-low-frequency Pc5 waves have been observed by many methods such as ground-based magnetometers, HF radars and satellites. It has been demonstrated by numerical experiments that magnetospheric Pc5 waves are globally and directly generated on the dayside by solar wind dynamic pressure variations and/or on the dawn/dusk flank by Kelvin-Helmholtz surface waves. In addition, there are storm-time Pc5 waves on the dusk side magnetosphere that are associated with instabilities in the storm time ring current caused by the particle injection. The Pc5 waves can play an important role in mass and energy transport within the inner magnetosphere such as the radial diffusion of outer radiation belt electrons, as suggested by previous studies. Outstanding problems in Pc5 studies include clarification of their global characteristics and distribution, generation mechanisms, and especially their dependence on the solar wind parameters.

In this study, we try to develop a new automatic identification method of Pc5 waves using ~20-sec time resolution data obtained by the SuperDARN Hokkaido HF radar operated in the RBSP mode. In this method, we use the Doppler velocity data and the power spectrum density calculated by the wavelet transformation. We set criteria which can detect Pc5 waves even when harmonic oscillations coexist. We show an example for the identification method using the Doppler velocity data obtained by the SuperDARN Hokkaido HF radar in details. Then, the candidates of Pc5 event are verified by inspection. From the rate of error identification, we evaluate the accuracy of the automatic identification method statistically. In the presentation we will also report on the preliminary results of mid-latitude Pc5 characteristics such as frequency distribution and MLT dependence.

キーワード: SuperDARN, Pc5 波動

Keywords: SuperDARN, Pc5 waves

北海道 HF レーダーと地上磁場における Pc 4 脈動の同時観測研究 A Simultaneous Observation of Pc 4 pulsation by Hokkaido HF Radar and Ground-Based Magnetometers

尾花 由紀^{1*}; 西谷 望²; 堀 智昭²; 寺本 万里子³; 能勢 正仁⁴; 吉川 顕正⁵
OBANA, Yuki^{1*}; NISHITANI, Nozomu²; HORI, Tomoaki²; TERAMOTO, Mariko³; NOSE, Masahito⁴; YOSHIKAWA, Akimasa⁵

¹ 大阪電気通信大学工学部基礎理工学科, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ⁴ 京都大学大学院理学研究科, ⁵ 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

¹Department of Engineering Science, Osaka Electro-Communication University, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ³Japan Aerospace Exploration Agency, ⁴Graduate School of Science, Kyoto University, ⁵Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University

We studied a Pc 4 (6.7-22.2 mHz) oscillation of ionospheric Doppler plasma velocity observed around the dawn terminator on 16 Jul 2013 on an east-northeast pointing beam 14 of SuperDARN Hokkaido HF radar in Japan. We compared this ionospheric Pc 4 oscillation with magnetic field variation at St. Paratunka (PTK) in Russia, Kakioka (KAK) in Japan, Guam (GUA), Middlemarch (MDM) and Te Wharau (TEW) in New Zealand. PTK and conjugate points of MDM and TEW are located almost under the radar beam. The waveforms showed high similarity among the HF Doppler, the D (east-west) component of magnetic field at stations in the middle latitude of northern hemisphere (PTK and KAK). While, at the other stations (MDM, TEW, and GUA) the H (north-south) component of magnetic field showed high similarity to the HF Doppler. Using the value of the peak-to-peak amplitude of the HF Doppler velocity, we estimated amplitude of magnetic field variation with assuming a horizontal current sheet infinitely extended in the ionosphere. The estimated amplitude was comparable to the observed amplitude at PTK. We also studied longitudinal variation in amplitude using magnetic field data at Amsterdam Isl. (AMS) in South Indian Ocean and Fredericksburg (FRD) in the United States. The maximum amplitude was found at AMS which located around the midnight.

These results can be interpreted as follows. This event had its source from night side and the Doppler velocity oscillation was caused by an oscillating electric field in the east-west direction. In the northern hemisphere (PTK and KAK), the ionosphere above the observatory was sunlit, thus the ionospheric Hall current induced by the electric field makes D component of magnetic field oscillation on the ground. On the other hand, in the southern hemisphere (MDM and TEW) and GUA, the ionosphere above the stations was still in the darkness, thus effective ionospheric current could not be induced due to low conductivity. The H component of magnetic field oscillation may reflect direct incidence of magnetic field oscillation from the magnetosphere to the ground.

キーワード: ULF, HF レーダー, 磁気圏電離圏結合, 地磁気脈動
Keywords: ULF, HF radar, M-I coupling, magnetic pulsation

電離圏へのエネルギー流入と酸素及び水素イオン流出との関係の太陽天頂角依存性 Solar zenith angle dependence of relationships between energy inputs to the ionosphere and O⁺ and H⁺ ion outflows

北村 成寿^{1*}; 関 華奈子¹; 桂華 邦裕¹; 西村 幸敏²; 堀 智昭¹; Strangeway Robert J.³; McFadden James P.⁴; Lund Eric J.⁵
KITAMURA, Naritoshi^{1*}; SEKI, Kanako¹; KEIKA, Kunihiro¹; NISHIMURA, Yukitoshi²; HORI, Tomoaki¹; STRANGE-
WAY, Robert J.³; MCFADDEN, James P.⁴; LUND, Eric J.⁵

¹名古屋大学 太陽地球環境研究所, ²カリフォルニア大学ロサンゼルス校, ³カリフォルニア大学ロサンゼルス校, ⁴カリ
フォルニア大学バークレー校, ⁵ニューハンプシャー大学

¹STEL, Nagoya University, ²Dept. of Atmos. and Oceanic Science, UCLA, ³Inst. of Geophys. and Planetary Phys., UCLA,
⁴Space Science Laboratory, UC Berkeley, ⁵SSC, Univ. of New Hampshire

Recent satellite observations and simulations have clarified that plasma outflows play an important role in abrupt changes in the ion composition in the plasmashet and ring current during geomagnetic storms. Statistical studies by Strangeway et al. [2005] and Brambles et al. [2011] indicated that the flux of ion outflows is correlated well with soft electron precipitation (precipitating electron density and electron density in the loss cone), and DC and Alfvénic Poynting fluxes using the data obtained by the FAST satellite near the cusp region in the dayside during the 24-25 September 1998 geomagnetic storm. To distinguish between O⁺ and H⁺ ion outflows, we performed statistical studies using the ion composition data in addition to the ion and electron data obtained by the FAST satellite at 3000-4150 km altitude during January 1998 and January 1999. The long-term dataset enables us to identify empirical formulas between the outflowing O⁺ and H⁺ ion fluxes and the precipitating electron density, the electron density in the loss cone, the net electron number flux, and the DC and Alfvénic Poynting fluxes in a wide solar zenith angle (SZA) range (for dayside, 50-110 degree; and for nightside, 90-150 degree). In the SZA range of 90-110 degrees, the above formulas in the dayside are almost similar to those in the nightside. While SZA dependence of the relationships between the outflowing O⁺ and H⁺ ion fluxes and the DC and Alfvénic Poynting fluxes are weak, the empirical formulas between the outflowing O⁺ and H⁺ ion fluxes and soft electron precipitation, especially the precipitating electron density and the electron density in the loss cone, depend on SZA. Although the precipitating electron density and the electron density in the loss cone that correspond to the outflowing O⁺ ion flux of about 10⁷ /cm²/s increase with decreasing SZA, the outflowing O⁺ and H⁺ ion fluxes become more sensitive to an increase in soft electron precipitation with decreasing SZA.

キーワード: イオン流出, 極域電離圏

Keywords: ion outflow, polar ionosphere

Inversion method for estimating the helium ion density distribution in the plasmasphere based on IMAGE/EUV data
Inversion method for estimating the helium ion density distribution in the plasmasphere based on IMAGE/EUV data

中野 慎也^{1*}; Fok Mei-Ching²; Brandt Pontus C.³; 樋口 知之¹
NAKANO, Shin'ya^{1*}; FOK, Mei-ching²; BRANDT, Pontus C.³; HIGUCHI, Tomoyuki¹

¹ 統計数理研究所, ²NASA Goddard Space Flight Center, ³The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory
¹The Institute of Statistical Mathematics, ²NASA Goddard Space Flight Center, ³The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory

The plasmasphere exhibits a variety of shapes as a result of the variation in the electric field in the inner magnetosphere due to the coupling processes between the solar wind, the magnetosphere, and the ionosphere. Global imaging observations from outside the plasmasphere provide striking evidence of the variability of the plasmasphere. In particular, the EUV imager on board the IMAGE satellite obtained global EUV images of the plasmasphere, which have provided important insights into the variation of the plasmasphere. Our aim is to obtain the information on the ion density distribution for individual events rather than simply the averaged distribution from IMAGE/EUV data. For this purpose, we propose a linear inversion technique by which to estimate the helium ion density distribution. We applied this technique to a synthetic EUV image generated from a numerical model. This technique was confirmed to successfully reproduce the helium ion density that generated the synthetic EUV data. We also demonstrate how the proposed technique works for real data using real EUV images.

キーワード: プラズマ圏, 逆問題, 磁気圏
Keywords: plasmasphere, inverse problem, magnetosphere

雷ホイストラ解析を主眼としたあけぼの搭載 VLF/WBA データ解析の現状と今後の利活用について

Current availability and utilization prospect of data obtained by AKEBONO for the research on lightning whistler

大池 悠太^{1*}; 笠原 禎也¹; 後藤 由貴¹
OIKE, Yuta^{1*}; KASAHARA, Yoshiya¹; GOTO, Yoshitaka¹

¹ 金沢大学大学院自然科学研究科

¹ Kanazawa University

The AKEBONO spacecraft (EXOS-D) was launched in 1989 to observe particles and plasma waves in the auroral region and the plasmasphere of the Earth. It covers the altitude region from 300 km to about 10,000 km with an orbital inclination of 75 degree, and has been operated for more than 25 years which exceed 2 cycles of solar activity or 1 cycle of solar magnetic polarity reversal. Therefore analyses of the data obtained by AKEBONO enable us to study how the magnetosphere varies comprehensively.

The WBA (Wide Band Analyzer) is one of subsystems of the VLF instruments onboard AKEBONO. It measures 1 component of electric or magnetic analogue waveform in the frequency band of 50 Hz - 15 kHz. Typical waves such as chorus, hiss and whistler were frequently observed by the WBA. Huge amounts of data obtained by the WBA for more than 25 years are originally recorded as analogue waveform format in the magnetic audio tapes. Data conversion from analogue to digital is now carried out and the converted data are stored in our computer storage as digital WAVE format. Total number of the data files of digital WAVE format is more than 6,000, the total file size exceeds 10 terabytes and the processable data amount corresponds to more than 5,000 hours observation.

An automatic detection system to detect lightning whistlers from spectrograms of the WBA was developed. The spectrum intensity is automatically calibrated inside the system referring to the status of automatic gain controller of the receiver before detecting lightning whistlers. The system can output observed time, frequency band and dispersion of each detected lightning whistler. Some statistics of the lightning whistlers such as spatial and local time dependence of the occurrence frequency were already performed and the comparison with lightning activities are now under study. Because the dispersion of lightning whistler strongly depends on the electron density profile along the propagation path of the wave so that global electron density profile can be estimated using trend of dispersions of lightning whistlers. It is also pointed out that the propagation behavior of lightning whistlers is important clue to understand the wave-particle interaction. Thus these data and statistics have potential to achieve more valuable knowledge of the plasma physics in the magnetosphere.

In this presentation, we introduce the current status of data availability of the WBA and the derived results so far. We also discuss prospect of the data utilization.

キーワード: あけぼの, VLF, 広帯域受信機, 雷ホイストラ

Keywords: AKEBONO (EXOS-D), VLF, wide band receiver, lightning whistler

MF/HF 帯オーロラ電波の地上・衛星同時観測 Simultaneous ground-based and satellite observations of MF/HF auroral radio emissions

佐藤 由佳^{1*}; 熊本 篤志²; 加藤 雄人²; 新堀 淳樹³; 門倉 昭¹; 小川 泰信¹
SATO, Yuka^{1*}; KUMAMOTO, Atsushi²; KATOH, Yuto²; SHINBORI, Atsuki³; KADOKURA, Akira¹; OGAWA, Yasunobu¹

¹ 国立極地研究所, ² 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ³ 京都大学生存圏研究所

¹National Institute of Polar Research, ²Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, ³Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Ground-based and satellite observations have revealed that the Earth is a distinct radio source. The terrestrial auroral ionosphere emits electromagnetic waves in the MF/HF ranges (about 1-6 MHz) as well as well-known intense auroral kilometric radiation (AKR) and auroral hiss in the VLF/LF ranges. Terrestrial Hectometric Radiation (THR) is observed by satellite observations in a frequency range of 1-4.5 MHz at high latitudes during geomagnetic disturbances and is regarded as a counterpart of auroral roar which is one type of MF/HF auroral radio emissions observable from the ground. Both THR and auroral roar are attributed to mode conversions of upper hybrid waves favorably generated under the matching condition, $f_{UH} \sim n f_{ce}$, where previous studies confirmed $n = 2, 3, 4$ and 5 for auroral roar, and $n = 2$ for THR. However, no previous studies have tested the simultaneous appearance. In this study, we survey long-term observation data obtained by the ground-based passive receivers installed at the Husafell station, Iceland (after September 2005, latitude 64.67°N , longitude -21.03°E , 65.3° magnetic latitude) and the Kjell Henriksen Observatory (KHO), Svalbard (after August 2008, latitude 78.15°N , longitude 16.04°E , 75.2° magnetic latitude) and by the Plasma Waves and Sounder experiment (PWS) mounted on the Akebono satellite. This data set includes several simultaneous appearance events, while the frequency of auroral roar is different from that of THR observed by the Akebono satellite passing over the ground-based stations. This frequency difference supports the previously proposed idea that auroral roar and THR are generated at different altitudes near 250 km and 1000 km, respectively. There is hardly any possibility that simultaneous observations indicate the identical generation region of auroral roar and THR. We also find that auroral roar appearing during the time when the Akebono satellite passes over the ground-based stations tends to be accompanied by THR. However, when the Akebono satellite passing over the stations detects THR, auroral roar does not always appear. This tendency is explained in terms of the fact that the Akebono satellite can detect THR emissions coming from a wider region, and a considerable portion of auroral roar emissions generated in the F region is absorbed in the D/E regions.

カスプにおけるオーロラ増光の時間空間分布 Spatiotemporal distribution of auroral brightening in the cusp

田口 聡^{1*}; 細川 敬祐¹; 小川 泰信²
TAGUCHI, Satoshi^{1*}; HOSOKAWA, Keisuke¹; OGAWA, Yasunobu²

¹ 電気通信大学, ² 国立極地研究所

¹University of Electro-Communications, ²National Institute of Polar Research

Previous studies have shown that mesoscale auroral forms occur near the equatorward edge of the background, stable cusp aurora, and that they move in a direction that is consistent with the motion of the magnetic field line after reconnection on the dayside magnetopause. In this study we pay attention to its initial brightening using data from a high-sensitivity all-sky imager at Longyearbyen, Svalbard. The imager has a field-of-view that spans more than 4 hours in MLT, and can observe auroral brightenings that are widely separated in MLT. We determined the position of dayside auroral brightening using the 630-nm auroral images, and examined how these positions are distributed in the cusp, focusing on intervals when IMF was extremely stable. Results of analyses show that brightening occurs over a wide dayside MLT range. We show detailed spatiotemporal patterns for successive brightening events, and discuss the patterns in terms of the formation of intermittent reconnection on the dayside magnetopause.

キーワード: オーロラ, カスプ, 粒子降下, 磁気リコネクション, 全天イメージャ
Keywords: aurora, cusp, particle precipitation, magnetic reconnection, all-sky imager

立体視によるオーロラの高度測定 Height measurement from stereo imaging of aurora

片岡 龍峰^{1*}; 重松 界²; 三好 由純²; 宮原 ひろ子³; 糸屋 覚⁴

KATAOKA, Ryuhō^{1*}; SHIGEMATSU, Kai²; MIYOSHI, Yoshizumi²; MIYAHARA, Hiroko³; ITOYA, Satoru⁴

¹ 極地研, ² 名古屋大学, ³ 武蔵野美術大学, ⁴ 日本科学技術振興財団

¹NIPR, ²Nagoya University, ³MAU, ⁴JSF

A new stereoscopic measurement technique is developed (Kataoka+2013) to obtain an all-sky altitude map of aurora using two ground-based digital single-lens reflex (DSLR) cameras. Two identical full-color all-sky cameras were set with an 8 km separation across the Chatanika area in Alaska (Poker Flat Research Range and Aurora Borealis Lodge) to find localized emission height with the maximum correlation of the apparent patterns in the localized pixels applying a method of the geographical coordinate transform. It is successfully estimated that a typical ray structure of discrete aurora shows the broad altitude distribution above 100 km, while a typical patchy structure of pulsating aurora shows the narrow altitude distribution of less than 100 km. Recent new findings about the time variation of the emission height and further new challenges of February/March 2014 will also be reported.

Reference: Kataoka, R., Y. Miyoshi, K. Shigematsu, D. Hampton, Y. Mori, T. Kubo, A. Yamashita, M. Tanaka, T. Takahei, T. Nakai, H. Miyahara, and K. Shiokawa (2013), Stereoscopic determination of all-sky altitude map of aurora using two ground-based Nikon DSLR cameras, *Ann. Geophys.*, 31, 1543-1548.

キーワード: オーロラ, 地上光学観測, デジタル一眼レフカメラ

Keywords: aurora, ground-based imaging, digital single-lens reflex camera

トロムソでの地上光学観測に基づく圧力駆動型プラズマ不安定を示唆するオーロラ構造の統計解析 Statistical analysis of auroral structures related to the plasma instability based on ground optical observations

橋本 あゆみ^{1*}; 塩川 和夫¹; 大塚 雄一¹; 大山 伸一郎¹; 野澤 悟徳¹
HASHIMOTO, Ayumi^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; OTSUKA, Yuichi¹; OYAMA, Shin-ichiro¹; NOZAWA, Satonori¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, Japan

オーロラの形状は、地球磁力線による磁気圏・電離圏結合により、磁気圏の擾乱が磁力線沿いに降り込むオーロラ粒子を通じて電離圏へ投影されることで形成されると考えられている。このため磁気圏の状態を説明する上でオーロラの形状を詳しく調べることは重要な手掛かりとなる。Shiokawa et al. [JGR, 2010] では、カナダのギラム（磁気緯度：65.5° N）での高分解能狭視野 CCD カメラを用いた観測で、オーロラパッチの西側に小さいスケールの指状のオーロラ構造が発見された。この構造は夜側のサブストームの回復相に、東へ動くパッチの速度が遅くなったときに現れ、成因は尾部の磁気圏の巨視的なレイリー・テイラー型不安定性と推測されている。しかしこの現象の統計解析はまだなされていない。本研究ではノルウェーのトロムソ（磁気緯度：67.1° N）に設置された全天カメラで2009年1月から2012年11月の冬の期間に観測された、圧力駆動型不安定性に起因すると思われるオーロラ現象の発生条件についての統計解析を行った。この期間のオーロラ画像を調べた結果、オーロラアークから発達する「大きい」構造は14例、パッチの中に現れる「小さい」構造は6例見つけることができた。本研究では、それぞれの発生した時間帯のMLT依存性、サブストームとの関連性、スケール、東向き伝播速度、発達速度等について解析を行った。その結果、「大きい」構造は真夜中から朝側に見られ、「小さい」構造は朝側に良く見られた。開始時刻は、「大きい」構造はサブストームの回復層の始まりに、「小さい」構造はサブストームの終わり頃に対応していると考えられる。スケールはどちらも磁気圏におけるイオンのジャイロ半径よりも大きく、MHD不安定を示唆している。伝播速度は典型的な真夜中のオーロラのドリフト速度より遅く、低エネルギープラズマがソースとなっていると考えられるが、このことは高エネルギー粒子が圧力駆動型不安定を引き起こすことに矛盾するため、より詳細に調べる必要がある。

キーワード: オーロラ, 圧力駆動型プラズマ不安定, 地上光学観測

Keywords: aurora, pressure-driven plasma instability, ground optical observation

オーロラ渦列形成とアルヴェン波のキャビティ捕捉 Auroral vortex street formation and cavity trapping of Alfvén waves

平木 康隆^{1*}
HIRAKI, Yasutaka^{1*}

¹ 国立極地研究所
¹ National Institute of Polar Research

我々はこれまで、オーロラアークの構造化を磁気圏-電離圏 (MI) 結合系における磁気流体 (MHD) 不安定性とその非線型発展という観点で理解する試みを精力的に行ってきた。双極子磁場、対流電場中において、アルヴェン速度 (v_A) 不均一を考慮した線型固有モード解析を行い、磁力線共鳴モード、電離圏アルヴェン共鳴モードがフィードバック不安定を起すことを示した [Hiraki and Watanabe, 2011; 2012, Hiraki, 2013]。MI 結合系の 3次元 Reduced-MHD シミュレーション (v_A は磁力線上一定) により、初期条件としてアーク構造を与えた場合に対して、その後の非線型発展の様子を調べた。その結果、i) アークがスプリットした直後に、増光しながら渦列へと変形すること、さらに、ii) 対流電場 20-40 mV/m 間に、その成長パターンの遷移があることがわかった。次に、 v_A 不均一を考慮した 3次元シミュレーション (アーク構造はなし) を行い、電離圏・磁気圏キャビティによるオーロラ構造とアルヴェン波特性の変化を調べた。電離圏キャビティを深くしていくと、磁気赤道側での二次的不安定 [Watanabe, 2010] が抑制され、電離圏側で大振幅の波がトラップされる様子がみられた。本発表では、上記二つのシミュレーションの初期成果について報告する。さらに、電離圏キャビティ領域における二流体効果と平行電場を加えたモデル拡張と解析を進めており、オーロラ電子加速についても議論したい。

キーワード: オーロラ渦列, アルヴェン波, 電離圏キャビティ, 電子加速, MHD シミュレーション
Keywords: Auroral vortex street, Alfvén wave, Ionospheric Alfvén resonator, Electron acceleration, MHD simulation

サブストームに伴う磁気圏尾部の磁気リコネクションとオーロラオンセットアークの形成のタイミング Relative timing of substorm-associated magnetic reconnection in the magnetotail and formation of auroral onset arc

宮下 幸長^{1*}; 家田 章正¹; 町田 忍¹; 平木 康隆²; Angelopoulos Vassilis³; McFadden James P.⁴; Auster H. Uli⁵; Mende Stephen B.⁴; Donovan Eric⁶; Larson Davin⁴
MIYASHITA, Yukinaga^{1*}; IEDA, Akimasa¹; MACHIDA, Shinobu¹; HIRAKI, Yasutaka²; ANGELOPOULOS, Vassilis³; MCFADDEN, James P.⁴; AUSTER, H. uli⁵; MENDE, Stephen B.⁴; DONOVAN, Eric⁶; LARSON, Davin⁴

¹名古屋大学太陽地球環境研究所, ²国立極地研究所, ³カリフォルニア大学ロサンゼルス校, ⁴カリフォルニア大学バークレー校, ⁵ブラウンシュヴァイク工科大学, ⁶カルガリー大学
¹STEL, Nagoya Univ., ²NIPR, ³Univ. of California, Los Angeles, ⁴SSL, Univ. of California, Berkeley, ⁵Technischen Universitat Braunschweig, ⁶Univ. of Calgary

本研究では、サブストーム開始時に磁気圏近尾部で発生する磁気リコネクションとオーロラオンセットアークの形成のタイミングについて、THEMIS 衛星と地上全天カメラのデータを用いて事例解析を行った。THEMIS 地上全天カメラは、オーロラを広範囲にわたって、これまでの衛星搭載のカメラよりも高い時間空間分解能で観測している。そのため、従来よりも詳細にオーロラの発展のタイミングを調べることができる。オーロラオンセットアークは、出現し、増光し始めてから数分後に大きく渦巻き始める。さらに数分後に極方向に拡大する。磁気圏近尾部のプラズモイドの観測から磁気リコネクションがどの時点で発生するかを調べたところ、磁気リコネクションは、 $X \sim 20$ Re 付近で、オーロラオンセットアークの出現の少なくとも 1-3 分前に始まることがわかった。この結果から、磁気リコネクションがオーロラオンセットアークの形成に何らかの役割を果たしていることが示唆される。

キーワード: サブストーム, オーロラオンセットアーク, 磁気圏尾部, 磁気リコネクション, プラズモイド, GEMSIS
Keywords: substorm, auroral onset arc, magnetotail, magnetic reconnection, plasmoid, GEMSIS

オーロラトモグラフィで得られた東向き伝搬するオーロラ渦構造の特性 Characteristics of eastward propagating aurora vortices obtained by aurora tomography

田中 良昌^{1*}; 小川 泰信¹; 門倉 昭¹; 宮岡 宏¹; Gustavsson Bjorn³; Partamies Noora²; Brandstrom Urban⁴; Whiter Daniel²; Enell Carl-Fredrik⁵
TANAKA, Yoshimasa^{1*}; OGAWA, Yasunobu¹; KADOKURA, Akira¹; MIYAOKA, Hiroshi¹; GUSTAVSSON, Bjorn³; PARTAMIES, Noora²; BRANDSTROM, Urban⁴; WHITER, Daniel²; ENELL, Carl-fredrik⁵

¹ 国立極地研究所, ² フィンランド気象研究所, ³ トロムソ大学, ⁴ スウェーデン宇宙物理研究所, ⁵ EISCAT 科学協会
¹ National Institute of Polar Research, ² Finnish Meteorological Institute, ³ University of Tromso, ⁴ Swedish Institute of Space Physics, ⁵ EISCAT Scientific Association

We investigate characteristics of three mesoscale aurora vortices observed in the Northern Scandinavia by aurora campaign observation in March, 2013, which was conducted in collaboration with the Swedish Institute of Space Physics (IRF) and the Finnish Meteorological Institute (FMI). The aurora vortices propagated eastward intermittently at about 15-minute intervals in the post-midnight sector (0:00-0:40 UT; 2:30-3:10 magnetic local time) after the substorm onset. They were simultaneously observed by three monochromatic (427.8nm wave length) all-sky EMCCD imagers at Tromso (69.6N, 19.2E), Norway, Kilpisjarvi (69.0N, 20.9E), Finland, and Abisko (68.4N, 18.8E), Sweden, with an exposure time of about 2 seconds and a sampling rate of about 10 seconds. In addition to these optical data, geomagnetic field data from the IMAGE magnetometer chain were also available.

The propagation speed of these vortices was approximately 3 to 10 km/s at 100 km altitude. The ionospheric equivalent current system accompanied by the aurora vortices indicated a two-vortex structure. By applying tomographic inversion analysis to the events, we also obtained 3D distributions of volume emission rate and ionospheric electron density, as well as horizontal distribution of auroral precipitating electrons. It is also possible to estimate horizontal distribution of the ionospheric conductivity from the electron density distribution at every 10-second interval. In the presentation we will discuss the magnetosphere - ionosphere coupling process of the aurora vortices and the relationship with the omega bands that are generally observed in the post-midnight sector.

キーワード: オーロラ, トモグラフィ, サブストーム, 渦構造, イメージャ, 電離圏電流系
Keywords: aurora, tomography, substorm, vortex structure, imager, ionospheric current

新開発偏光分光イメージャによる酸素原子 630nm オーロラの偏光観測 Observation of 630 nm auroral polarization with a newly-developed imaging spectrograph

高崎 慎平^{1*}; 坂野井 健¹; 鍵谷 将人¹
TAKASAKI, Shimpei^{1*}; SAKANNOI, Takeshi¹; KAGITANI, Masato¹

¹ 東北大学・惑星プラズマ大気研究センター
¹PPARC, Tohoku University

近年の直線偏光子とフォトメータを組み合わせた極冠域 (磁気緯度 75 度) ポーラーレイン降下電子による酸素原子 630nm のオーロラ発光の観測結果から磁力線平行方向に 2-7 % 程度の直線偏光が生じていることが示唆された [Lilensten et al., 2013]。しかしながら、この研究は高緯度地域の十数例の限られた観測である。一方、理論的にも降下電子エネルギーやピッチ角分布に対応し、630nm 発光が最大で 17 % 偏光する可能性が示唆されている [Bommier et al., 2011]。オーロラ偏光観測をオーロラ帯やサブオーロラ帯における活発なオーロラの偏光特性を調べることを目的とし、我々はオーロラ偏光度を直線偏光 1% 程度の精度で測定することを可能とする装置を開発した。我々は今年の観測データから、磁力線平行方向に 2-4% の直線偏光が生じ、偏光度は視線が磁力線に対し垂直方向で最も大きく平行方向で最も小さいという結果が得られた。しかしながら、この観測では 10cm 口径と比較的小口径のガラスドームを用いたためゴーストが生じこれによる偏光度の誤差を取り除くことが困難であった。よって今回の観測では 45cm 口径のアクリルドームを用いた。しかし、アクリルドームはガラスに比べて温度変化によって変形しやすく、ドームは固定されているため加わる応力が変化することによって、偏光特性が非一様に変化し、無視できない誤差を生む要因となりうる。また、オーロラのような比較的微弱光に対し、直線偏光 1% の高精度で行うためには、ドームだけでなく光学パス内のすべてのユニット、すなわち装置内部の光学系の偏光校正を厳密に行う必要がある。

そこで、今回の観測装置については、装置の偏光特性を取り除くために 630nm オーロラだけでなく、四重極放射であり偏光されていないとされる 557.7nm オーロラを同時に観測でき、かつ磁力線との角度依存性も同時に捉えられるように、磁気子午線に沿った視野を持つ分光イメージャを新たに開発した。この装置の視野は 130 度、波長範囲は 420nm-680nm である。偏光については直線偏光子をステージに装着し回転させる機構を使用して偏光特性を得ている。

この新開発の偏光分光イメージャは、2013 年 11 月末にアラスカ・ポーカーフラットの設置され、それ以降 2014 年 4 月はじめまで連続自動運用されている。設置時に行った偏光キャリブレーションについて、先述のドームに起因する偏光特性の変化を取り除くため、気温や風速が異なる様々な状況下で LED と直線偏光子を組み合わせた偏光度 100 % の光を異なる 7 方向からドームに入射することでドームの偏光特性を調べた。その結果、偏光度はほとんど変化せず、変更方向も測定誤差程度の変化しか生じなかった。よって偏光特性は気温や圧力の変化に対してほとんど依存しないことが確認された。

これまでの観測データから、630nm のオーロラに対して、偏光度 10 % 程度の偏光を得ることができた。また、偏光度・偏光方向どちらにも角度依存性が存在することが確認された。しかし、偏光されていないはずの 557.7nm のオーロラについても同様に 7% 程度の偏光が得られた。こちらに関しても 630nm のオーロラと同様の角度依存性が確認できた。このことから、発光領域から観測されるまでの経路上で、大気中の粒子による散乱をはじめとした、共通の偏光過程を経ている可能性が示唆される。本発表では、今回の観測で得られたこれらの結果を報告する。

キーワード: オーロラ, 偏光観測
Keywords: aurora, polarimetry

偏光観測装置の開発と酸素原子 630nm オーロラ偏光分布の観測 Development of polarization photometer and observation of OI 630 nm auroral polarization

門司 浩幸^{1*}; 鍵谷 将人¹; 坂野井 健¹
MONJI, Hiroyuki^{1*}; KAGITANI, Masato¹; SAKANOI, Takeshi¹

¹ 惑星プラズマ大気研究センター, 東北大学
¹PPARC, TOHOKU Univ.

速度異方性を持つ降下電子との衝突によるオーロラ発光の場合、四重極放射である酸素原子 557.7nm のようなある特定の遷移に制限されたものを除き、偏光することが示唆されている [Lilensten et al., 2006]。ただし、オーロラ発光領域は完全衝突大気ではなくかつ無衝突大気でもない中間衝突状態であるため、発光の偏光を理論的に見積もることが困難であった。近年の地上観測から、酸素原子 630nm オーロラ発光が 1-4 %の直線偏光度を示し、その値がオーロラ活動とともに変動していること、視線方向と磁力線との角度が垂直な向きで、最大の直線偏光度が観測されることが示された [Lilensten et al., 2008, Barthelemy et al., 2011]。これは、オーロラ偏光から新たな物理量推定 (降下電子の速度異方性等) ができる可能性を示唆している。

本研究はオーロラ偏光度を測定する観測装置を新たに開発し、校正方法を含めた偏光観測の手法を確立させ、観測的にオーロラの偏光度の分布を導出することを目的とする。

本研究では、回転ステージにマウントされた水晶 5 / 8 λ 波長板と偏光ビームスプリッターを用いて偏光の成分 (ストークスベクトル) を測定する偏光フォトメータを開発した。波長選択は固定で、630nm 狭帯域干渉フィルターにより酸素原子 630nm 発光輝線のみ測定した。視野は約 3 度である。酸素原子 630nm オーロラの偏光観測は米国アラスカ州ポーカーフラットにて 2013 年 1 月に約 3 週間実施された。実際の観測時には、一つの水晶波長板のポジションで 2s の露出を行い、これを 9 ポジション行って 1 つの偏光データセットを得た。したがって、時間分解能は約 30 秒である。また、ポーカーフラットにおいて、直線偏光子と LED 光源を組み合わせた校正光源をもちいたキャリブレーションを実施した。この 1 偏光データセットと校正光源データを組み合わせて、酸素オーロラ発光の直線偏光成分と円偏光成分を見積もった。とくにオーロラの円偏光成分の導出は世界で初めてである。

この結果、1 月 17 日では 14:00 UT 付近で全天に広がるオーロラを観測し、オーロラ偏光度の磁力線との角度の依存性が明らかになった。すなわち、視線が磁力線と平行な向きで偏光度が大きくなるという結果が得られた。これは過去の研究成果と異なる結果であり、現在解釈を進めている。一方、1 月 18 日には、オーロラの強度が上昇した 11:30 UT 付近で、直線偏光度が 4% から 8% に突然上昇するイベントを観測した。このことは、オーロラ活動に伴い降下電子速度異方性が変化したことを示唆する。

キーワード: オーロラ地上観測, 偏光

Keywords: aurora ground observation, polarization

昼間電離圏の電気伝導度比 Approximate formula of daytime ionospheric conductance ratio

家田 章正^{1*}; 大山 伸一郎¹; 藤井 良一¹; 中溝 葵²; 堀 智昭¹; 吉川 顕正³; 西谷 望¹
IEDA, Akimasa^{1*}; OYAMA, Shin-ichiro¹; FUJII, Ryoichi¹; NAKAMIZO, Aoi²; HORI, Tomoaki¹; YOSHIKAWA, Akimasa³
; NISHITANI, Nozomu¹

¹ 名古屋大学 太陽地球環境研究所, ² Finnish meteorological institute, ³ 九州大学
¹ STEL, Nagoya University, ² Finnish meteorological institute, ³ Kyushu University

本研究では、地球の昼間電離圏における、高度積分した電気伝導度の、太陽天頂角 (SZA) 依存性を調べた。特に、ペダーセン伝導度に対するホール伝導度の、比について近似式を理論的に得た。式の検証には、トロムソ (67 MLAT) の EISCAT レーダー観測を用いた。観測は、地磁氣的に静穏な、2012年3月30日に行われた。

電気伝導度は電子密度に依存している。昼間の電離圏電子は、太陽の極端紫外線による、中性大気電離を生成源としている。このような電子の密度は、特に E 層では Chapman 理論により近似されることが多い。従って、電気伝導度のモデルには、Chapman 理論が何らかの形で含まれていることが自然である。しかし、過去の研究においては、伝導度の SZA 依存性が、Chapman 理論による最大電子密度とコンシステントなモデルや、矛盾するモデルの両方が提唱されている。

本研究では、ペダーセン伝導度は、Chapman 理論を修正すれば、観測とコンシステントであることを見出した。そのような修正は、E 層の topside では垂直方向に電子密度が一様であると近似すること、また、中性大気温度が高高度ほど高くなる効果を取り入れることである。SZA が大きくなるほど、つまり夜に近づくほど、伝導度は小さくなるが、この変化は、ペダーセン伝導度よりも、ホール伝導度の方が大きかった。これは、SZA が大きいほど、ホール層が薄くなるからであると理解される。このために、SZA が大きいほど、ペダーセン伝導度に対するホール伝導度の比は小さくなる。この効果を、Chapman 理論における最大電子生成高度により表現し、電気伝導度比の近似式を作成した。

キーワード: 電離圏電気伝導度, 電離圏, 電気伝導度, 欧州非干渉散乱レーダー

Keywords: ionospheric conductivity, ionosphere, conductance, EISCAT, incoherent scatter radar

EISCAT レーダーを用いた電離圏トラフ境界周辺の電子密度の時間変動の研究 Temporal variation of electron density in the vicinity of the ionospheric trough

石田 哲朗^{1*}; 小川 泰信²; 門倉 昭²; 細川 敬祐³; 大塚 雄一⁴

ISHIDA, Tetsuro^{1*}; OGAWA, Yasunobu²; KADOKURA, Akira²; HOSOKAWA, Keisuke³; OTSUKA, Yuichi⁴

¹ 総合研究大学院大学, ² 国立極地研究所, ³ 電気通信大学, ⁴ 名古屋大学

¹The Graduate University for Advanced Studies, ²National Institute of Polar Research, ³The University of Electro-Communications, ⁴Nagoya University

本研究の目的は、トラフ内部や境界付近で観測される電子密度の時間変動を調査し、地磁気活動度の違いによる特徴の変化やその原因を理解することである。

Basu et al. [2008] は、磁気嵐の主相に Subauroral Polarization Stream (SAPS) が中緯度トラフの赤道側境界付近で強まり、同時にトラフが経度方向に拡大する様子を GPS-TEC map により観測的に示した。また、このような状況でトラフ内外に形成されるイレギュラリティにより GPS 衛星の測位精度が落ちることが知られている。

本研究では、数分程度の時間スケールの電子密度の構造を研究することにより、トラフ内外に形成されると考えられるイレギュラリティについて理解を深める。そのために、2013 年 10 月~12 月にかけて EISCAT の特別実験（1 スキャン 60 秒~80 秒の磁気子午面の高速スキャン観測）を実施し、SAPS 等の対流の効果によりトラフの電子密度が変化すると考えられている夕方側から夜側の時間帯（1630-2030 MLT）のトラフを観測した。この特別実験により、擾乱時のイベント 2 つと静穏時のイベント 7 つの合計 9 つのイベントを取得した。

本研究では、上記の特別実験で得られた計 9 イベントについて、（1）トラフの内部と外側では電子密度の変動にどのような違いがあるか、（2）トラフの境界付近の電子密度の変動にどのような特徴があるか、に着目し解析を進めている。初期解析の結果明らかになった特徴を以下にまとめる。当日は、以下の事柄を踏まえて新たに分かったトラフの特徴を紹介する予定である。

1. トラフの外側では 5~40 分の準周期的な変動が確認できた。この準周期的な変動は時間や高度により変化することが分かった。一方で、トラフの内側では準周期的な変動はほとんど見られなかった。これら特徴は地磁気活動度によらないことも分かった。

2. トラフの境界付近で観測された 5~10 分の準周期的な変動は、静穏時では高度方向に周期性が保たれるが、擾乱時では周期性が保たれないことが分かった。

キーワード: 電離圏, トラフ
Keywords: ionosphere, trough

SuperDARN 北海道-陸別 HF レーダーで観測されたサブオーロラ帯高速流の分類及び発生特性 Classification and occurrence characteristics of subauroral rapid plasma flows observed by SuperDARN Hokkaido HF radar

永野 浩貴^{1*}; 西谷 望¹; 堀 智昭¹
NAGANO, Hiroki^{1*}; NISHITANI, Nozomu¹; HORI, Tomoaki¹

¹ 名大 STE 研

¹STEL, Nagoya Univ.

オーロラ発光領域の低緯度側で発生する高速電離圏対流は一般的に Sub-Auroral Polarization Stream(SAPS) と呼ばれている。SAPS についての先行研究として、Kataoka et al. (Ann. Geophys., 2009) では、北海道-陸別 HF レーダーで 2006 年 12 月から 2008 年 4 月までの期間に観測したサブオーロラ帯高速流について発生特性を議論している。Ebihara et al. (J. Geophys., 2009) では静止衛星によって観測したプラズマシートの密度の変化と SAPS の発生の関係性をシミュレーションを用いた結果との比較により述べている。しかしながら、ストームやサブストームがどの程度強く影響するか等、SAPS の発生特性の詳細については現在においてもいまだに明らかにされていない。

我々は 2006 年 11 月より稼働している SuperDARN 北海道-陸別 HF レーダーを用いて、サブオーロラ帯高速流イベントの発生状況・特性と SYM-H、AL 指数、IMF Bz 等との関連性を調査している。現状では、SAPS はサブストームの回復相によく見られるということや、発生する緯度は Dst 指数の増減に依存しているという傾向が明らかになっているが、上記レーダーは稼働開始以来連続して稼働しており、長期にわたるデータ解析が可能である。また、西向きフローを同定する条件で用いた発生磁気緯度や、西向きの速度についても従来の研究より広くとることで、より広い意味でのサブオーロラ帯西向きフローについての調査を行った。フローにはオーロラ帯のものとサブオーロラ帯のものがあるが、NOAA 衛星の TED データと比較することにより明確にサブオーロラ帯にあるフローを選別し、解析を行った。その結果、緯度と SYM-H の関係において西向き速度 150m/s~200m/s を閾値として区切ることで 2 つの異なる性質を持つ集団を区別することが出来た。閾値より速いものは発生緯度と SYM-H の増減に依存性が見られ、閾値より遅いものは依存性が見られなかった。AL 指数と発生緯度の関連性についても同様に速度によって区切ることで依存性の有無があるという結果が得られた。

本講演においては、サブオーロラ帯高速流の緯度、速度と AL 指数や Dst 指数との依存性の調査をフェーズ別で行うなど、各パラメータとの関連性のより詳細な解析結果並びにその解釈について報告する予定である。

キーワード: SAPS, SuperDARN

上部電離圏における MF/HF 帯電波放射帯域の磁気緯度・磁気地方時依存性
Magnetic latitude and MLT dependence of the bandwidth of MF/HF auroral radio emissions in the topside ionosphere

酒井 将隆^{1*}; 熊本 篤志¹; 加藤 雄人¹; 佐藤 由佳²
SAKAI, Masataka^{1*}; KUMAMOTO, Atsushi¹; KATOH, Yuto¹; SATO, Yuka²

¹ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ² 国立極地研究所
¹Department of Geophysics, Tohoku University, ²National Institute of Polar Research

In the ionosphere, auroral radio emissions are generated by precipitating auroral particles. Previous studies reported that the MF/HF auroral radio emissions emitted from the bottomside ionosphere were observed on the ground. The narrowband emissions are called auroral roar, and the broadband emissions are called MF burst. On the other hand, Sato et al. [2010] showed the spectrum and polarization of two events of MF/HF radio emissions observed in the topside ionosphere by the Akebono satellite. Based on the event studies, they suggested that the observed narrowband emissions are generated by the mode conversion of UHR waves enhanced in the auroral ionosphere where the upper hybrid frequency matches the harmonics of the electron cyclotron frequency as suggested for generation mechanism of the auroral roar observed on the ground [Weatherwax et al., 1995; Yoon et al., 1998; Weatherwax et al., 2002].

In this study, we have focused on broadband emissions observed in the topside ionosphere which are similar with broadband MF burst observed on the ground. We analyzed MF/HF broadband emissions (with wider bandwidth of >0.5 kHz) observed by the Akebono satellite. Because it is difficult to observe broadband emissions on the ground and in the topside ionosphere at the same time, we have performed statistical analysis. We found that the bandwidth of the MF/HF emissions was larger in the high latitude and in the dusk side. The bandwidth of the MF/HF emissions was greater than 1 MHz in higher geomagnetic latitude than 70 degree in the sector from 12 to 24 MLT. Previous studies suggested that the MF bursts observed on the ground were generated by the mode conversion of upper hybrid waves stimulated by the energetic auroral electrons [e.g. Sato et al., 2008]. Therefore, we can expect that the bandwidth of MF bursts depend on the generation processes of upper hybrid waves, mode conversion processes of upper hybrid waves, and propagation processes of converted electromagnetic waves in the auroral ionosphere.

CIR 通過に伴う Pc 5 波動特性の時間変動 Time Variability of Characteristics of Pc5 during Passage of CIRs

北村 健太郎^{1*}; 才田 聡子²; 田中 良昌³; 門倉 昭³; 山岸 久雄³
KITAMURA, Kentarou^{1*}; SAITA, Satoko²; TANAKA, Yoshimasa³; KADOKURA, Akira³; YAMAGISHI, Hisao³

¹ 徳山工業高等専門学校, ² 統計数理研究所, ³ 国立極地研究所

¹Tokuyama college of Technology, ²The Institute of Statistical Mathematics, ³National Institute of Polar Research

In this study, we analyzed the magnetic data observed at the high-latitude magnetic stations in Antarctica, H057 (-66.42, L=6.25), and Skallen (-66.42) to compare with the >2MeV electron flux observed by GOES 10 satellite. The pair of stations is located at the same latitude and within 1.7 degrees in longitude, which are quite suitable to estimate the azimuthal wave number.

We statistically analyzed the wave characteristics of the Pc5 pulsations by the superposed epoch (SPE) analysis for 14 magnetic storm events caused by the passage of CIRs (Corotating Interaction Region). The epoch time is defined as days from the passage of the stream interface (SI) of the CIR. The Pc5 power suddenly increases at 3-6 MLT sector from 0 day which is much stronger than that at dusk sectors. During 1-2 days, which is correspond to the recovery phase of the storms, the Pc5 power at the afternoon sectors (12-21 MLT) increases with the peak frequency of 2.5-3 mHz, whereas the Pc5 power at the morning sector does not become stronger.

On the other hand, the phase delay between the Pc5s at H057 and SKAL also shows the local time dependence especially during the epoch time of 1-2 day. At the noon and afternoon sectors, the Pc5 shows the eastward propagation and the phase lags between H057 and SKAL are less than 5 seconds. In contrast, at the morning sector, the Pc5 shows westward propagation with small azimuthal wave numbers.

These features indicate that the sources and generation mechanisms of Pc5 in the two periods (0-1 day and 1-2 day) are quite different. The premiere intensification of the Pc5 corresponds to the main phase of the moderate magnetic storm and can thought to be the forced oscillation caused by the strong disturbance of the solarwind dynamic pressure. In this case, the local time dependence of the phase structure does not show the obvious regularities. In the latter intensification of the Pc5 corresponds to the recovery phase of the storm (1-2 days). The westward (eastward) propagation at the morning (afternoon) sector and local time distribution of the Pc5 power could well correspond with the previous perception which could explain the Pc5 pulsations caused by the KH instability on the magnetopause.

The present result implies that the difference of the wave characteristics of Pc5s closely related the drift bounce resonance with the relativistic electrons. The drift bounce resonance might occur at the afternoon sector during the recovery phase of the moderate magnetic storm by the KH instability due to the passage of the high speed solar wind.

キーワード: 放射線帯, ULF 波動

Keywords: Raadiation Belt, ULF wave

ミラー磁場中のアルベン波動の自発励起とイオンとの相互作用 Spontaneous excitation of Alfvén waves and their interactions with high-energy ions in a magnetic mirror configuration

市村 真^{1*}; 池添 竜也¹
ICHIMURA, Makoto^{1*}; IKEZOE, Ryuya¹

¹ 筑波大学プラズマ研究センター
¹ Plasma Research Center, Univ. of Tsukuba

In laboratory fusion plasmas, high-energy ions are produced with DD and DT fusion reactions and are also created with high-energy neutral beam injection and electromagnetic waves for plasma heating. Special emphasis is given to plasma waves excited by such high-energy ions and their interactions with particles. For example, energetic alpha particles produced with DT fusion process can interact resonantly with shear Alfvén waves during slowing-down process, and excite plasma instabilities, that is, so-called Alfvén eigenmodes (AEs). Recently, enhancement of energetic ion transport caused by these instabilities has been remarked on its deleterious effects. When a small fraction of alpha particles is transported to the first wall in burning plasma devices, plasma facing materials can be damaged seriously. Many kinds of the experimental observations related to such wave-particle interactions are reported. In this report, spontaneously excited waves in Ion Cyclotron Range of Frequency (ICRF) and their interactions with high-energy ions in a mirror magnetic field configuration are presented.

The ICRF waves are frequently used for the plasma heating in laboratory fusion devices with the mirror magnetic field configuration. When the ICRF power and consequent wave energy levels are increased, it will become important to understand the detailed physics of wave-wave and wave-particle interactions. It is required to consider both linear and nonlinear processes for deposition of ICRF powers. In the ICRF heating experiments on the GAMMA 10 tandem mirror, the maximum ion temperature in the perpendicular direction has reached 10 keV and the temperature anisotropy (which is defined as the temperature ratio of perpendicular to parallel to the magnetic field line) becomes more than 10 in the central cell. Alfvén-ion-cyclotron (AIC) waves are spontaneously excited owing to such the strong temperature anisotropy. The excitation of the AIC wave is one of the common physical phenomena in space plasmas with an anisotropic velocity distribution. High energy ions, of which energy is more than 50 keV, have been observed along the magnetic field line at the open end of the mirror magnetic field configuration. The transport of high-energy ions along the magnetic field line owing to the loss processes other than the classical Coulomb scattering has been suggested. The existence of considerable energy transport along the magnetic field line owing to the AIC waves is discussed theoretically. The AIC waves in GAMMA 10, which has several discrete peaks in the frequency spectrum, are excited as eigenmodes. Their spatial structures are measured with a microwave reflectometer inside the plasma and magnetic probes in the peripheral region. Low-frequency fluctuations around 0.1 MHz, which is a differential frequency between discrete peaks of the AIC waves, are observed in the central cell. These fluctuations are also observed in the high-energy ion signal detected by a semiconductor detector installed at the end for measuring ions along the magnetic field line. Pitch angle scattering in the velocity space owing to the spontaneously excited Alfvén waves are indicated. The radial transport of high-energy ions owing to the low-frequency MHD instability has been observed, however, the transport across the magnetic field line owing to the AIC waves has not yet been detected.

Observations of spontaneously excited waves in ICRF in the large tokamak experiments are also reported as Ion Cyclotron Emissions (ICE). The fluctuations in ICRF are driven by the presence of non-thermal ion distribution in magnetically confined plasmas and plasmas with the strong anisotropy. Waves owing to fusion products of ³He and T ions are clearly detected in D-plasma and alpha particles in DT-plasma experiments.

キーワード: ミラー磁場, アルベン波動, 波動-粒子相互作用, アルベンイオンサイクロトロン波動
Keywords: magnetic mirror configuration, Alfvén wave, wave-particle interaction, Alfvén Ion Cyclotron wave

電磁イオンサイクロトロン波動による非線形波動粒子相互作用 Nonlinear wave particle interaction of electromagnetic ion cyclotron wave

小路 真史^{1*}; 大村 善治²

SHOJI, Masafumi^{1*}; OMURA, Yoshiharu²

¹名古屋大学太陽地球環境研究所, ²京都大学生存圏研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Spacecraft observations and simulations show generation of coherent electromagnetic ion cyclotron (EMIC) triggered emissions with rising-tone frequencies. In the inner magnetosphere, the spontaneously triggered EMIC waves are generated by the energetic protons with large temperature anisotropy. We reproduced EMIC triggered emissions in the Earth's magnetosphere by real scale hybrid simulations with cylindrical magnetic geometry. We perform parametric analyses of electromagnetic ion cyclotron (EMIC) triggered emissions on the gradient of the non-uniform ambient magnetic field using a hybrid simulation. According to nonlinear wave growth theory, as the gradient of the ambient magnetic field becomes larger, the theoretical threshold of the wave amplitude becomes larger although the optimum wave amplitude for nonlinear wave growth does not change. With a larger magnetic field gradient, we obtain coherent rising tone spectra because the triggering process of the EMIC triggered emission takes place only under the limited condition of the wave amplitude. On the other hand, with a smaller magnetic field gradient, triggering of the emissions can be caused with various wave amplitudes, and then the sub-packets are generated at various locations at the same time. The concurrent triggerings of emissions result in incoherent waves, observed as "broadband" EMIC bursts. Broadband emissions induce rapid precipitation of the energetic protons into the loss cone since the scattering by the concurrent triggering takes place faster than that of the coherent emissions. The coherent triggered emission causes efficient proton acceleration around the equator because of the stable particle trapping by the coherent rising tone emission.

Keywords: triggered emission, electromagnetic ion cyclotron wave, wave particle interaction, acceleration, scattering

太陽高エネルギー粒子のスペクトル：加速域と観測域で違いはあるのか？ Solar energetic particle spectrum at the Sun and the Earth

久保 勇樹^{1*}
KUBO, Yuki^{1*}

¹ 情報通信研究機構

¹National Institute of Information and Communications Technology

比較的高エネルギーの高い太陽高エネルギー粒子は、太陽フレアやコロナ中の衝撃波で加速されていることが良く知られており、特にコロナ中の衝撃波での加速機構は1次のフェルミ加速であると考えられている。フェルミ加速の理論では加速された粒子は冪分布となり、その冪指数は衝撃波の圧縮率で決まっている。太陽高エネルギー粒子のスペクトルは観測的にも良く調べられており、観測されるスペクトルはほぼ冪分布（+高エネルギー側での指数関数的な減少）で良く再現される。これは一見当然の結果であるように見えるが、観測されるスペクトルは、観測場所でのスペクトルであり加速領域のスペクトルではなく、これらのスペクトルが同じであるかどうかは自明ではない。多くの観測から、Ground Level Enhancement(GLE)のスペクトルの冪指数は典型的にはおおよそ6であると言われているが、もしこれが加速域でのスペクトルであるとするならば、フェルミ加速の理論から衝撃波の圧縮率はおおよそ1.6となり比較的弱い衝撃波であり、陽子を短時間でGeVエネルギーにまで加速するのは難しいかもしれない。また、フェルミ加速の理論から予想されるスペクトルは定常状態のスペクトルであるが、多くの研究から衝撃波で加速される粒子のスペクトルは時間発展をすることが分かっている。これもまた、加速域と観測域での異なったスペクトルを示唆する。本研究では、太陽高エネルギー粒子のスペクトルに加速域と観測域で違いがあるのかについて、太陽から地球までの太陽高エネルギー粒子の輸送過程をシミュレーションすることで調べる。

キーワード: 太陽高エネルギー粒子, スペクトル
Keywords: Solar energetic particles, Spectra

GEMSIS-RCモデル:ドリフト運動論近似に基づく地球内部磁気圏における高エネルギー粒子とULF波動の相互作用の研究 Coupling between ULF waves and high-energy particles in the inner geomagnetosphere based on a drift-kinetic simulation

関 華奈子^{1*}; 天野 孝伸²; 齊藤 慎司³; 三好 由純¹; 桂華 邦裕¹; 宮下 幸長¹; 松本 洋介⁴; 梅田 隆行¹; 海老原 祐輔⁵
SEKI, Kanako^{1*}; AMANO, Takanobu²; SAITO, Shinji³; MIYOSHI, Yoshizumi¹; KEIKA, Kunihiro¹; MIYASHITA, Yukinaga¹; MATSUMOTO, Yosuke⁴; UMEDA, Takayuki¹; EBIHARA, Yusuke⁵

¹名古屋大学太陽地球環境研究所, ²東京大学大学院理学系研究科, ³名古屋大学大学院理学研究科, ⁴千葉大学大学院理学研究科, ⁵京都大学生存圏研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Graduate School of Science, University of Tokyo, ³Graduate School of Science, Nagoya University, ⁴Graduate School of Science, Chiba University, ⁵Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Understanding of acceleration mechanisms of electrons to cause drastic variation of the Earth's outer radiation belt is one of outstanding issues of the geospace researches. While the radial diffusion of the electrons driven by ULF waves has been considered as one of the candidate mechanisms, efficiency of the mechanism under realistic ULF characteristics and distribution is far from understood. GEMSIS (Geospace Environment Modeling System for Integrated Studies) of STEL, Nagoya University, is the observation-based modeling project for understanding energy and mass transportation from the Sun to the Earth in the geospace environment. The GEMSIS-Magnetosphere working team has developed a new physics-based model for the global dynamics of the ring current (GEMSIS-RC model). The GEMSIS-RC model is a self-consistent and kinetic numerical simulation code solving the five-dimensional collisionless drift-kinetic equation for the ring-current ions in the inner-magnetosphere coupled with Maxwell equations. In contrast to previous ring current models assuming a force-balanced equilibrium, the new model allows the force-imbalance to exist, which generates induced electric field through the polarization current. The most prominent advantage of the new model is the capability of describing fast time scale phenomena such as injections during substorms and MHD-time scale (ULF) waves.

We applied the GEMSIS-RC model for simulation of global distribution of ULF waves. Comparison between runs with/without ring current ions show that the existence of hot ring current ions can deform and amplify the original sinusoidal waveforms. The deformation causes the energy cascade to higher frequency range (Pc4 and Pc3 ranges). The cascade is more pronounced in the high beta case. It is also shown that the existence of plasmopause strengthens ULFs outside the plasmopause and widens the MLT region where the E_r (toroidal) component is excited from initially-given E_{ϕ} (poloidal) component. We also report the basic characteristics of the ring current driven ULF waves and its effects on the electron transport in the inner magnetosphere.

キーワード: ドリフト運動論近似, リングカレント, 放射線帯, MHD 波動, 内部磁気圏, ドリフト共鳴

Keywords: drift-kinetic approximation, ring current, radiation belt, MHD wave, inner magnetosphere, drift resonance

Langmuir turbulence中を運動する相対論的電子からの放射スペクトル Radiation spectra from relativistic electrons moving in a Langmuir turbulence

寺木 悠人^{1*}
TERAKI, Yuto^{1*}

¹ 大阪大学→理化学研究所
¹ Osaka University / RIKEN

3次元等方Langmuir turbulence中を運動する相対論的電子からの放射スペクトルを第一原理的な数値的手法を用いて調べた。高エネルギー天体の相対論的な衝撃波領域では2流体不安定によりLangmuir turbulenceが励起されうるが、その領域で加速された電子の放射スペクトルに与える影響については完全には分かっていない。Langmuir turbulenceのパラメータとしては強度 E 、時間変動のスケール ω 、空間的なスケール λ がある。それらを用いて表される強度パラメータと振動パラメータがその中運動する電子からの放射スペクトルを特徴づける。強度パラメータ a は $eE\lambda/mc^2$ 、振動パラメータ b は $\lambda\omega/c$ と表される。ここで e は素電化、 m は電子質量、 c は光速である。放射スペクトルの特徴を様々な a と b について調べた。計算手法は以下の通りである。フーリエモードの重ね合わせで乱流を生成し、電子を注入する。運動方程式を解くことで得た情報からリエナール=ヴィーヘルトポテンシャルを用いて放射スペクトルを計算する。結果として a - b 平面上にどのようにスペクトルの特徴が分布するか明らかにした。その中で先行研究では曖昧だった $a > b > 1$ の領域のスペクトル形状はシンクロトロンと良く似たものであることを明らかにした。その解析的解釈から、スペクトルを特徴付ける機構はウィグラーと類似していることを見だし、この $a > b > 1$ の放射機構を「Wiggler Radiation in Langmuir turbulence」と名付けた。また、天体の衝撃波領域では $a \approx b \approx 1$ が期待される。ピーク振動数よりも低振動数領域のスペクトル指数はその領域で様々な値をとる。この結果と天体の観測結果との比較についても議論する。

キーワード: 放射機構, 相対論的粒子, 乱流電磁場
Keywords: Radiation mechanism, Relativistic particle, Turbulent electromagnetic field

AMATERAS で観測された太陽電波バーストのスペクトル微細構造とその生成機構 Fine Spectral Structures and Their Generation Mechanisms for Solar Radio Bursts Observed by AMATERAS

岩井 一正^{1*}; 三好 由純²; 増田 智²; 土屋 史紀³; 森岡 昭³; 三澤 浩昭³

IWAI, Kazumasa^{1*}; MIYOSHI, Yoshizumi²; MASUDA, Satoshi²; TSUCHIYA, Fuminori³; MORIOKA, Akira³; MISAWA, Hiroaki³

¹ 国立天文台 野辺山太陽電波観測所, ² 名古屋大学 太陽地球環境研究所, ³ 東北大学 惑星プラズマ・大気研究センター
¹Nobeyama Solar Radio Observatory, NAOJ, ²STEL, Nagoya University, ³PPARC, Tohoku University

コロナ中の粒子加速現象によって非熱的に加速された電子の一部は、メートル波帯域において電波放射を起こす。メートル波太陽電波バーストには1秒未満の継続時間を持つスペクトル微細構造が多く存在することが知られている。これらは非熱的粒子が生成され電波を放射するまでの様々なプラズマ素過程において、プロセスの不均一性によって変調を受けた影響と考えられ、太陽コロナを舞台に粒子加速や波動粒子相互作用といったプラズマ素過程を議論するうえで重要な観測対象である。

本研究では、太陽電波望遠鏡 AMATERAS の超高分解分光観測により、メートル波太陽電波バーストの一種である I 型バーストのスペクトル微細構造の観測に成功した。更にバーストのスペクトル構造を分解するための解析アルゴリズムを開発し、個々のバーストの最大強度、継続時間、放射帯域幅の全てを分解することに成功した。その結果、バーストの最大強度はべき乗分布し、そのべきは 2.9-3.3 と、通常のフレア比ベソフな傾きを有していた。一方で、継続時間、放射帯域幅は指数関数的に分布していた。バーストの最大強度、継続時間、放射帯域幅間の相関関係を調べた結果、これら 3 つのパラメータは互いにほぼ無相関であることが分かった。一方、個々のバーストの強度の時間変化率を成長率と定義し、成長率と最大強度の相関を調べた結果、強い相関関係があることを発見した。以上の結果は、放射の種となる非熱的粒子が生成された後、静電波の励起過程、電波の放射過程、伝搬過程で変調を受けた結果が I 型バーストのスペクトルに反映されていると考えることで説明できる。連続して放射されるバーストの成長率は時間変化し、その変化の時定数はコロナ環境の変化の時定数に対して著しく大きかった。よって電波の放射源にはプラズマ環境の連続的な変化があり、そこからさまざまな成長率のバーストが同時多発的に放射され、それらが重なり合って観測されたと考えられる。

キーワード: 太陽, 太陽電波, コロナ, 波動粒子相互作用, 電波放射過程

Keywords: Sun, Solar radio burst, corona, wave-particle interaction, radio emission processes

平行衝撃波での上流波と粒子加速の共進現象 Co-evolution of upstream waves and accelerated particles around parallel shocks

杉山 徹^{1*}; 藤本 正樹²
SUGIYAMA, Tooru^{1*}; FUJIMOTO, Masaki²

¹ 海洋研究開発機構, ² 宇宙航空研究開発機構
¹JAMSTEC, ²JAXA

We have investigated the co-evolution of upstream waves and the accelerated particles around the parallel shock. Hybrid particle simulations are performed in the exactly parallel shock configuration with Mach number of ~ 10 . The upstream waves convecting into the shock surface contribute the particles acceleration as reported in Sugiyama et al. (2001). The appropriate wave-length exists for the particle energization, that is, the longer wave-length wave leads the higher energy particles. Simultaneously, the higher energized particles excite the longer wave-length waves in the upstream region. Here we report that the higher energy particles and longer wave-length waves are observed as the time elapses later in the simulation runs. Therefore, the present process is "co-evolution" of the upstream waves and accelerated particles.

キーワード: 無衝突衝撃波, 粒子加速, 波動粒子相互作用

Keywords: collisionless shock, particle acceleration, wave-particle interaction

近接・衝突する二つの斜め衝撃波：衝撃波構造、粒子加速 Colliding Two Oblique Shocks: Shock Structures and Particle Acceleration

中野谷 賢^{1*}; 松清 修一¹; 羽田 亨¹
NAKANOTANI, Masaru^{1*}; MATSUKIYO, Shuichi¹; HADA, Tohru¹

¹ 九大総理工

¹ ESST, Kyushu univ.

プラズマ中に発生する無衝突衝撃波（以下、衝撃波）は高エネルギー粒子を効率よく生成すると考えられている。その加速機構を明らかにするために多くの研究がなされてきたが、従来議論はどれも単一の衝撃波を仮定しており、複数の衝撃波による加速はほとんど考えられてこなかった。実際、宇宙には衝撃波が普遍的に存在しており、衝撃波同士が接近・衝突することは頻繁に起こる。例えば、コロナ質量放出により生じた衝撃波が地球の磁気圏衝撃波に衝突したり [H. Hietala et al., 2011]、惑星間空間衝撃波が太陽圏終端衝撃波を横切ることが観測されている [J. Y. Lu et al., 1999]。これらの現象において、衝撃波構造の変化や粒子の加速・加熱などの物理過程は未解明である。

衝撃波同士の衝突過程を議論したプラズマ運動論的数値実験としては、過去にハイブリッド計算による例があり [Cargill et al., 1986]、超臨界衝撃波同士の衝突において効率的な粒子（イオン）加速が起こることが報告されている。しかしながら、一般にハイブリッド計算では電子ダイナミクスを解かないため、粒子の初期加速過程に重要な影響を与える可能性のある、衝突前後の衝撃波のマイクロ構造までは正しく再現されない。

そこで、本研究では、1次元 Full-Particle-in-Cell シミュレーションを用いて二つの衝撃波の近接・衝突過程を模擬する。特に、斜め衝撃波同士の衝突において次の3点の結果に注目する。

1. シミュレーションでは、接近しつつある2つの斜め衝撃波上流域で高エネルギー電子が加速された。これらは、二つの衝撃波による反射を繰り返して効率的に加速（フェルミ加速）されており、被加速粒子の一部は、衝撃波衝突時に増幅される磁場や衝突後の衝撃波によってさらに加速されることが分かった。
2. 衝突前において、上流に染み出した電子によって大振幅波動が励起されることが分かった。この波動の励起機構、粒子の伝播や衝撃波構造への影響を議論する。
3. 衝撃波衝突後の下流域でのプラズマの密度や圧力が磁気流体力学 (MHD) により求められる値よりも低いことが分かった。その原因としては高エネルギーの電子が上流に流出したためであると考えられる。また、磁気流体力学で求められる衝突後の衝撃波の物理量（磁場の大きさ、衝撃波の速度 etc.）と PIC シミュレーションの結果との比較を行い、運動論的効果の影響を議論する。

キーワード: 無衝突衝撃波, 複数衝撃波, 粒子加速, 数値実験

Keywords: collisionless shock, multi-shock waves, particle acceleration, numerical simulation

高マッハ数の準平行衝撃波における粒子加速 Particle acceleration in high Mach number quasi-parallel shocks

加藤 恒彦^{1*}
KATO, Tsunehiko^{1*}

¹ 広島大学
¹Hiroshima University

We study particle acceleration process of electrons and protons in high Mach number ($M_A \sim 30$) quasi-parallel collisionless shocks by particle-in-cell (PIC) simulation. We found that a fraction of protons which consist of the plasma are injected into acceleration mechanisms and efficiently accelerated around the shock. The energy spectrum of the accelerated protons becomes power-law like distribution. A part of electrons are also accelerated around the shock although they are roughly two orders of magnitude fewer than the accelerated protons. For both protons and electrons, the acceleration processes are often not diffusive and their time-scales are even shorter than the respective gyration times. We also found that protons reflected at the shock generate circularly polarized Alfvén waves with very large amplitude in the upstream region of the shock and that, because of the strong perpendicular magnetic field of these waves, the structure of the collisionless shock itself is in fact similar to that of quasi-perpendicular shocks.

キーワード: 粒子加速, プラズマ, 無衝突衝撃波
Keywords: particle acceleration, plasma, collisionless shocks

準垂直衝撃波における電子加速の粒子シミュレーション Particle simulations on electron acceleration at Quasi-Perpendicular Shocks

篠原 育^{1*}; 藤本 正樹¹; 中村 琢磨²
SHINOHARA, Iku^{1*}; FUJIMOTO, Masaki¹; NAKAMURA, Takuma²

¹ 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所, ² ロスアラモス国立研究所

¹Institute of Space and Astronautical Science / Japan Aerospace Exploration Agency, ²Los Alamos National Laboratory

We found efficient production of non-thermal electrons up to $\gamma \sim 20$ in results of three-dimensional full kinetic simulations of quasi-perpendicular shocks. The seed acceleration occurs in large-amplitude electromagnetic wave excited in the most front region of the shock foot. A small portion of electrons keeps staying in the foot region due to the scattering by the large-amplitude electromagnetic wave, and these electrons can get energy from the motional electric field in the shock rest frame. Since the large-amplitude electromagnetic wave is only possible in 3-D simulations, no electron acceleration is observed in previous 1-D and 2-D simulations. After the seed acceleration, these electrons can be further accelerated at the shock ramp region by the shock drift acceleration. The acceleration process occurs during the steepest phase of the self-reformation, and the acceleration efficiency depends on the phase of the shock self-reformation. In contrast to the standard Fermi acceleration at quasi-parallel shocks, the electron acceleration process at quasi-perpendicular shocks is much quicker (order of the ion cyclotron period); however, electrons cannot experience effective acceleration again and again so that there would be an energy limitation of the acceleration. In this presentation, we will discuss the energy limit of electron acceleration at quasi-perpendicular shocks by using simulation results obtained from the K computer.

キーワード: 衝撃波加速, 粒子シミュレーション
Keywords: shock acceleration, particle simulation

平行衝撃波における MHD 波に散乱される速い粒子加速 The fast acceleration of particles scattered by MHD wave in parallel shock

村木 昂大^{1*}; 天野 孝伸²; 星野 真弘²
MURAKI, Koudai^{1*}; AMANO, Takanobu²; HOSHINO, Masahiro²

¹ 東大・地惑, ² 東京大学

¹EPS. Univ. of Tokyo, ²University of Tokyo

銀河宇宙線の起源は銀河系内の超新星残骸衝撃波であると考えられており、その生成に関する標準理論として一次フェルミ加速が広く受け入れられている。しかし一次フェルミ加速は、knee までの高エネルギー宇宙線を説明するには、必ずしも十分な効率でない。超新星残骸の寿命という限られた時間の中で十分に宇宙線粒子を加速することは難しく観測を説明できない。この問題の解決の為に付加的な加速もしくはより効率的な加速機構が求められる。

衝撃波加速の理解には散乱過程が重要な意味を持ち、過去の研究ではモンテカルロ法のような数値的散乱モデルや磁場擾乱による散乱が数値シミュレーションによって取り扱われて来た。そうした取り組みの中でも観測と整合する衝撃波近傍に立つ磁気流体波動 (MHD 波) に補足された粒子の加速が注目されている。一様系での議論においては、MHD 乱流中に局在化した波束 (Kuramitsu & Hada, 2000) によって荷電粒子が効率的に大角度散乱されることが示された。平行衝撃波近傍での単一波長の大振幅 MHD 波を利用した散乱過程 (Sugiyama et al., 2001) は、ドリフト加速に伴う速い「粒子注入過程」とそれに続く速いフェルミ加速の可能性を示唆する。本研究では、これまでの研究を発展させ、平行衝撃波に立つ MHD 乱流を散乱体と考えた速い衝撃波加速の可能性を調べる。テスト粒子解析を行うことで、準線形領域からコヒーレンスを持った乱れ場や大振幅波動を考えた衝撃波加速についても議論する。

キーワード: 粒子加速, 宇宙線, 衝撃波, アルフベン波, コヒーレンス, 大振幅

Keywords: acceleration of particles, cosmic ray, shock, Alfvén wave, coherence, large amplitude

非一様流の中でのプラズマ統計について On statistics of a plasma in a nonuniform flow

羽田 亨^{1*}
HADA, Tohru^{1*}

¹九州大学大学院総合理工学研究院
¹IGSES, Kyushu University

衝撃波統計加速（フェルミ加速）により良く知られているように、圧縮場の中での散乱体により、高エネルギー粒子は効率よく加速される。一方、膨張場では減速されるが、圧縮場による加速の逆過程ではない。太陽風など多くのプラズマ流は一様流ではなく、（3次元的に）圧縮と膨張を繰り返す部分からなる非一様流である。このような媒質の中でのプラズマ分布の統計を理論および数値計算により議論する。現実に観測される熱的非平衡分布との関連について触れる。

キーワード: フェルミ加速, 非平衡分布
Keywords: Fermi acceleration, Nonequilibrium distribution

ヘリコン波動の伝搬とモード変換、プラズマ加熱過程のシミュレーション Helicon wave propagation, mode conversion, and plasma heating

諫山 翔伍^{1*}; 羽田 亨¹; 谷川 隆夫²; 篠原 俊二郎³
ISAYAMA, Shogo^{1*}; HADA, Tohru¹; TANIKAWA, Takao²; SHINOHARA, Shunjiro³

¹九州大学総合理工学府, ²東海大学総合科学技術研究所, ³東京農工大学大学院工学研究院

¹Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, ²Research Institute of Science and Technology Tokai University,

³Tokyo University of Agriculture and Technology, Institute of Engineering

ヘリコンプラズマは、アルゴンなどの中性ガス中に電磁波であるヘリコン波（有限境界がある場合のホイスラー波）を励起して生成するプラズマである。室内で高効率に低温、高密度のプラズマを生成できるため、プラズマプロセスや電機推進機関など、広い範囲での応用が期待されている。一方で、波動現象とプラズマ生成機構について更なる物理的理解が求められている。ヘリコンプラズマ生成の主なメカニズムとしては、ヘリコン波動の分散関係、衝突・無衝突によるプラズマの加熱、中性粒子の電離・再結合を考慮した分散関係の時間発展が挙げられる。

本発表ではヘリコンプラズマ生成を理解する上での初期段階として、ヘリコン波動の伝搬とモード変換、プラズマ加熱過程について議論する。Shamrai (1996) によれば、ヘリコン波は静電的な波である Trivelpiece-Gould (TG) 波へ線形モード変換し、モード変換によって生じた TG 波が強減衰し、高効率に電子を加熱する。しかし実際は、モード変換効率、TG 波の励起は散逸の大きさに強く依存する。ここでは、流体シミュレーション、PIC シミュレーションを用いて、モード変換効率、波動減衰、波動-粒子相互作用によるプラズマ加熱について議論する。また、ヘリコン波の直接的な減衰が、実際の実験における状況下でのプラズマ加熱で主要な役割を果たしていることを示す。

キーワード: ヘリコンプラズマ, ヘリコン波, TG (Trivelpiece-Gould) 波, モード変換, PIC シミュレーション
Keywords: Helicon plasma, Helicon wave, TG(Trivelpiece-Gould) wave, Mode conversion, PIC simulation

外微分形式による解析力学：ハミルトン・ヤコビ方程式と流体力学 Hamilton-Jacobi equation based on exterior derivative

中村 匡^{1*}
NAKAMURA, Tadas^{1*}

¹ 福井県立大学
¹Fukui Prefectural University

電磁場や流体などの空間に連続的にひろがる場の解析力学は、普通、時間をパラメーターとし、場を無限自由度の力学変数とみなして構築される。これは有限個の自由度をもつ系の時間発展を追う解析力学の自然な拡張であるが、電磁場などの場合、ある特定の系での時間座標をパラメーターとして使うため、相対論的なあつかいでは明示的なローレンツ普遍性が失われるという欠点がある。また、このアプローチでは、電磁気などとゲージ場の場合にゲージ自由度に対応して変数の自由度が増えるため、なんらかの拘束条件を追加しなければ発展方程式の数が足りなくなってしまうという問題もある。このため、電磁場の正準理論はクーロンゲージなどのローレンツ普遍性を犠牲にしたゲージ固定をするか、あるいはディラック括弧のような複雑な数学テクニックを使うかなどしてこの問題を避けている。

前回の学会で、Cartanによって案出された外微分形式の手法を使って、時間と空間を対等のパラメーターとして扱い、明示的にローレンツ不変な解析力学を構築する方法について報告した。この手法により、ゲージ固定などをしなくても明快にゲージ場の解析力学を構築できるという利点もある。今回はそのハミルトン・ヤコビ方程式への応用と、流体力学への適用可能性について報告する。

ハミルトン・ヤコビ方程式は解析力学の教科書の最後にてでくる、あまり実用性のないわけのわからない数学手法というイメージがあるが（そしてそれは多くの場合正しいが）、古典力学から量子力学への

橋渡しとして重要な意味をもつ。また、理論それ自体として、実際の応用計算には不適でも、解析力学全体の根本的理解には必須な概念である。本研究では微分形式を使った解析力学の応用としてハミルトン・ヤコビ方程式を導出した。

もうひとつの話題として、前回の学会で発表した内容は電磁気学への応用であったが、他の連続体への応用可能性もある。相対論的な流体の解析力学表現については過去にいくつか試みがあったが、ローレンツ普遍性に問題があった。発表では本研究の解析力学的手法を流体力学に応用する可能性についても議論する。Kambe (2010)によれば、流体力学のEuler方程式は変数を適当に選ぶことによってマクスウェル方程式と同じ形に表現できる。これを応用して、流体力学の解析力学を構築できる可能性がある。

参考文献：

中村匡, 物性研究, 2003 (<http://hdl.handle.net/2433/97295>)

T. Kambe 2010, Fluid Dyn. Res.

Y. Kaminaga, Electronic Journal of Theoretical Physics, 2012
(<http://www.ejtp.com/ejtpv9i26>)

キーワード: 外微分形式, 解析力学, ハミルトン・ヤコビ方程式, 流体力学
Keywords: exterior derivative, analytical mechanics, Hamilton-Jacobi Equation, fluid dynamics

東北大学太陽電波望遠鏡 AMATERAS で観測された狭帯域太陽電波 Type-IV バーストとその生成機構 Study of the slowly drifting narrowband structure in type-IV solar radio bursts observed by AMATERAS

加藤 雄人^{1*}; 岩井 一正²; 西村 由紀夫¹; 熊本 篤志¹; 三澤 浩昭³; 土屋 史紀³; 小野 高幸¹
KATO, Yuto^{1*}; IWAI, Kazumasa²; NISHIMURA, Yukio¹; KUMAMOTO, Atsushi¹; MISAWA, Hiroaki³; TSUCHIYA, Fuminori³; ONO, Takayuki¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ² 国立天文台野辺山太陽電波観測所, ³ 東北大学大学院理学研究科附属惑星プラズマ・大気研究センター

¹Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, ²Nobeyama Solar Radio Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, ³Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University

We show the type-IV burst event observed by AMATERAS on June 7, 2011, and reveal that the main component of the burst was emitted from the plasmoid eruption identified by the EUV images of SDO. The slowly drifting narrowband structure (SDNS) appear in the spectra of the burst. By a statistical analysis, we reveal that SDNS appeared with the duration of tens to hundreds of millisecond and with the typical bandwidth of 3 MHz. For the generation mechanism of SDNS, we propose the wave-wave coupling between Langmuir waves and whistler-mode chorus emissions generated in a post-flare loop, inferred from the similarities of the plasma environments between a post-flare loop and the equatorial region of the Earth's inner magnetosphere. We assume that a chorus element with a rising tone is generated at the loop-top of a post-flare loop. By referring to the propagation properties of chorus in the magnetosphere, we assume that the chorus element propagates downward along the magnetic field line and then propagates away from the central region of the flare-loop toward the outer edge of the loop where the plasma density is relatively small. By the magnetic field and plasma density models, we quantitatively estimate the expected duration of radio emissions generated through the coupling between Langmuir waves and chorus during its propagation in the post-flare loop and find that the observation properties of duration and bandwidth of SDNS are consistently explained by the proposed generation mechanism. The characteristics of SDNS are its intermittency in time and the negative frequency drift in the limited frequency band. While observation in the terrestrial magnetosphere shows that chorus is a group of large amplitude wave elements naturally generated intermittently, the mechanism proposed in the present study can explain both intermittency and slowly drifting narrowband structure in the observed spectra.

キーワード: 太陽電波, コロナ, 波動粒子相互作用

Keywords: solar radio burst, solar corona, wave-particle interaction

高強度レーザー実験における相対論効果による種磁場形成の数値計算 Numerical simulation of magnetic field generation by relativistic effect in high intensity laser experiments

川面 洋平^{1*}; 吉田 善章¹

KAWAZURA, Yohei^{1*}; YOSHIDA, Zensho¹

¹ 東京大学新領域創成科学研究科

¹ Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

現在宇宙に存在する磁場や渦構造の起源は大きな謎である。流体描像におけるプラズマでは磁場は力学的渦と結合し、正準運動量の curl によって規定される。理想状態において渦の生成が有限であるために何らかの非完全微分の形をした項が必要となる。非相対論的理想プラズマにおいて渦を生成しうる非完全項は熱力学的な傾圧効果 $\nabla T \times \nabla \sigma$ のみである。これは Biermann の Battery 効果として知られている。しかし熱力学的傾圧効果による渦生成は熱平衡に近い状態では大きな値を持っていないため初期宇宙などでは、傾圧効果による渦生成は小さいと予想される。これに対して最近 Mahajan and Yoshida によって提唱された相対論効果による渦生成 [1] は熱平衡に近くても大きな値を持つことができるため、宇宙の種磁場形成の有力な候補になるのではないかと考えられている [2]。相対論的プラズマでは2つの渦生成項 $S_T = \gamma^{-1} \nabla T \times \nabla \sigma$ と $S_R = T \nabla \gamma^{-1} \times \nabla \sigma$ が存在するため、熱平衡に近く $T \nabla \sigma = \nabla \theta$ であっても、 $\nabla \gamma^{-1} \times \nabla \theta$ という渦生成項(相対論的傾圧効果)を持つことができる。

このように理論的に予測された相対論的傾圧効果を実験的に検証することが必要とされる。最近の高強度レーザー実験では相対論的電子プラズマを生成し、またそのときに生じる磁場の高解像度な測定が行われているため [3]、レーザー実験において相対論的傾圧効果を観測することができると期待できる。本研究では相対論的プラズマの非線形数値計算を行い、レーザー実験による相対論的渦生成の検証への提言を行う。

これまでの計算結果では参考文献 [3] に妥当なパラメータ領域では相対論的傾圧効果は熱力学的傾圧効果の10分の1程度であり、相対論的傾圧効果の観測は難しいことがわかった。またプラズマの温度を上昇させるか、スキン長さ/スケールサイズを低下させることによって相対論的傾圧効果の比率を上げることができる(図)。波数空間でみると相対論的傾圧効果は熱力学的傾圧効果よりも大スケールにおいて強くなることがわかった。

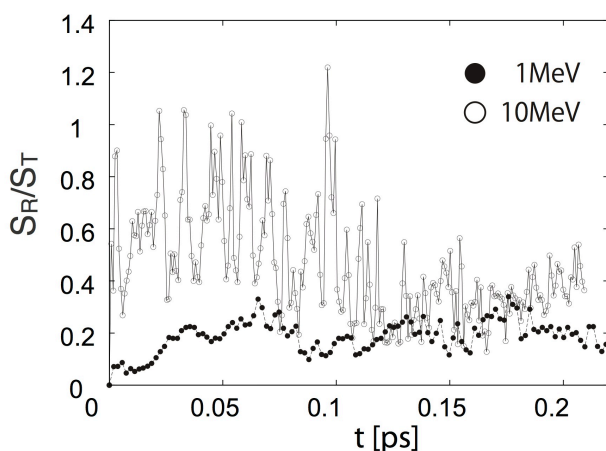
[1] S. M. Mahajan and Z. Yoshida, Phys. Rev. Lett. 105, 095005 (2010).

[2] S. M. Mahajan and Z. Yoshida, Phys. Plasmas 18, 055701 (2011).

[3] S. Mondal et al., PNAS 109, 8011 (2012).

キーワード: 相対論プラズマ, 高強度レーザー実験, 磁場生成

Keywords: relativistic plasma, high intensity laser experiment, magnetic field generation



宇宙線変成衝撃波と宇宙線の生成率 The acceleration rate of cosmic rays in the cosmic ray modified shocks

齋藤 達彦^{1*}; 星野 真弘¹; 天野 孝伸¹
SAITO, Tatsuhiko^{1*}; HOSHINO, Masahiro¹; AMANO, Takanobu¹

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

¹EPS, The University of Tokyo

銀河系内で加速・生成されている銀河宇宙線は、銀河系内で起きる超新星爆発に起因する衝撃波をその起源としている。その加速メカニズムは Diffusive Shock Acceleration (DSA) 理論 [Blandford & Ostriker, 1978; Bell, 1978] として知られているが、そこには多くの理論的仮定が存在する。その一つに「被加速粒子 (宇宙線) の反作用効果」が取り入れられていない点が挙げられる。これについては Drury & Völk (1981) によって宇宙線の圧力を介した反作用効果モデルが提案されている。このモデルは背景プラズマと宇宙線を共に流体として扱うため「2 流体モデル」と呼ばれる。また、宇宙線の反作用を受け、構造を大きく変化させた衝撃波は「宇宙線変成衝撃波」と呼ばれており、近年の観測からその存在が示唆されている。

他方、衝撃波加速による宇宙線の生成効率に関しては、非常に高効率で生成されているという観測 (Helder et al. 2009; Hughes et al. 2000) もある一方で、低効率であるとする観測 (Fukui 2013) もあり、統一的な見解が得られていないのが現状である。本研究では、この衝撃波での宇宙線の生成効率に関して、「宇宙線の反作用を考慮した加速メカニズム」を考えることによってその多寡を定性的に議論した。

宇宙線変成衝撃波では、上流での物理状態に対して下流の物理状態がただ一つ決まる通常の (反作用のない) 衝撃波に対して、最大で3つの宇宙線の生成効率の異なる状態が許され、非常に特異的なものである。

本研究では、この下流の物理状態の「多価性」に着目して、2 流体モデルを用いた数値計算による時間発展を行い、各々の時間定常状態の安定性を検証した。その結果、3つのうち、宇宙線の生成効率が“最も高い状態”と“最も低い状態”の2つが安定的に存在でき、その“中間的な状態”は不安定によって“最も低い状態”へと遷移した。さらに、この特徴は2 流体モデルに対して①磁場の効果を導入した場合も、②衝撃波面での粒子注入効果を導入した場合でも同様であった。

加えて、初期に宇宙線がない非定常な状態からの時間発展を計算すると、この2つの安定状態のうち生成効率が“最も低い状態”が唯一最終的な定常状態として存在できることが分かった。

キーワード: 衝撃波, 粒子加速, 宇宙線の反作用

Keywords: shocks, particle acceleration, feedback from cosmic rays

高ベータ無衝突衝撃波の 2 次元構造と粒子加速に関するフル粒子計算 2D Full Particle-In-Cell Simulation on a High Beta Collisionless Shock and Particle Acceleration

松清 修一^{1*}; 松本 洋介²

MATSUKIYO, Shuichi^{1*}; MATSUMOTO, Yosuke²

¹九州大学, ²千葉大学

¹Kyushu University, ²Chiba University

High beta and relatively low Mach number shocks are commonly present in a variety of space and astrophysical environments, like the earth's bow shock, the heliospheric termination shock (effective beta is rather high due to the presence of pickup ions), galaxy cluster merger shocks, etc. Even such high beta shocks show some evidences that high energy particles are possibly accelerated there. Voyager 2 spacecraft revealed that the fluxes of non-thermal electrons and ions (the latter are called as termination shock particles) are enhanced at the crossings of the termination shock. Radio synchrotron emissions from relics of galaxy cluster mergers imply the presence of relativistic electrons accelerated in the merger shocks. In this study we perform two-dimensional full particle-in-cell simulation to discuss structure of the shock as well as the acceleration process of electrons. The one-dimensional simulations performed in the past showed that under the high beta and relatively low Mach number conditions the shock is more or less laminar and time stationary and electron acceleration occurs through the so-called shock drift mechanism. Here, we reveal that two-dimensional structure of the shock is highly complex even for such a high beta and a low Mach number and further that some electrons are accelerated to high energy but their acceleration mechanism appears not to be so simple as that reproduced in one-dimensional simulations.

キーワード: 無衝突衝撃波, 数値実験, 粒子加速

Keywords: collisionless shock, numerical simulation, particle acceleration

宇宙天体プラズマにおける KH 不安定の乱流発展の役割 Kelvin-Helmholtz turbulence in space and astrophysical plasmas

松本 洋介^{1*}
MATSUMOTO, Yosuke^{1*}

¹ 千葉大学大学院理学研究科
¹ Graduate School of Science, Chiba University

Solar wind interactions with magnetized or un-magnetized planets destabilize planetary boundaries such as the magnetopause of the Earth magnetosphere and the ionopause of Mars and Venus. The Kelvin-Helmholtz (K-H) instability arising at a velocity shear layer has been considered to be important for momentum transport of the solar wind across the boundary layers, and been a universal nature of the planetary interactions. Linear and nonlinear growths of the instability depend on background plasma and magnetic field configurations. At the Martian ionopause, where the ionospheric ion escape is expected by the K-H instability, a fast (~ 400 km/s), dilute (~ 1 /cc) plasma flow directly interacts with a high density (10^4 - 10^5 /cc), low temperature (a few thousand K) plasma. The situation can be found similarly at the terrestrial magnetopause, where in-situ observations have often indicated growth of the instability and resultant transport of the solar wind plasma into the magnetosphere, in the sense that the K-H instability grows in a strongly inhomogeneous plasma.

In this presentation, we review nonlinear evolutions of the K-H instability in strongly inhomogeneous plasmas. The evolutions are characterized by the secondary instabilities such as the Rayleigh-Taylor instability and the magnetic reconnection, by which a coherent eddy structure are destroyed and the energy is transported to smaller scales. Recent kinetic plasma simulations have shown that electron-scale structures are spontaneously generated as a consequence of the secondary instabilities (Karimabadi et al., 2013). The micro-scale structure accompanied with the MHD-scale evolution enhanced mixing of collisionless plasmas. It was also found that the spatial size of the turbulent area was quickly broaden when coupled with a coalescence of large scale K-H modes, that is, the inverse energy cascade (Matsumoto & Seki, 2010). When nonlinear mode coupling was considered the time scale of the inverse energy cascade can be even faster than the fastest growing mode of the K-H instability. These nonlinear features in micro and macro scales have large impact on plasma transport process in the solar wind - planetary interactions as well as in astrophysical plasmas.

キーワード: ケルビン・ヘルムホルツ不安定, 乱流, 地球磁気圏, 惑星大気
Keywords: Kelvin-Helmholtz instability, turbulence, Earth's magnetosphere, Planetary atmosphere

電気対流乱流を用いた乱流輸送の実験研究 Experimental Study on Turbulent Transport using ElectroHydroDynamics Convection Turbulence

永岡 賢一^{1*}; 吉村 信次¹; 日高 芳樹²; 寺坂 健一郎²; 横井 喜充³; 政田 洋平⁴; 三浦 英昭¹; 常田 佐久⁵; 久保 雅仁⁶; 石川 遼子⁶

NAGAOKA, Kenichi^{1*}; YOSHIMURA, Shinji¹; HIDAKA, Yoshiki²; TERASAKA, Kenichiro²; YOKOI, Nobumitsu³; MASADA, Yohei⁴; MIURA, Hideaki¹; TSUNETAKA, Saku⁵; KUBO, Masahito⁶; ISHIKAWA, Ryoko⁶

¹ 核融合科学研究所, ² 九州大学, ³ 東京大学, ⁴ 神戸大学, ⁵ 宇宙科学研究所, ⁶ 国立天文台

¹National Institute for Fusion Science, ²Kyushu Univ., ³Tokyo Univ., ⁴Kobe Univ., ⁵ISAS, ⁶NAOJ

乱流輸送は、広い分野で研究対象となっている課題である。Kolmogorov 則が支配する 3 次元等方乱流では、現実の系としては興味が薄く、一般に我々の興味の対象は、構造形成を伴う非常に複雑な系である。近年では、乱流中の構造形成は、その系に内在する対象性の破れと乱流の結合により生じると考えられており、温度、密度、乱流強度などの非一様性や回転などの乱流の結合が議論されている。我々は、新たな実験的研究として、非常に制御性の良い電気対流乱流を用いた乱流輸送実験を提案している。

電気対流とは、液晶に電圧を印加したときに駆動される対流現象であり、Rayleigh Bernard 対流の重力場と浮力を電場のみで置き換えることに対応している。印加する電圧を上げると電気対流は、乱流へと遷移する。これは Rayleigh Bernard 対流系と同様の性質である。電気対流乱流の場合は、乱流を特徴付ける無次元パラメータを印加電圧により制御することが可能である。すなわち、Rayleigh 数は、電圧の 2 乗に比例し、Prandtl 数は、印加電圧の周波数の逆数に比例することが知られている。この電気対流乱流を回転ステージに乗せて実験を行うことで、Rossby 数の制御も可能である。つまり、3 つの無次元パラメータを独立に制御することが可能である。

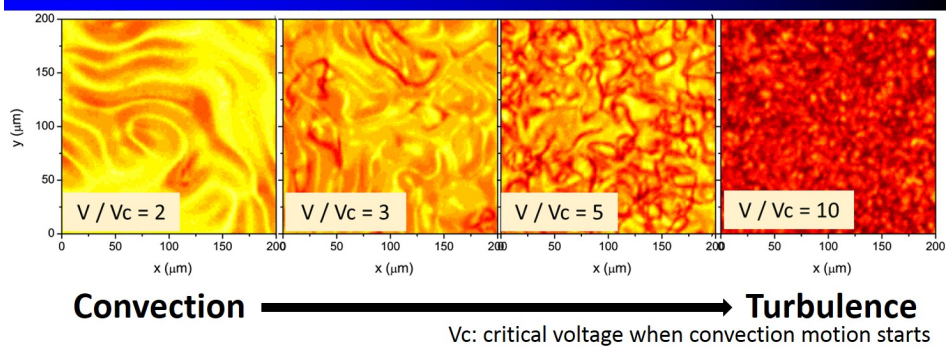
初期実験として、一様対称な電気対流乱流を用いた乱流輸送の実験を行った。小さなガラス球を液晶中に混入させ、電位対流乱流中の局所的な速度場を可視化することが可能であり、粒子追跡を行うことで、粒子輸送特性を調べることも可能となる。実験では、Hurst 数が 0.5 となり、ランダムウォークによる拡散過程が支配的な輸送が観測された。実行乱流輸送係数は、Rayleigh 数の 0.85 乗程度で増加する結果が得られた。これらの結果は、Navier-Stokes 方程式で記述される通常粘性流体に大変よく似た性質である。

講演では、これらの初期実験の詳細を紹介し、3 つの計画を議論する。1 つ目は、乱流輸送に対する非一様性の影響を調べる実験である。乱流強度が空間非一様な場合の乱流輸送特性の変化の計測を目指す。2 つ目は、回転の効果である。電気対流乱流を回転場で生成したときに、乱流と回転が結合する状態での輸送特性の評価を試みる。これらの 2 つの実験は、乱流輸送に対するスカラー場と軸性ベクトル場の対象性破れの影響を明らかにする可能性があると考えている。最後は、星や惑星の対流層の実験室シミュレーションである。これまでに、回転球殻形状では乱流は半径方向に駆動することができなかった。電気対流乱流を使うことで、電場のみで乱流を駆動することができるため、半径方向に乱流駆動が可能になる。最初のターゲットは、Rossby 数の比較的大きな太陽対流層に挑戦する予定である。

キーワード: 乱流輸送実験, 対称性の破れ, 電気対流, 液晶

Keywords: turbulent transport experiment, symmetry breaking, EHC, liquid crystal

EHC turbulence in planar shell



衛星データと画像自動認識手法を利用した太陽表面磁束輸送の研究 Investigation of magnetic flux transport on the solar surface based on satellite data and auto-tracking technique

飯田 佑輔^{1*}
IIDA, Yusuke^{1*}

¹ 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所
¹ ISAS/JAXA

Spatial displacement of patch structure on the solar surface is investigated based on satellite data and auto-tracking technique. Magento-convection system on the solar surface is thought to be important not only as a cause of various solar activities but also as an actual observable magneto-convection on the stellar surface. One important issue is how magnetic flux is transported there. In global scale, the transport of magnetic field is treated as a diffusion now. However it is not clear that diffusion treatment is appropriate in magneto-convection system. The aim of this study is to understand if the diffusion treatment of magnetic field transport in global scale is good or not.

I investigate the dependence of mean-square displacement on elapsed time by using auto-tracking technique, which is thought to be one of the critical characteristics for global-scale description of transport.

The longest magnetogram data obtained by Hinode/FG is used. In that data, number of tracked patches is enough for statistical study, more than 40000. The obtained dependence show a different character above and below the point of $L \sim 10^4$ km. Below that scale, it has a power-law dependence with an index of ~ -1.4 , namely super-diffusion scheme. However, in the larger scale, the power-law dependence becomes ~ -0.6 , namely sub-diffusion scheme. These characters can be explained by the network flow pattern qualitatively. Below the network scale, patch is transported by constant flow ($\sim 0.3 \text{ km s}^{-1}$) from center of network cell to edge of the cell addition to the large ($\sim 1 \text{ km s}^{-1}$) perturbing flow of granulation. On the other hand, above the network scale, patches experience the trapping around stagnation point of network flow, which makes displacement of patch shorter than that only by diffusion motion.

キーワード: 太陽, 磁場, 対流, 拡散, 画像自動認識

Keywords: the Sun, magnetic field, convection, diffusion, feature recognition

太陽光球起源の吸収線プロファイルで探る対流運動の高さ方向の動的構造 Dynamic structure of convective motion depending on the height with line profile originating at solar photosphere

大場 崇義^{1*}; 飯田 佑輔²; 清水 敏文²
OBA, Takayoshi^{1*}; IIDA, Yusuke²; SHIMIZU, Toshifumi²

¹ 総合研究大学院大学, ² 宇宙科学研究所/宇宙航空研究開発機構
¹The Graduate University for Advanced Studies, ²ISAS/JAXA

太陽表面では全面に渡り、粒状斑と呼ばれる小さな粒状の模様が見られ、その周りは粒状斑間隙と呼ばれる暗いレーンで囲まれている。これらの構造は対流運動によって形成されている。太陽表面の対流運動は、上空にあるコロナの加熱や磁場のダイナミクスを起こすエネルギーの源であることから、対流運動について理解することは、これらの物理を明かす上で重要な意味がある。しかし、その空間スケールの小ささから粒状斑構造を分離した観測は困難であった。さらに、対流運動では高さ方向の構造が重要であると考えられるが、光球よりも内部を直接観測する手段は限られているため、観測的に高さ方向の構造を捉えることは難しかった。我々は、太陽観測衛星「ひので」に搭載された可視光磁場望遠鏡 (Solar Optical Telescope : SOT) で取得されたスペクトルデータの解析から、これら太陽表面对流の粒状斑構造、および高さ構造の直接観測を試みた。SOT のストークス偏光リメータ (Stokes Polarimeter : SP) は、Fe I の 630.15/630.25nm の吸収線の偏光プロファイルを精密計測している。SOT は優れた空間・波長分解能を持ち、粒状斑、粒状斑間隙それぞれを空間的に分解した詳細な線輪郭の形状について調べることができる。シーイングフリーである宇宙空間で観測を行っていることから、地上望遠鏡では難しい長時間観測が安定して実行できる。本研究ではこの長時間観測によって、太陽表面に現れる放射強度、速度場の時間的変動である 5 分振動を取り除くことで、より精密な解析が可能となった。

静穏領域にて観測された強度プロファイル (Stokes I) の線輪郭に注目した。太陽表面上での対流運動による線輪郭のドップラーシフトを調べることで、粒状斑の上下運動速度を得ることができる。これに加えて、我々は線輪郭の波長方向の構造に着目した。波長毎の吸収係数の差から、線輪郭の中心波長付近では高度が高い位置を、ウィング部分では低い位置を反映する。本研究では、この波長依存性を利用して、対流運動の高さ方向の動的構造を調べた。太陽表面上部と下部において、300m/s 程度の典型速度差が見られた。1km/s 以上の差が生じている場所も観測された。これらの値は、太陽光球の音速が 7km 程度であることを考慮すると、無視できない大きな加速、減速が太陽表面付近で起こっていることを意味している。また、粒状斑と粒状斑間隙において、異なった対流速度の変化が見られた。上昇流が発生している粒状斑では、太陽内部から減速的に対流が上昇していく一方、下降流が発生している粒状斑間隙では、上部から内部に向かって加速する傾向が捉えられた。しかしながら、これらの典型的な例に従わない場所も幾つか存在している。講演では、これらの解析から得られた太陽表面对流の典型構造の描像や、それに従わない場所についての議論を行いたい。

キーワード: 太陽, 対流, スペクトル, 光球

Keywords: sun, convection, spectrum, photosphere

Particle acceleration and magnetic field generation in the relativistic jet-plasma interactions

Particle acceleration and magnetic field generation in the relativistic jet-plasma interactions

ARDANEH, Kazem^{1*} ; CAI, Dongsheng¹
ARDANEH, Kazem^{1*} ; CAI, Dongsheng¹

¹Department of Computer Science, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

¹Department of Computer Science, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

The aim of the current work is to analyze particle acceleration and magnetic field generation related to propagation of a relativistic electron-ion jet front into an unmagnetized ambient electron-ion plasma. We have focused on the earliest evolution in shock formation. The analysis is on the basis of a three-dimensional relativistic electromagnetic particle-in-cell (PIC) code. The results demonstrate that the Weibel instability is responsible for generation of strong small-scale magnetic fields and subsequent particles acceleration. In agreement with previous studies the majority of the particles acceleration occurs behind the jet front. Initially, the incoming electrons respond to field fluctuations growing as a result of the Weibel instability. Therefore, the electron channels are generated and the total magnetic energy grows linearly due to the mutual attraction between the channels, and downstream advection of the magnetic field fluctuations. When the magnetic fields become strong enough to deflect the much heavier ions, the linear growth rate of instability decreases as a result of oppositely directed electron-ion currents and topological change in the structure of magnetic fields. The Ion channels are then merged and magnetic energy increases more slowly at the expense of the energy stored in ion stream. It has been clearly illustrated that the ion channels develop through a larger scale in the longitudinal direction, while extension of the electron filaments is limited. Hence, the ions channels are the sources of deeply penetrating magnetic fields. Our results are in valid agreement with those reported in the literature.

キーワード: Relativistic jets, Particle acceleration, Magnetic field generation, Weibel instability
Keywords: Relativistic jets, Particle acceleration, Magnetic field generation, Weibel instability

プラズマ中におけるリヒトマイヤー・メッシュコフ不安定の磁気流体的進化 Magnetohydrodynamic evolutions of the Richtmyer-Meshkov instability in astrophysical and laboratory plasmas

佐野 孝好^{1*}
SANO, Takayoshi^{1*}

¹ 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心
¹Institute of Laser Engineering, Osaka University

The Richtmyer-Meshkov instability (RMI) in magnetohydrodynamics is of great interest in many fields such as astrophysical phenomena, laboratory experiments, and inertial confinement fusion. The RMI occurs when an incident shock strikes a corrugated contact discontinuity. A strong shock wave traveling through the density inhomogeneity of magnetized interstellar medium is a promising site of the RMI. This astrophysically common event plays a key role in determining the dynamics of supernova remnants and gamma ray bursts. Recent laboratory experiments are designed to test the magnetic field amplification due to the RMI by the use of laser-induced shock waves. In inertial confinement fusion, the RMI excited at several capsule interfaces amplifies the perturbations that seed the Rayleigh-Taylor instability. For the fast ignition approach, the utilization of an external magnetic field to guide the fast electrons is discussed proactively and sheds light on the impact of magnetohydrodynamic (MHD) instabilities during the implosion.

The inclusion of a magnetic field brings two important consequences into the RMI, which are the amplification of an ambient field and the suppression of the unstable motions. The magnetic field can be amplified by the stretching motions at the interface associated with the RMI. A strong magnetic field inhibits the nonlinear turbulent motions of the RMI. The vorticity generated by the interaction between a shock front and a corrugated contact discontinuity is the driving mechanism for the RMI. For the cases of MHD parallel shocks, the role of the magnetic field is to prevent the deposition of the vorticity on the interface, and stabilize the RMI.

We have investigated that the critical strength of a magnetic field required for the suppression of the RMI numerically by using a two-dimensional single-mode analysis. For the cases of magnetohydrodynamic parallel shocks, the RMI can be stabilized as a result of the extraction of vorticity from the interface. A useful formula describing a critical condition for magnetohydrodynamic RMI is introduced and is successfully confirmed by direct numerical simulations. The critical field strength is found to be largely dependent on the Mach number of the incident shock. If the shock is strong enough, even low-beta plasmas can be subject to the growth of the RMI.

キーワード: 磁気流体不安定, 天体プラズマ, 実験室プラズマ
Keywords: MHD instability, astrophysical plasmas, laboratory plasmas

マルチスケール・プラズマ乱流のジャイロ運動論的シミュレーション Gyrokinetic simulation of multi-scale plasma turbulence

渡邊 智彦^{1*}

WATANABE, Tomo-hiko^{1*}

¹ 名古屋大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Nagoya University

よく知られているようにプラズマ現象の時空間構造は複数のスケール長で特徴づけられる。しかし、そのスケール分離性は必ずしも成立するとは限らず、プラズマにおけるマルチスケール現象として宇宙や実験室のプラズマに共通の研究課題となっている。磁気再結合などはその好例としてよく議論される。一方、乱流は巨視的スケールと微視的スケールの構造を同時に含み、広い波数領域にわたって連続的な揺動スペクトルを示す。ここでは、磁場閉じ込め核融合プラズマの乱流輸送現象を対象とし、複数のスケール長をもつプラズマにおける乱流について議論する。

我々は、ジャイロ運動論にもとづいたシミュレーションにより、電子温度勾配が駆動する乱流 (ETG 乱流) と密度勾配が駆動する捕捉電子モード (TEM) が共存する系における輸送現象を調べている。乱流揺動を特徴づけるスケールとしては、電子とイオンのジャイロ半径の二つがある。上記の二つのモードが不安定であれば、まず、より短い時空間スケールをもつ ETG 乱流が発達した後、長い時空間スケールをもつ TEM 不安定性が成長する。我々は、TEM がさらに長スケールのシア流 (ゾーナル流) を駆動し、それにより ETG 乱流および TEM 揺動を抑制するという、興味深いケースを見出した。この結果は、ゾーナル流を介したスケール間の相互作用を利用して、異なる駆動源をもつ乱流輸送を低減させることのできる可能性を示唆している。

さらに我々は、イオン温度勾配が駆動する乱流 (ITG 乱流) も含むより大規模なジャイロ運動論的シミュレーションも進めており、イオンスケールから電子スケールまでの乱流揺動スペクトルとそのダイナミックな変動の様子を調べている。講演では、こうしたマルチスケール・プラズマ乱流の特徴と輸送の関連についてさらに議論したい。

*本発表は、朝比祐一 (東工大)、前山伸也、仲田資季、井戸村泰宏 (原子力機構)、石澤明宏、沼波政倫、洲鎌英雄 (核融合研)、各氏との共同研究にもとづいている。シミュレーションの実行においては、共同研究によるサポートのもと、プラズマシミュレータ (核融合科学研究所)、ヘリオス (国際核融合エネルギー研究センター)、京 (理化学研究所計算科学研究機構)、の各計算機を利用させていただいた。また、課題の実施においては HPCI 戦略課題分野 4 体制構築課題ならびに科学研究費補助金の支援を得た。

キーワード: 乱流, 輸送, 運動論, シミュレーション

Keywords: turbulence, transport, kinetics, simulation

有限振幅ホイッスラー波動非線形発展に伴うプラズマ加熱 Plasma heating by nonlinear development of a finite amplitude whistler wave

齊藤 慎司^{1*}; 成行 泰裕²; 梅田 隆行³
SAITO, Shinji^{1*}; NARIYUKI, Yasuhiro²; UMEDA, Takayuki³

¹名古屋大学 大学院理学研究科, ²富山大学 人間発達科学部, ³名古屋大学 太陽地球環境研究所
¹Graduate School of Science, Nagoya University, ²Faculty of Human Development, University of Toyama, ³Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

本研究では、有限振幅かつ長波長の右偏波波動の非線形発展について、空間二次元速度 3 次元の粒子シミュレーションを用いて研究を行った。波動が持つ磁場エネルギーは背景磁場の 10% とし、イオン慣性長程度の波長を持った波動について注目した。シミュレーション結果より、波動が持つ粒子速度の摂動を原因として、Modified Two Stream Instability が駆動されることを確認した。この不安定性により、背景場に対して準垂直方向に静電場が励起され、イオンが垂直方向に、電子が平行方向に優位なエネルギー増加が起こった。波動エネルギーは非常に短い時間（イオン回転時間以内）に約 70% 減少した。これは一次元的な parametric instability より効率的なエネルギー散逸を意味する。さらに、この非線形発展を介して、背景場に対して準垂直方向に波動が励起されていることを本シミュレーションによって見いだされた。ここでは非線形発展に伴うプラズマ加熱と準垂直伝搬波動について議論を行う。

キーワード: ホイッスラー波動, 太陽風, 非線形発展, プラズマ加熱, 粒子シミュレーション

Keywords: Whistler wave, Solar wind, Nonlinear development, Plasma heating, Particle-in-cell simulation

加速膨張する太陽風プラズマにおける非線形アルヴェン波の理論モデル
A theoretical model of nonlinear Alfvén waves in expanding accelerating solar wind plasmas

成行 泰裕^{1*}
NARIYUKI, Yasuhiro^{1*}

¹ 富山大学人間発達科学部
¹ Faculty of Human Development, University of Toyama

During about forty years, a lot of studies have discussed the linear and nonlinear dynamics of Alfvén waves in solar wind plasmas. Although the uniform plasmas are assumed in most past studies, the effects of the inhomogeneity of background plasmas cannot be negligible in the inner heliosphere, in which several future spacecraft missions are planned. In the present study, a nonlinear evolution equation of envelope-modulated Alfvén waves is derived from the magnetohydrodynamic accelerating expanding box model by using the reductive perturbation method. The effects of the acceleration of solar wind to nonlinear evolution are discussed in detail.

キーワード: 太陽風, アルヴェン乱流
Keywords: solar wind, Alfvénic turbulence

密度構造によるアルフヴェーン波共鳴と非線形現象への影響について Alfven wave resonance in density profile structure and the effect for nonlinear phenomenon

堤 昭裕^{1*}; 鈴木 建¹
TSUTSUMI, Akihiro^{1*}; SUZUKI, Takeru¹

¹ 名古屋大学
¹ Nagoya University

Alfven 波等のプラズマ内における波動伝播は、宇宙空間における電磁気効果を伴った流体现象において普遍的な性質である。プラズマ内の密度構造の存在は、この様な波動の反射を引き起こし、一般的には一方向へのスムーズな波動伝播を妨げる。しかし井戸型の密度構造の場合、Alfven 波が密度構造に捕われ共鳴することにより、反射が起きなくなる様な状況があることが知られている。プラズマ内の密度谷の構造自体は普遍的な状況であるので、このような波の共鳴も普遍的現象であり、物理現象にも大きく関与していると考えられる。例えば、太陽表面付近の低密度領域では捕われた Alfven 波のエネルギー散逸が行われており、このことがコロナ加熱のメカニズムに関係しているとの指摘もある。

井戸型密度構造下での Alfven 波の伝播は、線形範囲下では解析的に求めることができる。よって、密度構造による反射が起これなくなり波動が捕われる条件も解析的に求めることができる。この段階においては規則正しい定常的な流れになっており、Alfven 波は本質的に横波であるので、密度や圧力変化といった圧縮性効果は伴わない。しかし波の注入が続いた場合、振幅が増大し波動の非線形効果が重要となる段階になる。この様な段階においては、捕われた波動同士の衝突による効果によって流れは非常に不規則になり、さらに元の井戸型密度構造もその構造を保っていらなくなり、共鳴条件そのものが自発的に変化してしまうという現象も起きる。この様な密度谷構造はプラズマ現象において普遍的であるので、上記の現象はプラズマ現象の理解において重要であるとも考えられる。

本研究では線形段階から非線形段階への移行による自発的な構造変化に注目して数値シミュレーションを行った。その結果、線形段階の捕われ現象や条件が、非線形段階での時間発展に対しても影響を与えうることが分かった。本発表ではその結果を紹介する。

ケルビン-ヘルムホルツ不安定性の非線形発展に対するイオンジャイロ運動の効果 The effect of the ion gyro motion to nonlinear processes of the Kelvin-Helmholtz instability

上野 悟志^{1*}; 梅田 隆行¹; 中村 琢磨²; 町田 忍¹

UENO, Satoshi^{1*}; UMEDA, Takayuki¹; NAKAMURA, Takuma²; MACHIDA, Shinobu¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² ロスアラモス国立研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, ²Los Alamos National Laboratory

Nonlinear evolution of the Kelvin-Helmholtz instability (KHI) at a transverse velocity shear layer in an inhomogeneous space plasma is investigated by means of a four-dimensional (two spatial and two velocity dimensions) electromagnetic Vlasov simulation. When the rotation direction of the primary KH vortex and the direction of ion gyro motion are same, there exists a strong ion cyclotron damping. In this case, spatial inhomogeneity inside the primary KH vortex is smoothed and the secondary Rayleigh-Taylor instability is suppressed. The ion gyro motion also suppresses the formation of secondary vortices in the spatial scale smaller than the ion gyro radius, when the rotation direction of the vortex and the direction of ion gyro motion are same. As a result, the secondary instabilities take place at different locations in the primary KH vortex, where the rotation direction of the secondary vortex and the direction of ion gyro motion are opposite. These results indicate that secondary instabilities occurring in the nonlinear stage of the primary KHI at the Earth's magnetospheric boundaries might show dawn-dusk asymmetries.

Keywords: the Kelvin-Helmholtz instability, Vlasov simulation, space plasma, nonlinear processes, secondary instabilities

巨大ブラックホールによる潮汐破壊事象の磁気流体・輻射流体数値実験 Magnetohydrodynamic and Radiation Hydrodynamic Simulations of Tidal Disruption Events by a Supermassive Black Hole

川島 朋尚¹; 大須賀 健²; 松元 亮治^{3*}

KAWASHIMA, Tomohisa¹; OHSUGA, Ken²; MATSUMOTO, Ryoji^{3*}

¹ 上海天文台, ² 国立天文台, ³ 千葉大理

¹Shanghai Astronomical Observatory, ²NAOJ, ³Chiba University

恒星やガス雲が巨大ブラックホールに接近すると潮汐力によって破壊され、ブラックホールへの降着率が急激に増加する。このような潮汐破壊事象を観測することにより、降着率変動に伴う巨大ブラックホール降着円盤の光度変化や状態遷移についての知見を得ることができ、様々なタイプの活動銀河中心核相互の関係を明らかにするとともに、降着円盤の進化のタイムスケールを決定する角運動量輸送率を見積もることも可能になる。2014 年にはふたつの天体で、潮汐破壊に伴う増光が観測されると期待されている。第一は我々の銀河系中心の巨大ブラックホール Sgr A* である。現在、G2 と名付けられた地球の 3 倍の質量のガス雲が落下しつつあり、2014 年 3 月にブラックホールに最接近すると予想されている。最近接点は降着円盤が存在すると予想されている領域内にあるため、潮汐破壊されたガス雲とブラックホール降着円盤が相互作用すると考えられる。我々は近似リーマン解法の一つである HLLD 法に基づく高次精度の 3 次元磁気流体コード CANS+ を用いてこの相互作用の磁気流体シミュレーションを実施した。その結果、ガス雲との衝突によって降着円盤内部の磁気乱流が強まり、ブラックホールへの降着率が 10 倍程度高まること、磁気流体ジェットが噴出すること等を示すことができた。降着率増加に伴う X 線・電波領域での増光は再近接点通過後 1 カ月程度で生じることもわかった。第二は Swift J1644+57 と名付けられた天体であり、2011 年 3 月に赤方偏移 $z=0.35$ の銀河中心で爆発的な増光が観測されている。この事象では恒星が巨大ブラックホールの潮汐力によって破壊されたと考えられる。この天体の光度は増光後 1 年以上にわたって百万太陽質量のブラックホールのエディントン光度以上であったが、2012 年 8 月に急激に減光した。これは、エディントン光度に対応する臨界降着率を超えて物質が落下する超臨界降着状態から、臨界降着率以下で降着する標準降着円盤への状態遷移と解釈できる。輻射と物質の相互作用を考慮した輻射流体シミュレーションを実施した結果、潮汐破壊物質の落下が続くことによって円盤に物質が蓄積されつつあり、減光後、1~2 年で円盤光度が再びエディントン光度程度まで増光することがわかった。X 線観測等から示唆される再増光時期について議論する。

キーワード: 降着円盤, 磁気流体力学, 輻射流体力学, ブラックホール, 潮汐破壊, 状態遷移

Keywords: accretion disk, MHD, radiation hydrodynamics, black hole, tidal disruption, state transition

惑星形成過程における弱電離ダストプラズマの物理 Physics of weakly ionized dusty plasmas in planet formation

奥住 聡^{1*}
OKUZUMI, Satoshi^{1*}

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科

¹Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Planets form in gas disks around young stars. These protoplanetary disks are a typical example of weakly ionized plasmas in space: they are cool (~ 10 -1000 K) but are nonthermally ionized by galactic cosmic rays and stellar X-rays. The disks can also be viewed as dusty plasmas as they contain micron-size dust particles from which planets form.

In this talk, we highlight interesting aspects of protoplanetary disks as weakly ionized dusty plasmas, and discuss their importance in planet formation as well as the MHD of the disks themselves. In particular, we focus on the interplay between charged dust particles and disk's MHD turbulence. Ionized accretion disks are prone to become turbulent because of the magnetorotational instability (MRI; Balbus & Hawley 1991). In protoplanetary disks, the activity of MRI strongly depends on how much dust has grown to larger solid bodies, as small dust particles determine the ionization degree of the disk gas. Meanwhile, turbulence, if present, drives the relative velocity of solid particles, which in turn affects how far the particles can grow by collisions. We briefly review recent developments in the numerical study of MRI-driven turbulence, and then discuss possible coevolution of MRI turbulence and dust particles as predicted by our latest self-consistent simulation (Okuzumi & Hirose 2012).

We will also highlight the importance of plasma heating by turbulent electric fields. A simple order-of-magnitude estimate shows that electric fields in MRI turbulence can significantly heat up electrons in the gas. This implies that Ohm's law can become *nonlinear* in the field strength. To study the nonlinearity of Ohm's law, we construct a gas-dust charge reaction model that takes into account the heating of ionized gas particles as well as impact ionization by hot electrons (Okuzumi & Inutsuka, in prep.). We find that the heating gives rise to negative differential resistivity at a high electric field strength. This occurs because heated electrons more frequently adsorb onto dust particles. The reduced conductivity will lead to suppressed MHD turbulence. Our ionization balance calculations predict that this effect becomes important in realistic protoplanetary disks (Mori & Okuzumi, in prep.).

キーワード: 弱電離プラズマ, ダスト, 惑星形成, MHD, 乱流

Keywords: weakly ionized plasma, dust, planet formation, MHD, turbulence

高解像度 GPS 全電子数観測による電離圏擾乱の研究 Ionospheric disturbances studied by high-resolution GPS total electron content observations

津川 卓也^{1*}; 西岡 未知¹; 齊藤 昭則²; 大塚 雄一³; 石井 守¹
TSUGAWA, Takuya^{1*}; NISHIOKA, Michi¹; SAITO, Akinori²; OTSUKA, Yuichi³; ISHII, Mamoru¹

¹ 情報通信研究機構, ² 京都大学大学院理学研究科, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹National Institute of Information and Communications Technology, ²Graduate School of Science, Kyoto University, ³Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

The Global Positioning System (GPS) is a worldwide precise radio-navigation system formed from a constellation of at least 24 satellites at 20,200 km altitude, 4.2 R_E from the center of the Earth. GPS orbit configuration ensures that 5-10 satellites are visible from any single point on the Earth. The dual-frequency signals from the GPS satellites pass through the ionosphere to reach ground-based GPS stations. The phase and group velocities of radio waves vary in the ionosphere depending on the integrated electron density, that is total electron content (TEC), along the ray path and on the frequency of the radio waves. Using these characteristics, the TEC integrated along the ray path between a GPS satellite and a receiver can be accurately measured using two GPS signals in different frequencies. The TEC strongly reflects variations in the ionosphere at an altitude of about 300 km, where is the peak height of ionospheric electron density.

We have developed high-resolution TEC maps using dense GPS receiver networks. We have been collecting all the available GNSS receiver data in the world to expand the TEC observation area. These GNSS data are provided by IGS, UNAVCO, SOPAC, and other regional data centers. Currently, we are providing global and regional maps of absolute TEC, detrended TEC, and rate of TEC change index (ROTI). These data and quick-look maps are archived and available in DRAWING-TEC website (<http://seg-web.nict.go.jp/GPS/DRAWING-TEC/>).

These high-resolution GPS-TEC maps have been applied to studies of various ionospheric disturbances. Sudden increase in TEC caused by solar flares were studied using global TEC observations. Regional TEC observations have revealed new characteristics of large- and medium-scale traveling ionospheric disturbances (LSTIDs and MSTIDs). Recently, clear concentric waves and short-period oscillations were observed after huge earthquakes/tsunamis and massive tornadoes, indicating that acoustic and/or gravity waves propagate upward from the lower atmosphere and reach the ionosphere.

In this presentation, we will introduce recent studies of ionospheric disturbances using high-resolution GPS-TEC observations.

キーワード: 電離圏, GPS, 全電子数, 熱圏

Keywords: ionosphere, GPS, TEC, thermosphere

イオン輝線による原始惑星系円盤雷の観測 Observation of Lightning in Protoplanetary Disks by Ion Lines

村主 崇行^{1*}; 秋山 栄治²; 犬塚 修一郎³; 野村 英子⁴; 奥住 聡⁴

MURANUSHI, Takayuki^{1*}; AKIYAMA, Eiji²; INUTSUKA, Shu-ichiro³; NOMURA, Hideko⁴; OKUZUMI, Satoshi⁴

¹ 京都大学, ² 国立天文台, ³ 名古屋大学, ⁴ 東京工業大学

¹Kyoto University, ²The National Astronomical Observatory of Japan, ³Nagoya university, ⁴Tokyo Institute of Technology

原始惑星系円盤における雷は原始惑星系円盤科学における重要な素過程である。円盤雷はコンドリュール形成の候補メカニズムとして、また原始惑星系円盤の電磁的状态を観測するための手法の一つとして研究されてきた。そこで、原始惑星系円盤において雷を引き起こしうる複数のモデルが提案されており、そのいずれが正しいかを観測的に区別することは原始惑星系円盤を物理的に理解するうえで極めて重要である。本発表では、我々は原始惑星系円盤における雷モデルを観測的に区別する可能性について研究した。

地上の雷は空気中における放電現象であり、空気中における放電現象は、世紀に渡る研究の歴史があり確立された物理である。しかし、観測的には地上の雷は空気の絶縁耐力よりも1-2ケタ低い電場ですでに発生することが知られており、この事実は長い間雷研究の謎のひとつであった。(ここで、絶縁耐力とは、物質が絶縁破壊を起こさずに耐えられる電場の強さの最大値のことである。絶縁耐力は放電物理の中心となる物性値である。)

この謎を解くために、伝統的なTownsend放電モデル以外にも、新たにDruyverstejn-Penning放電モデルやランナウェイ放電モデルが提案されてきた。この2つのモデルによって導かれる絶縁耐力の値はTownsend放電モデルが予言する値よりもずっと小さい。

この絶縁耐力の値を測定することにより、放電モデルを区別することができる。絶縁耐力とは、電場によって加速された電子が一定の電離エネルギーに達する点であると解釈することができる。ところで物質に印加されたこの電場は、その物質にふくまれる正イオン粒子をも加速する。放電を引き起こすのに必要な電離エネルギーは一定であるから、イオンが加速によって達するエネルギーも一定である。これは、観測的には、諸イオンの速度は熱速度では説明のつかないほどの高速にあり、かつその速度は雷領域にわたって一定で、局所的な密度や温度にはよらないことを意味する。このようなきわだった性質は、放電現象の存在を証明し、また放電モデルを区別するためのまたとない観測的特徴といえる。たとえば、体積分率92%の水素分子と8%のヘリウムからなる円盤ガスを考えた場合の、HCO⁺イオンについてこの特徴速度は、Townsend放電モデル、Druyverstejn-Penning放電モデル、runaway放電モデルについてそれぞれ7.1km/s、2.9km/s、0.49km/sである。

我々は、HCO⁺、DCO⁺ and N₂H⁺ という三種類のイオン種について、雷モデルを考慮に入れた速度分布を計算し、それをもとにラインプロファイルおよび2次元P-V図をシミュレートした。その結果、ラインプロファイルにおいて、雷モデルごとに決まる速度領域に、10-100mJy程度の特徴が現れることがわかった。Mathews et al. (2013) や Qi et al. (2013) によれば、ALMAによって10mJy程度の感度のイオン観測結果が報告されているので、ALMA公開データにもとづいて一部の雷モデルを棄却したり、将来観測において雷モデルを識別できる可能性があることがわかった。

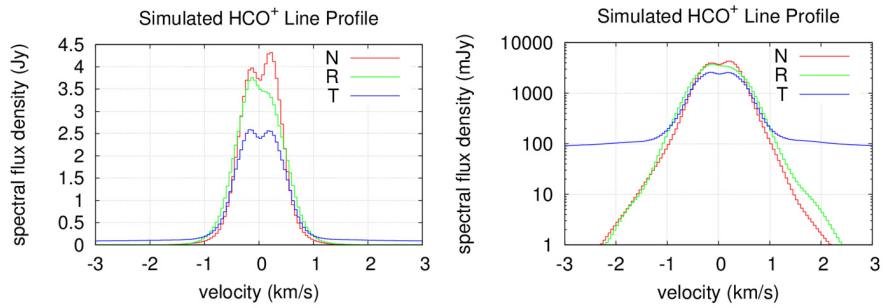
キーワード: 原始惑星系円盤, 放電現象, 雷, 弱電離プラズマ, 天体プラズマ

Keywords: Protoplanetary disks, Discharge phenomena, Lightning, Weakly-ionized plasma, astrophysical plasma

PEM31-03

会場:503

時間:5月1日 16:15-16:30



Simulated HCO⁺ line profile of an MMSN disk located at distance $d=56\text{pc}$, inclination $i = 7(\text{deg})$. The three curves indicate disk without lightning (N), disk with runaway breakdown model (R), and with Townsend breakdown model (T), respectively.

N体計算による Debye 球の重なりによる引力の検証 Investigation of attractive forces associated with overlapping Debye spheres using N-body simulations

伊東 保崇^{1*}; 天野 孝伸¹; 星野 真弘¹
ITOU, Hotaka^{1*}; AMANO, Takanobu¹; HOSHINO, Masahiro¹

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

ダスト粒子は宇宙のいたるところ、たとえば分子雲、原始惑星系、地球磁気圏、惑星円盤などに存在している。さらに実験室においてもダスト粒子が格子を作ることは良く知られていて Coulomb 結晶と呼ばれている。プラズマ中のダスト粒子はプラズマ粒子との衝突や光電効果などの帯電過程によって帯電し、背景のプラズマと強く結合する。このようなプラズマはダストプラズマ、または複合プラズマと呼ばれ、太陽系内のその場観測や Ikezi の Coulomb 結晶の予言以降、宇宙科学だけでなく産業の観点からも研究されている。

ダスト粒子とプラズマ粒子の衝突が帯電過程において支配的なき、通常電子のフラックスがイオンのフラックスより大きいのでダスト粒子は負に帯電する。よってダスト粒子同士は互いに反発すると考えられるが、ダスト粒子にはたらく力は背景のプラズマとの相互作用のため極めて複雑で、様々な種類の力が提案されている (例えば Shukla and Eliasson, [2009])。興味深いことに、引力も存在するかもしれない、ダストプラズマの集積や結晶化において重要な役割を果たしているかもしれない。

提案されている引力のひとつに、Debye 球の重なりによる引力がある。Resendes et al [1998] は、二つのダスト間のポテンシャルが Lennard-Jones 型のポテンシャルであり、近くで斥力、遠くで弱い引力を及ぼすことを示した。さらに Hou et al [2009] はこの引力がもし存在すれば強い集積や結晶化の効果があることを示したが、一方電氣的にダストにトラップされた粒子を無視する OML 理論はこの引力の存在を否定し、実験的にもまだ立証されていない。

我々の研究の目的は、N 体計算を用いてこの引力の存在を調査することである。N 体計算ならば仮定をほとんど用いずにダストプラズマの挙動を調べることができる。我々はすでに近距離部分を実空間で、遠距離部分を波数空間で計算する Ewald 和を用いたコードによって低プラズマパラメータではこの引力は存在しないことを示しており、今回の研究ではメッシュを導入し PM 法や PPPM 法を実装して拡張したコードによって高プラズマパラメータの場合について調査する。

Enceladus 衛星周辺における電子-水分子弾性衝突のテスト粒子シミュレーション Test-particle simulation of electron-H₂O elastic collision along the magnetic field line around Enceladus

田所 裕康^{1*}; 加藤 雄人²

TADOKORO, Hiroyasu^{1*}; KATO, Yuto²

¹ 東京工科大学, ² 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

¹Tokyo University of Technology, ²Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

Saturn's inner magnetosphere is dominated by water group neutrals originated from Enceladus' water plume [e.g., Shemansky et al., 1993; Richardson et al., 1998; Esposito et al., 2005]. The neutrals in the inner magnetosphere contribute to one of the important loss processes of plasma through plasma-neutral collisions. However, little has been reported on a quantitative study of the electron loss process due to electron-neutral collisions. In this paper, we will focus on the collisional loss process with neutrals.

We examine the variation of equatorial electron pitch angle distribution and loss rate of precipitated electrons into Saturn's atmosphere through pitch angle scattering due to elastic collisions with neutral H₂O along Saturn's magnetic field line around Enceladus. We focus on 1 keV electrons as a typical energy in the present study. To examine the variation of those, we perform one-dimensional test-particle simulation when the co-rotating electron flux tube passes the dense H₂O region in the vicinity of Enceladus (~6.4 minutes). Results show that the equatorial electron pitch angle distribution near the loss cone (<20 degrees and >160 degrees) decreases with time through pitch angle scattering due to elastic collisions. It is found that the electrons of ~19 % to the total number of equatorial electrons at the initial condition are lost in ~380 seconds. The calculated loss time is twice faster than the loss time under the strong diffusion.

キーワード: プラズマ-中性粒子衝突, 土星, エンケラドス, 弾性衝突, ピッチ角散乱

Keywords: plasma-neutral collision, Saturn, Enceladus, elastic collision, pitch angle scattering

磁気流体波動が駆動する巨大ガス惑星からの質量放出と惑星の大気構造 MHD wave-driven mass loss from gas giants and effects on atmospheric structure

田中 佑希^{1*}; 鈴木 建¹; 犬塚 修一郎¹
TANAKA, Yuki^{1*}; SUZUKI, Takeru¹; INUTSUKA, Shu-ichiro¹

¹ 名古屋大学理学研究科

¹Department of Physics, Nagoya University

近年は多数の太陽系外惑星が発見されており、その中には中心星に極めて近接した軌道を公転している巨大ガス惑星も多く存在している事が分かっている。このような惑星はホットジュピターと呼ばれており、中心星からの強力な輻射を受けて表面は1000K程度の高温に加熱されている。

一方、太陽系外惑星の発見手法の一つであるトランジット法からは、系外惑星の半径や軌道周期についての情報を得ることができる。さらに最近では、トランジット時と非トランジット時のスペクトルの変化から惑星の大気組成を推定したり、異なる波長での観測から惑星の大気構造を推定したりすることも可能である。これらの観測からは、ホットジュピターが持つ大きく膨張した水素大気の大気からの大量の質量放出現象の存在も分かっている。ホットジュピターからの質量放出については、大気上層部から高速で流れ出す水素大気の大気存在が観測から明らかになっており、モデル依存性はあるものの質量放出率の推定値も得られている。しかし、このような大量の質量放出現象の詳細なメカニズムは未だにはっきりとは解明されていない。

そこで我々がホットジュピターからの質量放出のメカニズムとして提案しているのが、磁気流体波動によって駆動される太陽風の質量放出現象である。ホットジュピターの表面は1000K程度であるため弱電離であるが、大気上層では理想MHDとしての近似が可能である。巨大ガス惑星が固有磁場を持っており、惑星表面に乱流が存在している場合は、表面で磁気流体波動が励起される。さらにその波が上空へ伝播し散逸することによって大気の運動エネルギーとなり、質量放出を駆動する事が考えられる。本研究では、太陽風と同様の数値計算を、ホットジュピターに関して典型的だと考えられるパラメータを用いて行った。その結果、磁気流体波動によって引き起こされた質量放出の値は、観測から推定されている質量放出率を説明出来る事が分かった。

また、発見されている惑星の半径や質量、推定される表面温度などは様々であるため、これらをパラメータとして計算を行った。質量放出率のパラメータ依存性を調べたところ、解析的に得られた惑星半径・質量への依存性と数値計算結果が一致することも確認した。加えて、磁気流体波動が惑星大気内で散逸することによって、惑星の大気構造にも影響を与える。計算の結果から、ガス流は大気上層で超音速まで加速され、さらに高層大気は数万Kにまで加熱されることも示した。本講演では、ホットジュピターだけではなく巨大ガス惑星全般における質量放出の可能性や大気構造への影響についても議論したい。

キーワード: 系外惑星, 質量放出

Keywords: exoplanet, atmospheric escape

異径微粒子含有高周波プラズマにおける構造と運動の観察 Group motion of heteromorphic fine particles in HF discharge plasma

三重野 哲^{1*}; 増田 理沙²; 盛林 高志²; 林 康明³

MIENO, Tetsu^{1*}; MASUDA, Risa²; MORIBAYASHI, Takashi²; HAYASHI, Yasuaki³

¹ 静岡大学・院・創造科学技術, ² 静岡大学・理学部, ³ 京都工芸繊維大学・院・工

¹Grad. School Sci. Technol, Shizuoka Univ., ²Dept. Phys., Shizuoka Univ., ³Grad. School Eng., Kyoto Inst. Technol.

複雑系研究と関係して、微粒子プラズマは多くの研究者により研究されている。[1, 2] ここでは、異径粒子分布を持つ微粒子を含むプラズマを高周波アルゴン内に作り、研究を行っている。そして、新規現象を探索している。直径 150 mm、高さ 150mm の円柱型ステンレス容器内に 2つの円板電極と 1つのリング電極が置かれている。高周波プラズマは、10-13 Pa の Ar ガス中で、270-290 V_{rms} の高周波電圧を上下電極に加えて作られる。リング電極は、粒子閉じ込めの為、下電極の上に置かれる。用いた微粒子は、炭化シリコン (直径約 8 μm)、窒化シリコン (直径約 8 μm)、短い麻 (直径約 25 μm 、長さ 10-1500 μm) で、上方のダストボックスから供給される。顕微高速カメラ (SELMIC LWD100) とビデオカメラで、個々の微粒子運動と集団運動が記録される。図 1 は、放電電圧 $V_d = 280 V_{rms}$ 、放電電流 $I_d = 0.2 A_{rms}$ 、Ar 圧力 13 Pa において作られた、円板状微粒子雲である。図 2 は、SiC 粒子粒子の軌跡であり、周期約 0.07 s で惑星型運動を行っている。短い麻の場合、自転運動や惑星型運動が観測された。これらの運動は、ダスト音波振動で励起されると考えている。

[1] Y. Hayashi, K. Tachibana, J. Vac. Sci. Technol. A 14 (2) (1996) 506.

[2] H. Thomas, G.E. Morfill, V. Demmel, Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 652.

キーワード: 微粒子プラズマ, 異径分布, 構造形成, 惑星運動, 自転, ダストプラズマ

Keywords: fine particle plasma, heteromorphic particles, self organization, planetary motion, spin, dust plasma

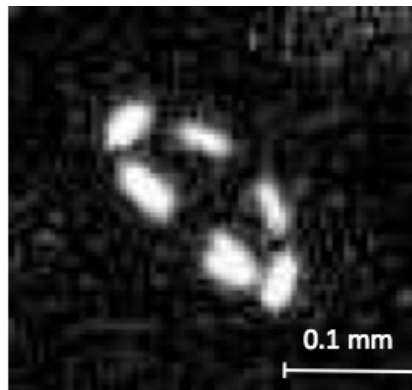
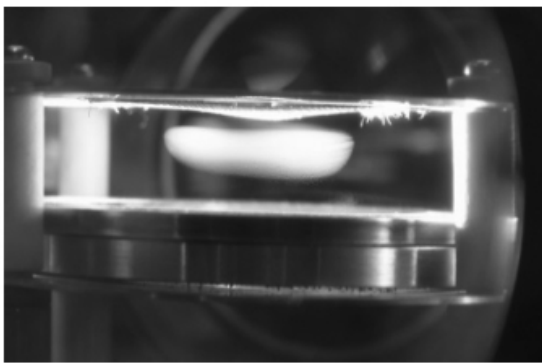


Fig. 1 Fine particles in the HF plasma.

Fig. 2 Planet-like motion of a particle.

差動回転プラズマにおけるトロイダル磁場に沿った新しい不安定性 A new instability along toroidal magnetic field in differentially rotating plasmas

平林 孝太^{1*}; 星野 真弘¹
HIRABAYASHI, Kota^{1*}; HOSHINO, Masahiro¹

¹ 東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

We discuss a new type of instability expected to take place in an accretion disk, which has a differentially rotating plasma threaded by a weak magnetic field, by performing linear eigenvalue analysis. We study the linear stability of a disk with a localized, toroidal magnetic field in the radial direction, which can be expected in an accretion disk during the nonlinear evolution of the magneto-rotational-instabilities (MRI).

The MRI is believed to be a strong source of magneto-hydro-dynamic (MHD) turbulence and the resultant angular momentum transport in the accretion disk, which is required for the gas to accrete onto the central object. Once the MRI grows, the system is chiefly governed by the toroidal and radial magnetic field newly generated by the dynamo action of MRI. Such a configuration allows the Alfvén waves to propagate along toroidal direction.

In this talk, we study the linear stability of the Alfvén wave in the local Cartesian coordinate, the so-called shearing periodic box, and show that the toroidally propagating Alfvén wave can become unstable if its wavelength is larger than the length scale of the localized magnetic field gradient. We investigate our results of the linear eigenvalue analysis by changing the structure of the localized magnetic field, and discuss some properties of the instability with examining the eigenvectors and eigenvalues. It is revealed that this type of instability may also appear in non-rotating plasma, but it is highly suppressed in a rigid body rotating plasma. In addition to the linear analysis, the corresponding nonlinear behavior will also be discussed by using MHD numerical simulations. This instability plays an important role in the plasma transport because it probably couples with the magnetic reconnection occurring in the equatorial plane and then to contributes to the saturation mechanism of the MRI.

無衝突系降着円盤での磁気回転不安定による粒子加速と角運動量輸送
Particle acceleration and angular momentum transport during magnetorotational instability in kinetic accretion disks

星野 真弘^{1*}
HOSHINO, Masahiro^{1*}

¹ 東京大学大学院理学系研究科
¹The University of Tokyo

Magneto-rotational instability (MRI) in a gravitational rotating system is known to play an important role on the formation of the astrophysical accretion disk and the angular momentum transport, and the nonlinear time evolution of magneto-rotational instability has been extensively investigated by using MHD simulations so far. The mean free path of plasma, however, is not necessarily smaller than the characteristic scale length for some classes of astrophysical accretion disks, and the collisionless behavior of MRI beyond the MHD approximation needs to be understood. In this talk, we study momentum transport and particle acceleration of the kinetic (collisionless) MRI by focusing on magnetic reconnection. We discuss that a strong pressure anisotropy is associated with the formation of the channel flow, and the anisotropic channel flow can lead to a rapid magnetic reconnection, that can occur sporadically in three-dimensional system. As a result of the reconnection, non-thermal power law distribution with a hard spectral index $p=1-1.5$ is quickly formed. We also discuss that the so-called alpha parameter in the standard accretion disk model, which is numerically measured from the Reynolds and Maxwell stresses, can be dramatically enhanced during the nonlinear time evolution of MRI. The kinetic MRI is one of plausible mechanisms to explain much more efficient angular momentum transport and high-energy particle emissions observed from massive black holes such as Sgr A*.

キーワード: 宇宙プラズマ, 降着円盤, 粒子加速, 磁気リコネクション, 角運動量輸送

Keywords: Space and astrophysical plasmas, accretion disk, particle acceleration, magnetic reconnection, angular momentum transport

新しいハイブリッドコードによる磁気回転不安定性の非線型シミュレーション Numerical Simulation of Kinetic Magnetorotational Instability using a new Hybrid Technique

白川 慶介^{1*}; 天野 孝伸¹; 星野 真弘¹

SHIRAKAWA, Keisuke^{1*}; AMANO, Takanobu¹; HOSHINO, Masahiro¹

¹ 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻

¹ Faculty of Science, University of Tokyo

The evolution of Magnetorotational instability (MRI) is considered to be important in the context of efficient angular momentum transport in the accretion disks in our universe. Conventionally, the nonlinear evolution of MRI is studied under the MHD approximation which assumes the mean free path of the plasma is sufficiently small compared to the actual size of the disk. However some classes of the accretion disks, for example the disk around SgrA*, are found to be constituted with a collisionless plasma and therefore the kinetic effect of the plasma, such as generation and relaxation of the pressure anisotropy, should be taken into account.

For the inclusion of the kinetic plasma effects, hybrid code, which treats ions as particles and electrons as massless charge neutralizing fluid, may provide a robust approach resolving the ion scale physics and integrating over the Keplerian time scale. However in the 2 dimensional simulation of the MRI, it is well known that the system eventually grows to a set of channel flows. In this state, the density of the plasma is found to be extremely low in the region where the magnetic field is enhanced as a result of a strong dynamo effect of the differential rotation of the disk. In this low density, strong magnetic field region, the CFL condition determined by the R-mode wave is found to be severe. Moreover, since the extremely low density region is generated in the channel flow, the division-by-density operation in the conventional hybrid code leads to an unexpected termination of the calculation.

In this study we adopted a new approach of hybrid simulation to a differentially rotating system. In this approach, the finite electron inertia is taken into account which gives an upper bound in the phase velocity of the R-mode wave, providing a reduced CFL condition. In addition, the new approach is almost free from the division-by-density operation and the extremely low density region generated in the channel flow can then be calculated appropriately. With this new code we would like to discuss the nonlinear evolution of the 2 dimensional kinetic MRI.

キーワード: 磁気回転不安定性, 運動論プラズマ, 降着円盤, 無衝突プラズマ, ハイブリッドコード

Keywords: Magnetorotational Instability, Kinetic Plasmas, Accretion disks, Collisionless Plasmas, Hybrid code

高ベータ磁化プラズマにおけるフローと自律的構造形成 Self-organization and flow in high-beta magnetized plasmas

永田 正義^{1*}
NAGATA, Masayoshi^{1*}

¹ 兵庫県立大学 大学院工学研究科
¹ University of Hyogo, Graduate School of Engineering

スフェロマックなど自己組織化機能の強い高ベータプラズマの自発的な磁界構造形成は、太陽コロナの間欠的爆発的現象(フレア)にみられる磁気リコネクション、キンク変形、粒子加速、衝撃波発生などの共通の物理機構が内在していることが明らかにされつつある。磁化プラズモイドやフローの駆動による巨視的なダイナモ磁場や磁気リコネクション発生の基礎過程は太陽コロナループや宇宙ジェットの発生機構、天体・宇宙惑星の回転熱対流に起因する帯状流の発生と構造形成にも大きく寄与している。また、核融合プラズマでは多彩な遷移現象を伴う自律的特性をうまく制御し、最適圧力勾配と高ベータを維持するためには、フローの発生と駆動が重要な役割を果たしていることが分かってきた。過去に見られたHモード遷移の要因は大きな径電場の形成とそれに伴うポロイダルシア流による乱流輸送の低減である。この様な渦や流れの構造形成が高ベータプラズマの磁場構造の自律的生成に大きく関与している。本講演では、国内外の各実験装置での観測をもとに、磁化同軸プラズマガンによるトロイダルプラズマの自律的磁界構造形成など、ヘリシティ駆動系のプラズマフローが強く関与する緩和現象に関する最近の研究のトピックスを紹介する。

電磁流体力学(MHD)により記述できる天体宇宙現象はその構造のスケールが何桁も大きく違っているにも関わらず、固有の時間空間スケールを持たないことから地球上の実験室内で再現することができる。模擬するための技術的観点からは、この磁化プラズモイドやフローを幾何学的な配置とトポロジー構造を考慮にいれて柔軟に制御しながら発生させる必要がある。プラズモイドを効率よく作り出し、ダイナミックで非定常なMHD現象を探求する際の最適な実験ツールとして、磁化同軸プラズマガン(MCPG)がある。このMCPGを用いた電磁加速パルス放電によって、スフェロマックと呼ばれる高ベータトラスプラズマを形成することができる[1]。MCPGは通常のマーシャルガンの出口付近に放射状に径方向磁場を印加しただけの簡単な構造をしている。太陽コロナの構造を支配しているのが太陽の磁界であり、内部の対流層で磁気流体ダイナモによって生産維持されている。この磁界はプラズマ流体に凍結されているため、磁力線を横切る運動が起電力を発生して電流を生み出し、この電流によってまわりに新たな磁界を生み出すという電磁流体力学の機構が働いている。スフェロマックはまさにこの電磁流体力学の基本法則に従って生成されており、MCPGの中ではそれらの法則がうまく作用している。歴史的には、1959-1964年頃にアルヴェン達がこの方法で磁化プラズマリングの生成を行ったことが今日のスフェロマック生成の起源とされている。

Woltjer-Taylor状態を記述するForce-Free式、 $\nabla \times \mathbf{B} = \lambda \mathbf{B}$ (λ :ピンチパラメータ)は、境界条件と外部トロイダル磁束の拘束によって多様な解が存在する。単連結構造のスフェロマックの場合、この式の線形解の特性は二つの違った境界条件によって決定される。一つは、完全導体で囲まれた境界($\mathbf{B} \cdot \mathbf{n} = 0$)で、スフェロマックはガンから孤立しているような緩和配位である。もう一つは、ヘリシティ駆動系での緩和配位(Jensen-Chu配位と呼ばれる)であり、バイアス磁界がガン電極を貫いていることから一部の境界で $\mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \neq 0$ の条件を与えて得られる解である。この駆動系のMHD緩和の問題をさらに複連結構造のトラス配位に拡張させ、外部トロイダル磁界を考慮した場合、 $\nabla \times \mathbf{B} = \lambda \mathbf{B}$ の解析はさらに複雑になる。この時、J.B. TaylorはRFPとの遷移分岐としてFlippedした球状トロイダル緩和配位の存在を予測した。この複連結構造のトラス配位の緩和現象について、兵庫県立大のHIST装置で実験が行われ、外部のトロイダル磁束を反転させると、ポロイダル磁束つまりトロイダル電流も自発的に反転する緩和が観測され、理論的な予測が実証された[2]。外部駆動系の緩和配位では、磁気ヘリシティ入射によるダイナモ電流駆動が実現でき、この方法によるトラスプラズマを長時間維持できることがすでに実験で検証されている[3]。

- [1] M. Nagata et al., Phys. Rev. Lett. 71, 4342 (1993)
- [2] M. Nagata et al., Phys. Rev. Lett. 90, 225001 (2003)
- [3] M. Nagata et al., Phys. Plasmas 10, 2932 (2003)

キーワード: プラズモイド, スフェロマック, フロー, 自己組織化, MHD緩和, ダイナモ
Keywords: plasmoid, spheromak, flow, self-organization, MHD relaxation, dynamo

太陽大気における波動の観測 Observations of Alfvénic waves in the solar atmosphere

岡本 丈典^{1*}
OKAMOTO, Joten^{1*}

¹JAXA 宇宙研

¹ISAS/JAXA

太陽表面の温度が 6,000 度であるのに対して、太陽大気コロナの温度が 100 万度以上あることは半世紀以上前より知られているが、その原因についてはいまだに解明されていない。これは太陽物理学や天体物理学において長年の謎であり、「コロナ加熱問題」と呼ばれている。太陽に遍在する磁場が重要な役割を果たしていることはわかっており、

その中でも「波動加熱」説が有力な候補に挙げられている。Alfvén 波のような散逸しにくい波動は光球から遠距離にある上空コロナまでエネルギーを伝えることができるため、X 線で観測される太陽コロナの広がり観点からも都合が良い。しかしながら、そのような波動は長年検出されてこなかった。

ところが、2006 年に太陽観測衛星「ひので」が打ち上げられると、期待されていた波動と思しき現象が発見された。太陽大気は微細な構造で構成されており、それが至るところで振動していることがわかった。プロミネンス (Okamoto et al. 2007) やスピキュール (De Pontieu et al. 2007) の観測から見つかった振動は Alfvén 波の伝播によるものと考えられる。2.5 分程度の振動周期と最大 20 km/s 程度の速度振幅を持ち、これらが進行波であるならコロナ加熱に十分なエネルギーを持っていることがわかった。しかし、これらの構造は波動の波長と同程度かそれ以下の長さしかないので、磁力線に沿った位相差の検出は非常に難しく、進行波か定在波かの区別は断定しがたい。

その後、データ取得方法や解析手法を洗練し、進行波を検出する試みがなされた (Okamoto and De Pontieu 2011)。スピキュールの撮像データを用いたこの研究では、まずスピキュール自体を自動検出し、それから波形のピーク位置の空間・時間変化を検出するためのアルゴリズムを作成した。磁力線が太陽面から鉛直に伸びているというスピキュールの形状を踏まえ、上向き進行波、下向き進行波、及びそれらが合成した定在波を分離することに成功した。それぞれの波動の存在割合や空間的・時間的分布を統計的に調べることで、スピキュールの進化と波動の発展には関連性があることがわかり、またスピキュール上端付近で波動が反射され、太陽面に戻っていることが示唆された。なお、ここで検出された波動は周期が 1 分程度の高周波波動で、輸送エネルギーの観点から 2.5 分の低周波波動の方がコロナ加熱には重要であると考えられる。

このような波動の研究は、コロナ加熱の直接的要因であるという理由だけではなく、磁場強度などの測定が困難な物理量の導出の手がかりとなる点で、非常に有用である。

本講演では、これらのひのでの結果や、最近観測が開始された太陽観測衛星 IRIS による太陽波動研究の最新情報も報告したい。

キーワード: 太陽, コロナ, 波動, ひので

Keywords: Sun, corona, wave, Hinode

放射凝縮による太陽フィラメント形成の2.5次元MHDシミュレーション 2.5D MHD Simulations of Solar Filament Formation by Condensation

金子 岳史^{1*}; 横山 央明¹
KANEKO, Takafumi^{1*}; YOKOYAMA, Takaaki¹

¹ 東京大学 地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

We investigate the formation mechanism of solar filaments by two-dimensional magnetohydrodynamic (MHD) simulations. Solar filaments are cool dense plasma clouds in the hot tenuous corona. Filaments abruptly erupt with flares, hence, they are the important objects to comprehend the explosive events in the solar atmosphere. On the other hand, their formation mechanism is still unclear as well as the mechanism for eruptions.

Filaments always appear inside the coronal arcade fields, and the cool dense plasma is sustained by the magnetic forces. Observations show that filaments are categorized as normal polarity filaments or inverse polarity filaments. The normal polarity filaments have the same polarity with the surrounding coronal magnetic fields, while the inverse polarity filaments have opposite polarity. One candidate to explain the origin of the cool dense plasma is condensation by the radiative cooling in the corona. The current condensation model can reproduce the normal polarity filaments, but not the inverse polarity filaments. We propose a new condensation model to reproduce the inverse polarity filaments, and demonstrate it by two-dimensional MHD simulations including radiative cooling, thermal conduction along the magnetic field and gravity. Our model starts from the formation of the magnetic flux rope. The relatively dense plasma at the lower corona is trapped inside the flux rope and lifted up to the upper corona. The dense plasma causes imbalance between the radiative cooling and the background heating, while the thermal conduction along the closed field line of the flux rope does not suppress the thermal imbalance. Consequently, the condensation process is triggered and the cool dense plasma is formed. We test two types of heating term (one depends on magnetic pressure and the other depends on density) and two types of formation mechanisms of the flux rope (one is the converging motion at the footpoints of the coronal arcade field and the other is the interaction between the emerging flux and the coronal arcade field). As a result, the cool dense plasma is formed inside the flux rope in every case. We also show that our model has a possibility to reproduce the density of solar filaments, which is 10 -100 times larger than that of the surrounding corona, qualitatively.

キーワード: 太陽フィラメント, プロミネンス
Keywords: solar filament, prominence

フレアアーケード上空の高温高速流の観測・計算結果の比較研究 Comparative study of Observation and Calculation of Hot Fast Flow above a Solar Flare Arcade

今田 晋亮^{1*}
IMADA, Shinsuke^{1*}

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹ Nagoya Univ. STEL

Solar flares are one of the main forces behind space weather events. However, the mechanism that drives such energetic phenomena is not fully understood. The standard eruptive flare model predicts that magnetic reconnection occurs high in the corona where hot fast flows are created. However, there is not enough observational knowledge of the physical parameters in the reconnection region. The inflow into the reconnection region, the temperature of the plasma in the reconnection region, and the temperatures and densities of the plasma jets predicted by reconnection, have not been quantitatively measured in sufficient. First, we will show a flare that occurred on the west solar limb on 2012 January 27 observed by the Hinode EUV Imaging Spectrometer (EIS) and found that the hot (~30MK) fast (>500 km s⁻¹) component was located above the flare loop and discuss how extent we understand the key-region of solar flare. Second, it is important to answer why the most observation cannot detect the predicted flow or temperature in the reconnection region. One of the reasons why we cannot observe inside the magnetic reconnection region is due to its darkness. Generally we can see the bright cusp-like structure during solar flare, although the reconnection region is faint/blind. One may think that the temperature in the reconnection region is enough higher than that of cusp-like flare loops. Thus the wavelength of emission from reconnection region is different from flare loops. However, this is not entirely true. Magnetic reconnection causes rapid heating. Thus ionization cannot reach to the equilibrium stage. We have calculated the ionization process in the down stream of Petschek type magnetic reconnection. From our result, we can clearly see that plasma cannot reach the ionization equilibrium in the down stream of slow-mode shock. The typical emissions from magnetic reconnection region are FeIX or FeXX, although the plasma temperature is equal to 40MK. The typical temperature and density of post flare loops are 10 MK and 10¹¹ /cc, and the dominant emissions from post flare loops are from FeIX to FeXXIII. Thus the wavelength of emission from reconnection region is not so much different from post flare loops. We will discuss how the emissions from reconnection region looks like by using several ionization calculations of magnetic reconnection.

キーワード: フレア, コロナ, 電離非平衡, 太陽
Keywords: flare, corona, non-equilibrium ionization, sun

Magnetic Evolutions at Extremely High Latitude Region during Polarity Reversal Observed with Hinode Magnetic Evolutions at Extremely High Latitude Region during Polarity Reversal Observed with Hinode

塩田 大幸^{1*}; 下条 圭美²; 佐古 伸治³; Kaithakkal Anjali John³; 常田 佐久⁴
SHIOTA, Daikou^{1*}; SHIMOJO, Masumi²; SAKO, Nobuharu³; KAITHAKKAL, Anjali john³; TSUNETETA, Saku⁴

¹名古屋大学太陽地球環境研究所, ²国立天文台, ³総合研究大学院大学, ⁴宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
¹STEL, Nagoya University, ²National Astronomical Observatory of Japan, ³The Graduate University for Advanced Studies,
⁴ISAS, JAXA

The magnetic field in the Sun's polar region is a key ingredient of the solar dynamo mechanism because the polar field strength at a solar minimum has a correlation with solar activity of the following cycle. The evolution processes of the polar field (its polarity reversal and its build-up after the reversal) are thought to be caused by magnetic flux transport due to meridional flow and diffusion by turbulent convection. Nevertheless, our understanding of the meridional flow and diffusion in the polar region is still poor because of many difficulties in magnetic observation near the limb.

We recorded time evolution of magnetic polarity distribution within the whole of both polar regions derived from the high-accuracy spectropolarimetric observation with Solar Optical Telescope aboard Hinode. In the north polar region, the latitudinal polarity inversion line (PIL) between the preexisting negative polarity region and transported positive polarity region migrates from 60 degrees latitude at January 2012 to 68 degrees latitude at September 2012. Then the whole of the north polar region becomes positive at September 2013. The migration speed of the PIL is 5 m s^{-1} (January - September 2012) and then becomes 8.5 m s^{-1} (September 2012 - September 2013). According to a flux transport model, the speed-up is understood as a result of a diffusion process. In contrast, the whole of the south polar region observed in March 2013 has still ample positive field. The PIL locates out of the observed region (over 67 degrees latitude).

We examined a few parameter sets of the meridional flow pattern and the diffusion coefficient with an advection-diffusion model. The observed PIL migration in the north polar region can be explained well if there is slightly strong diffusion without the meridional flow.

キーワード: 光球, 磁場, 偏光分光観測, 極性反転, ダイナモ

Keywords: photosphere, magnetic fields, spectropolarimetry, polarity reversal, dynamo

分光観測で探る黒点彩層で頻発する微細ジェットの性質 Properties of small-scale jets in a sunspot chromosphere revealed through spectroscopic observations

勝川 行雄^{1*}; 大井 瑛仁²; Reardon Kevin³; Tritschler Alexandra³
KATSUKAWA, Yukio^{1*}; OI, Akihito²; REARDON, Kevin³; TRITSCHLER, Alexandra³

¹ 国立天文台, ² 京都大学, ³ 国立太陽観測所

¹National Astronomical Observatory of Japan, ²Kyoto University, ³National Solar Observatory

High-resolution observations with HINODE Solar Optical Telescope (SOT) revealed that small-scale jets frequently occur in a sunspot chromosphere though their driving mechanism is not well understood yet because of lack of spectroscopic information, such as temperatures and Doppler velocities, in the chromospheric observations with Hinode SOT. Spectroscopic observations of the small-scale jets were attempted using an Interferometric Bidimensional Spectrometer (IBIS) at the National Solar Observatory (NSO), and suggested that temperature enhancements associated with the jets happened in the lower chromosphere though their upward flows were not clearly detected (Reardon, Tritschler, Katsukawa 2013). We've tried obtaining another spectroscopic data set of a sunspot chromosphere with better spectral resolution with IBIS, and carried out careful analysis of spectral profiles and their temporal evolution. The study shows majority of the heated plasma in the lower chromosphere has a bulk flow slower than the sound speed in the chromosphere. The spectral profiles indicate enhancements in the blue wing, which suggests a part of the heated plasma has a supersonic upflow. In addition, small temperature enhancements are also found in the upper chromosphere near the end of the duration of the jets. The supersonic upflows are possibly responsible for heating in the upper chromosphere. This study provides an important observational support for slow-mode waves as acceleration and heating mechanism in the chromospheric jets. We are going to present a new spectroscopic observation of chromospheric jets made by the Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS) spacecraft that has just started observations since 2013.

キーワード: 太陽, 彩層, ジェット, 分光観測, ひので, IRIS

Keywords: the Sun, chromosphere, jet, spectroscopy, HINODE, IRIS

抵抗性 MHD における移動する X 点を持つ高速磁気リコネクション Fast magnetic reconnection with a moving X-point in resistive MHD

三好 隆博^{1*}; 草野 完也²

MIYOSHI, Takahiro^{1*}; KUSANO, Kanya²

¹ 広島大学大学院理学研究科, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Graduate School of Science, Hiroshima University, ²STEL, Nagoya University

高磁気レイノルズ数プラズマにおける高速磁気リコネクションの物理機構の解明は、宇宙・天体プラズマ現象を理解するための未解明かつ最重要な課題の一つである。近年の高解像度の高磁気レイノルズ数磁気流体力学 (MHD) シミュレーションにより、薄化した電流シートのプラズモイド不安定性をトリガーとする磁気リコネクション過程の高速化の可能性が示されてきた [1]。特に最新のより精密な高解像度計算においては、プラズモイド不安定性による複数の 2 次的磁気リコネクションがペチェック型リコネクション的に発達する様子が観測された [2]。しかし、2 次的磁気リコネクション個々の詳細な構造やダイナミクスについては未だ不明である。

本研究では、2 次的リコネクションの移動に着目し、移動する X 点を持つ磁気リコネクションの詳細な構造とダイナミクスを明らかにすることを目的とする。特に、2 次元ハリス平衡に対して、移動する局所的異常抵抗を付与することにより、アウトフロー方向に非対称性を持つ高速磁気リコネクションモデルを導入する。HLLD 近似リーマン解法を用いた高解像度 MHD シミュレーションを実施し、非対称構造を詳細に解析した。また、磁気リコネクションにより駆動された流れによって、移動する X 点を持つ高速磁気リコネクションが自己維持的に発達する可能性についても検討した。

[1] e.g, N. F. Loureiro, et al., Phys. Plasmas, 19, 042303 (2012)

[2] K. Kusano, K. Nakabou, et al., in preparation

キーワード: 磁気リコネクション, 磁気流体力学, 異常抵抗モデル

Keywords: magnetic reconnection, MHD, anomalous resistivity model

動的ペッチェック・リコネクション Dynamical Petscheck Reconnection

草野 完也^{1*}; 中坊 孝司¹; 三好 隆博²; Vekstein Grigory³
KUSANO, Kanya^{1*}; NAKABOU, Takashi¹; MIYOSHI, Takahiro²; VEKSTEIN, Grigory³

¹名古屋大学太陽地球環境研究所, ²広島大学大学院理学研究科, ³マンチェスター大学
¹STEL, Nagoya University, ²Graduate School of Science, Hiroshima University, ³Manchester University

磁気リコネクションは様々な高温プラズマにおける爆発的なエネルギー解放機構と考えられている。しかしながら、磁気レイノルズ数 (S) が 10^{10} 以上もある太陽コロナのような高磁気レイノルズ数領域におけるリコネクションの高速化メカニズムは未だに明確に説明されていない。観測によれば太陽フレアにおけるリコネクション率は 10^{-2} 程度であるとされているが、Sweet (1958) や Parker (1963) による古典的な理論はリコネクション率が $S^{-1/2}$ で制限されることを示している。これに対して Petscheck (1964) はスローモード衝撃波を伴う高速リコネクションの定常解があることを理論的に示したが、その後の数値的研究によれば一様抵抗においては Petscheck の解は安定に維持できないことが示唆されてきた。そのため、リコネクションの高速化には局所的な異常抵抗や非 MHD 効果が不可欠であると広く考えられてきた。

こうした背景のもと、我々は高精シミュレーションによって高磁気レイノルズ数領域 ($S \sim 10^4 - 10^6$) における一様抵抗 MHD リコネクションの新たな高速化の可能性とそのメカニズムを探った。本研究では、Miyoshi and Kusano (2005) による HLLD スキームを用いてハリス解によって与えられた電流層のこれまでにない高分解 2 次元 MHD 計算を実施した。

その結果、高磁気レイノルズ数領域にこれまでに知られていない新しい高速リコネクションの解が存在することを見出した。磁気レイノルズ数が 10^4 を超えるとセカンダリ・テアリングモード不安定によって電流層の中に複数の X 点形成され、多数の磁気島 (プラズモイド) が形成される。我々はその後、磁気島が成長すると共にプラズモイド間の電流層が V 型に分岐し、分岐電流層の頂点で電流密度が強化されリコネクションが高速化することを見出した。さらにこの分岐電流層はスロー・モード・ショックに発展することを明らかにした。その結果、リコネクション率は磁気レイノルズ数に関わらず 0.05 程度まで増加した。ただし、このスロー・モード・ショックは定常的に維持されず、プラズモイドの伝搬と共に生成と崩壊を繰り返すことが分かった。これらの結果は高磁気レイノルズ数領域では、一様抵抗下においても Sweet-Parker 型の電流層からなる従来のプラズモイド・リコネクションは「動的ペッチェック型リコネクション」と呼ぶべき新しい高速リコネクションに遷移することを示している。この遷移機構の詳細を講演で議論する。

キーワード: リコネクション, ペッチェック・リコネクション, MHD, シミュレーション, スロー・ショック
Keywords: reconnection, Petscheck reconnection, MHD, simulation, slow mode shock

ペチェック型磁気リコネクションに対する熱伝導効果 Thermal conduction effect on the Petschek magnetic reconnection

河野 隼也^{1*}; 横山 央明¹
KONO, Shunya^{1*}; YOKOYAMA, Takaaki¹

¹ 東京大学

¹University of Tokyo

We simulated the magnetic reconnection including the nonlinear thermal conduction effect with two-dimensional MHD equations. Magnetic reconnection is considered to be the basic process of the solar explosive phenomena. In the atmosphere with high temperature and low density like solar corona, time-scale of the nonlinear heat conduction becomes shorter and can become comparable to the Alfvén time-scale. Thermal conduction effect should be considered. Previous studies have showed that, in the model of magnetic reconnection produced by Petschek, adiabatic slow mode shock wave generated from the localized diffusion region is dissociated into isothermal shock wave and conduction front due to the thermal conduction. However, the effect of the thermal conduction on the energy release rate in the magnetic reconnection is not explained enough in the past.

Here we investigated how the thermal conduction influences the energy conversion rate. We calculated the energy release rate in different magnitude of the magnetic diffusivity to see the dependence on the Lundquist number. As a result, due to the thermal conduction effect, adiabatic shock wave is dissociated into isothermal shock wave and conduction front and this makes temperature in the reconnection outflow jet smaller. In the outflow region with small temperature, density becomes larger. Considering mass conservation between the mass flux in the reconnection inflow and that in the outflow, inflow velocity is accelerated because of larger density in the outflow region. This causes increase of the energy release rate in the magnetic reconnection. That increase rate tends to become larger as the magnitude of magnetic diffusivity becomes smaller. Smaller magnetic diffusivity corresponds to the larger Lundquist number. In the real solar atmosphere, plasma gas has larger Lundquist number than that in this numerical simulation. This means that thermal conduction effect on the energy release rate in magnetic reconnection might become more effective in the real solar atmosphere.

キーワード: 太陽フレア, 磁気リコネクション, 熱伝導, コロナ

Keywords: solar flare, magnetic reconnection, thermal conduction, corona

Analysis on turbulent reconnection of three-dimensional resistive MHD simulation Analysis on turbulent reconnection of three-dimensional resistive MHD simulation

WANG, Shuoyang^{1*} ; YOKOYAMA, Takaaki¹ ; ISOBE, Hiroaki²
WANG, Shuoyang^{1*} ; YOKOYAMA, Takaaki¹ ; ISOBE, Hiroaki²

¹The University of Tokyo, ²Kyoto University

¹The University of Tokyo, ²Kyoto University

This study starts from a three-dimensional current sheet with random perturbation on velocity, in order to understand more on the 3D reconnection in a more general way.

Due to the periodic boundary condition, the core of current sheet quickly develops a resonance netlike pattern under tearing instability. Small reconnection site mainly form two chains on either side of the current sheet center and constitute a zigzag arrangement. The outflow from one reconnection site is fed into the counterpart on the other side thus composes a positive feedback system resembles even double tearing mode. As the inflow being enhanced, slow-mode shocks are identified along the current sheet. The conversion of the magnetic energy is further raised. Total kinetic energy of the current sheet presents 4 steps of development while first 3 exhibit linear growing tendency. At the same time, reconnection rate increases by 5 times compared with the early phase. Thus we have achieved faster reconnection without localized resistivity in a more universal idea.

磁気リコネクションの下流域におけるイオン加速機構 Ion Acceleration Mechanisms in the Exhaust Region of Magnetic Reconnection

高本 亮^{1*}; 藤本 桂三²
TAKAMOTO, Makoto^{1*}; FUJIMOTO, Keizo²

¹Max-Planck-Institute for Nuclear Physics, ² 国立天文台

¹Max-Planck-Institute for Nuclear Physics, ²National Astronomical Observatory of Japan

Magnetic reconnection is considered to be a key mechanism to convert magnetic field energy into plasma kinetic and thermal energy in various plasma phenomena, in particular, in many astrophysical systems. In collisional plasma, many works assuming magnetohydrodynamic approximation have revealed that plasma jets can be accelerated up to the upstream Alfvén velocity. However, in the case of the collisionless plasma, which is common in many astrophysical phenomena, there is still no conclusive theory of the ion acceleration mechanism and the maximum plasma jet velocity because of the complexities of plasma phenomena and the associated high numerical cost.

In this study, we performed a large-scale 2D particle-in-cell simulations with adaptive mesh refinement under an open boundary condition. The simulation was performed until the MHD condition is well-satisfied in the exhausts, which allows us to study a long-time dynamical evolution of the structure of the diffusion region and exhausts.

To analyze the detailed mechanisms of the ion acceleration in the exhausts, we also performed test particle simulations on the dynamical background plasma. We found that the ions are accelerated mainly by the electric field perpendicular to the reconnection plane. However, effects from other electric field components are not negligible;

in particular, the contribution from the electric field along the exhausts becomes significant as the ions are accelerated. We also compared the results with the velocity distribution functions inside of the exhausts.

In this talk, we present our numerical results of the particle-in-cell simulation, and discussed its physical interpretations of the structure. We also discuss the ion kinetic mechanisms leading to the formation of reconnection jets.

Keywords: magnetic reconnection, ion acceleration

磁気リコネクションのセパトリクス周辺におけるプラズマ波動と粒子加速 Waves and particle acceleration around the separatrixes of magnetic reconnection

藤本 桂三^{1*}
FUJIMOTO, Keizo^{1*}

¹ 国立天文台

¹National Astronomical Observatory of Japan

Understanding the properties of waves in magnetic reconnection is very important in collisionless plasmas. The waves can transport the momentum and energy between the different species in plasmas, which results in the anomalous magnetic dissipation, particle heating, and formation of non-thermal particles. Therefore, the wave activities relevant to the kinetic interactions can have a significant impact on the dynamical behaviour of magnetic reconnection. Theoretical modeling of waves in the reconnection region is also beneficial to reveal the reconnection dynamics using in-situ satellite observations where wave properties are obtained in much higher time resolution than plasma distribution functions.

Recent satellite observations in the Earth's magnetotail have shown that the wave activities are significantly enhanced in a broad range of frequency around the separatrixes of anti-parallel magnetic reconnection. The waves were recognized as lower hybrid waves, Langmuir waves, electrostatic solitary waves (ESWs), and whistler waves. In most cases, they were associated with cold electron beams and density cavity. However, because of the limited space-time resolutions of the observations, it has been difficult to identify the generation mechanisms of the waves and their roles in magnetic reconnection.

In this study, large-scale 2D particle-in-cell simulations with adaptive mesh refinement have been performed under an open boundary condition. The simulations use a set of more realistic parameters than those in most other simulations, achieving lower plasma beta in the upstream region that leads to stronger electron beams in the reconnection region. The wave activities are dominant in the inflow side of the separatrixes. The waves are generated mainly due to the electron beams that constitute the Hall current. The relatively weak beams before strong acceleration trigger the Buneman instability which results in the waves with a frequency of the lower hybrid range. The strong acceleration occurs along the field line due to a localized potential hump and causes the density cavity. The intense electron beams excite the electron two-stream instability and the beam driven whistler instability. The former mode gives the Langmuir waves and the flat-top electron distributions in the parallel direction, both of which have been observed frequently in the Earth's magnetotail. The latter mode, on the other hand, scatters the electrons in the perpendicular direction, forming isotropic distribution with non-thermal high-energy tail. Both the Buneman and electron two-stream instabilities evolve the ESWs in the nonlinear phases.

In this talk, we present the generation mechanisms of the waves around the separatrixes and their roles in magnetic reconnection. The mechanism of the intense electron acceleration along the field line will be discussed.

キーワード: 磁気リコネクション, プラズマ波動, 粒子加速, 粒子シミュレーション

Keywords: magnetic reconnection, plasma waves, particle acceleration, particle-in-cell simulations

持続的磁気リコネクションにおける最小空間構造 Minimum spatial scale for maintaining vigorous magnetic reconnection

清水 健矢^{1*}; 藤本 正樹²; 篠原 育²
SHIMIZU, Kenya^{1*}; FUJIMOTO, Masaki²; SHINOHARA, Iku²

¹ 東京大学, ² 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部

¹University of Tokyo, ²Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

磁気リコネクションは磁力線が繋ぎ変わることで磁気エネルギーを爆発的に解放する現象で、地球磁気圏における地磁気嵐や太陽コロナにおけるフレア現象などにおいて重要な役割を果たす。大きく見れば磁気リコネクションは、電磁流体スケールにおける現象であるが、その効率は粒子スケールの電子拡散領域に支配される。近年の粒子シミュレーションにより、リコネクションレートが準定常状態における電子拡散領域の描像が捉えられた。その中で空間的に長く伸びる電子ジェットはリコネクションレートに影響しないことが示唆されている。しかしながらリコネクションレートを維持するための空間スケールは明らかではない。本研究では初期条件及び境界条件の異なる複数の粒子シミュレーションを実行し結果を比較することで、磁気リコネクションを維持するために必要な最小の空間構造を明らかにした。周期境界条件の下では、磁気リコネクションの発展とともにジェットは長く伸びるが、リコネクションレートの減衰直前時には下流に蓄積した磁場の影響により X-line 近傍まで短くなる。短く詰まったジェット構造が磁気リコネクションを維持するための最小ジェット構造である。一方壁境界条件の下では、堅い壁に阻まれるジェットと開けた空間に伸びるジェットをもつ非対称磁気リコネクションにより、X-line の移動を誘導した。X-line の移動中はリコネクションレートは維持されるが、壁側のジェットは短く詰まった構造となる。この壁側の構造と周期境界条件の減衰直前時に見られる詰まったジェット構造はよく一致した。周期境界条件と壁境界条件における結果を合わせ最小ジェット構造を定量的に示した。また、その最小空間構造は計算領域の大きさに依存しないこと、電子質量を小さくするにつれて最小空間構造は小さくなることを示した。

キーワード: 磁気リコネクション, 電子拡散領域

Keywords: magnetic reconnection, electron diffusion region

太陽外層コロナでの磁気熱不安定性 Magnetothermal instability in the solar outer corona

横山 央明^{1*}
YOKOYAMA, Takaaki^{1*}

¹ 東京大学
¹The University of Tokyo

太陽コロナへの、磁気熱不安定 (magneto-thermal instability, MTI) の適用について検討した。磁気熱不安定は、磁場が存在する成層大気中で非等方熱伝導が効くとき生じるもので Balbus (2000) によって提案された。重力のもとで、水平磁場とガス圧とで支えられている成層大気を考える。もしこの層が、重力の向きに温度が高くなる、つまり低層が高温の場合に、この不安定が起きる。成長時間は、重力加速度を温度スケール長で割った程度になる。磁気張力が復元力として働くので、磁場はじゅうぶん弱い必要がある。

太陽コロナ中では、密度が薄く温度が高い。さらにジャイロ半径が十分小さいため、非等方熱伝導がよく効く。したがって、磁場が十分弱くかつ温度勾配が重力と同じ向きであるような環境であれば、磁気熱不安定がはたらくかもしれない。このような状況は、数太陽半径付近の上空コロナに存在する可能性がある。そこでは、温度勾配は内向きでスケール長は太陽半径程度となっている。Quataert (2008) が求めた磁場強度に対する制限条件も、状況によっては満たす可能性があると考えられる。もしこの不安定が有効にはたらけば、非常に長周期ではあるが、太陽風に対する擾乱源になりうるかもしれない。

詳しく調べてみたところ、3 太陽半径付近で最大成長になる。しかし、典型的な磁場強度に対しては成長時間・成長波長ともに大きすぎ現実的ではない。磁場が 0.1 倍であれば、太陽風中の乱流の擾乱源の振動数とほぼ調和的であった。

キーワード: 太陽, コロナ, プラズマ, 磁気流体
Keywords: Sun, corona, plasma, magnetohydrodynamics

宇宙線パーカー不安定と銀河面対称性 Cosmic-ray Parker Instability and Galactic Plane Symmetry

工藤 哲洋^{1*}; 横山 央明²; 工藤 祐己³; 松元 亮治³
KUDOH, Takahiro^{1*}; YOKOYAMA, Takaaki²; KUDOH, Yuki³; MATSUMOTO, Ryoji³

¹ 国立天文台, ² 東京大学, ³ 千葉大学

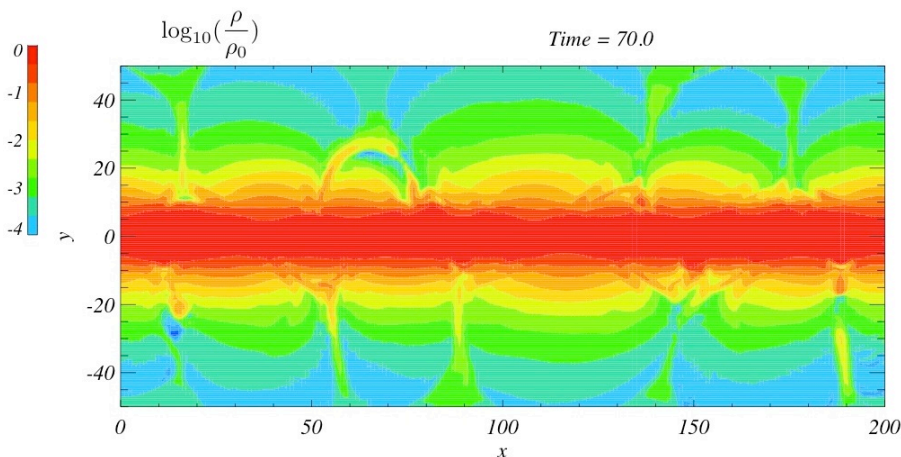
¹National Astronomical Observatory of Japan, ²University of Tokyo, ³Chiba University

宇宙線圧力を含めた2次元磁気流体力学数値シミュレーションを行い、パーカー不安定性について調べた。パーカー不安定性の研究で良く行われている銀河面対称性を仮定せずに、銀河面の上下全体を計算領域に含めて数値シミュレーションを行った。その結果、宇宙線圧力が比較的大きい場合は、銀河面に対して対称な構造もそうでない構造も同じ様に成長した。一方、宇宙線圧力が比較的小さい場合は銀河面を挟んで半波長ずれたモードが卓越した構造を形成した。この結果を線形解析の結果からも確認し、宇宙線圧力が相対的に大きくなるにつれ、対称なモードの成長率が半波長ずれたモードの成長率に近づいていくことを確認した。

非線形段階においては、宇宙線圧力が比較的大きい場合は、先に成長した磁気ループが急激に成長して大きなループに膨張し、後から成長してきた磁気ループの成長を阻害した。その結果、宇宙線圧力が比較的大きい場合は、最終的に成長した磁気ループの波長が線形成長から予想される最大成長波長よりも数倍も大きな構造となった。

非線形段階で膨張した磁気ループは、同じように膨張してきたループと上空で衝突し、密度の高い構造を形成した。図はその非線形段階における密度構造を表す。図からフィラメント状の構造やループ状の構造が見られることがわかる。このような構造と観測から示唆されている似たような構造との比較や星形成との関係が将来の重要な課題となる。

キーワード: 磁気流体力学, 星間ガス, 宇宙線
Keywords: MHD, Interstellar gas, Cosmic rays



銀河ガス円盤におけるパーカー不安定性による低温高密度ループの形成 Formation of Dense, Cold Loops by Parker Instability in Galactic Gas Disks

彭之翰^{1*}; 工藤 祐己¹; 朝比奈 雄太¹; 松元 亮治¹
PENG, Chih-han^{1*}; KUDOH, Yuki¹; ASAHINA, Yuta¹; MATSUMOTO, Ryoji¹

¹ 千葉大学大学院理学研究科

¹ Faculty of Science, Chiba University

We performed two dimensional numerical simulations of Parker instability taking into account the cooling and heating functions of the interstellar medium (Inoue et al. 2006). Our numerical experiment is based on the simulation code "CANS+" in which the HLLD Riemann solver (Miyoshi & Kusano 2005) is used to solve the MHD equations. We found that the cold, dense filaments formed at the valley of magnetic field lines by Parker instability coupled with the cooling instability are deformed into loops of dense, cold gas when the Ram pressure at the left- and right-hand side of the filament is different. The maximum number density and the lowest temperature of cold, dense filament at 100Myrs is about 200 per cubic cm and 50K, respectively. These results support the model in which thermal instability triggered in the dense region formed by Parker instability is responsible for the formation of molecular loops found in the Galactic center region (e.g., Fukui et al. 2006).

宇宙論的な銀河の落下現象：その発見、プラズマ物理学的な意味、および ASTRO-H 衛星を用いた検証 Effects of cosmological infall of galaxies: its discovery, plasma physical implications, and verification with ASTRO-H

牧島 一夫^{1*}
MAKISHIMA, Kazuo^{1*}

¹ 東京大学理学系研究科物理学専攻
¹Department of Physics, University of Tokyo

星々の集団である銀河は、数百個が重力的に集まり「銀河団」を構成する。それら銀河団は天体の階層構造の頂点をなす存在だが、それらは単なる銀河の集団ではなく、いずれの銀河団でも質量の約 85% は暗黒物質で、星々の質量はわずか数% に過ぎない。残る約 10% は X 線を放射するプラズマ (以下 ICM = Intra Cluster Medium) である。ICM は宇宙の既知のバリオンの最大の成分であり、密度は 10^3 m^{-3} 程度、温度は数千万度から 1 億度で、広がった強い熱的 X 線を放射する。この温度は暗黒物質の作る重力ポテンシャルの深さに対応するので、ICM は宇宙の構造形成のさい、断熱圧縮され高温になったと考えられる。ICM は高温で低密度なため、平均粒子間隔は $\sim 0.1 \text{ m}$ 、デバイ長は $\sim 10 \text{ km}$ 、電子平均自由行程は $\sim 10^{18} \text{ m}$ と、理想的な古典的プラズマである。そこには 10^{-10} T の磁場が存在し、プラズマ β は 100 のオーダーとなる。実験室プラズマには無い顕著な特徴として、ICM は暗黒物質の重力により安定に閉じ込められている。

銀河団の中心部では ICM の密度が高いため、宇宙年齢の間には ICM が X 線放射で冷え、圧力低下をきたすと計算される。すると周辺から ICM が重力により落下し、中心部で ICM の密度が上がってさらに冷却が進むであろう。その結果、ICM 中には「cooling flow」と呼ばれる暴走的な冷却が生じると考えられ、実際 1980 年代から、それを支持すると考えられる X 線の観測結果が続々と報告されてきた。

我々は X 線で銀河団の観測を続け、1993 年には自ら開発製作したガス蛍光比例計数管を日本 4 機目の X 線衛星「あすか」に載せて銀河団の観測を行った。その結果、銀河団の中心に向け ICM は温度低下を示すが、決して暴走的に冷えておらず、未知の加熱源があることを発見した。それを説明するため我々は、(1) 中心の巨大楕円銀河は閉じた磁気圏と開いた磁力線領域をもち、低温プラズマは磁気圏内部に閉じ込められ、(2) 銀河団空間を飛び回る銀河たち (中心銀河を除く) は ICM から抵抗を受けて ICM 中に磁気乱流を作り出し、(3) そのエネルギーが磁気波動や磁気リコネクションで低温プラズマを加熱し、(4) 二相のプラズマは太陽コロナと同じく Rosner-Tucker-Vaiana 機構で熱的に安定化され、(5) 銀河たちはエネルギーを失いポテンシャル中心に目がけ徐々に落下するはず、というプラズマ物理学的な描像を提示した (Makishima et al., Publ. Astro. Soc. Japan 53, 401, 2001)。この描像はその後、様々な形で強化され、たとえば 2009~2012 年には (1) の確証が得られた。

さらに昨年、(5) を決定づける観測結果が得られた。すなわち近傍銀河から赤方偏移 0.9 までの 34 個の銀河団を、X 線と可視光で観測した結果、近傍銀河では X 線放射 ICM に比べて銀河が中心に集中するのに対し、遠方 (つまり若い) 銀河団では、銀河が ICM 球の周辺まで分布していることが検証できたのである (Gu et al., Astrophys. J. 767, id 157, 2013)。この「宇宙論的な銀河落下現象」の発見は、単に ICM の加熱源を説明できるだけでなく、「銀河が ICM 中を運動しても両者の間には相互作用は無い」とする従来の通説を覆すインパクトをもち、さらにこれまで認識されなかった、宇宙で最大級のエネルギーの流れを発見したことを意味する。加えて、近傍の銀河団では暗黒物質よりも銀河たちは中心に強く集中し、ICM がやや広がるという既知の事実を自然に説明でき、ICM の中に太陽組成の 1/3 ほどの重元素を含むという事実も、銀河が ICM と強く相互作用することで説明できる。さらに銀河天文学で長らく謎だった「環境効果」、つまり過去より現在ほど、また銀河団の中心にゆくほど、渦巻き銀河が減り楕円銀河が増えることも、ICM との相互作用に起源を求めることができそうである。

我々は現在、2015 年の打ち上げに向け、X 線衛星 ASTRO-H を全世界的な協力で開発中である。同衛星が軌道に乗った暁には、従来より 1 桁よいエネルギー分解能を誇る軟 X 線精密分光計で、運動する銀河が ICM を局所的にひきずるドップラー効果を検出できると期待され、我々の描像がさらに決定的になると期待される。さらに我々が開発に貢献している硬 X 線イメージャーや軟ガンマ線検出器を用いることで、銀河が失った力学的エネルギーが、プラズマ加熱だけでなく粒子加速をも引き起こす可能性を、本格的に探査できるようになり、宇宙 X 線の研究領域大きく拡大すると期待される。

キーワード: 銀河と銀河団, 銀河団プラズマ, X 線放射, 磁気プラズマ過程, ASTRO-H 衛星

Keywords: galaxies and their clusters, intra-cluster medium, X-ray emission, magnetoplasma effects, ASTRO-H satellite

磁気ノズル中のプラズマ流運動量の直接計測と電気推進機の開発 Direct measurement of the plasma momentum in a magnetic nozzle helicon plasma for electric propulsion

高橋 和貴^{1*}; Charles Christine²; Boswell Rod²; 千葉 愛貴¹; 安藤 晃¹
TAKAHASHI, Kazunori^{1*}; CHARLES, Christine²; BOSWELL, Rod²; CHIBA, Aiki¹; ANDO, Akira¹

¹ 東北大学大学院工学研究科, ² オーストラリア国立大学 SP3 Laboratory

¹Department of Electrical Engineering, Tohoku University, ²Space Plasma, Power and Propulsion Laboratory, The Australian National University

The ion and electron energy distribution functions of a low-pressure, current-free helicon plasma in a magnetic nozzle configuration are experimentally investigated by electrostatic Langmuir probes including a radiofrequency compensated probe and a retarding field energy analyzer; the ions are electrostatically accelerated by a spontaneous potential drop of a double layer and/or ambipolar electric field, and only the energetic electrons can overcome the potential structure. The results indicate that the accelerated ions are spontaneously neutralized by the energetic electrons. These findings propose that the source system is applicable to an electrodeless and neutralizer-free plasma thruster.

Momentum of the plasma flow is one of essential physical parameters dominating the particle acceleration in both laboratory and space. Especially their interaction with magnetic fields have been significant subject associated with natural plasmas (astrophysical jets, magnetospheric physics, solar dynamics, aurora dynamics, etc.) and artificial plasmas (thermonuclear fusion devices, electric propulsion systems, plasma devices for material processing, etc.). The plasma momentum is equal in magnitude and opposite in direction to a thrust imparted from a plasma thruster for the electric propulsion device. The direct measurement of the thrust imparted from a magnetic nozzle helicon plasma thruster is successfully measured by using a pendulum thrust balance immersed in vacuum, where the thrust components arising from the presence of the physical boundaries and magnetic nozzle are also independently measured by attaching each component to the thrust balance. Further a laboratory experiment of a helicon plasma thruster is established to control only a plasma cross-field diffusion in a rapidly-divergent magnetic nozzle while maintaining a constant plasma injection into a magnetic nozzle. The thrust component due to a plasma pressure force inside the source cavity is constant and that due to the magnetic nozzle increases when inhibiting the cross-field diffusion in the nozzle. The latter force is well explained by an electron-diamagnetic-induced plasma momentum derived from two-dimensional momentum equations and approaches the theoretical limit derived from a one-dimensional model assuming an ideal magnetic nozzle with no plasma loss. Further a new source system approaching the ideal magnetic nozzle and the recent progress of the thruster performance will also be shown. It is noted that the above-described phenomena are occurring in current-free source system. These insights into the plasma thruster dynamics might include a common physics relating to the plasma acceleration in a non-uniform magnetic field in both the laboratory and space.

キーワード: プラズマ運動量, 磁気ノズル, ヘリコンプラズマ, 電気推進

Keywords: plasma momentum, magnetic nozzle, helicon plasma, electric propulsion

直線型磁化プラズマ装置を用いたプラズマ波動・粒子相互作用の直接観測実験 Laboratory in-situ experiments for plasma wave-particle interaction in linear magnetized plasma machine

小木曾 舜^{1*}; 加藤 雄人²; 下山 学¹; 金子 俊郎³; 文 贊鎬³; 平原 聖文¹
KOGISO, Shun^{1*}; KATO, Yuto²; SHIMOYAMA, Manabu¹; KANEKO, Toshiro³; MOON, Chanhoo³; HIRAHARA, Masafumi¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ³ 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻
¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Graduate School of Science, Tohoku University, ³Graduate School of Engineering, Tohoku University

近年、ジオスペースにおける放射線帯の高エネルギー電子の起源として、プラズマ波動と粒子の相互作用による粒子加速過程が重要な役割を担っていると考えられている。この波動・粒子相互作用の観測を目的として、電場と粒子速度の同時観測から波動・粒子間のエネルギーフラックスを算出する波動・粒子相互作用解析装置 (WPIA: Wave-Particle Interaction Analyzer) の開発が進められている。現在、我々はこの WPIA の観測手法を用いてプラズマの波動・粒子相互作用を室内実験にて直接観測する試みを行っている。

本研究は直線型磁化プラズマ装置である東北大学 Q_T -Upgrade Machine を用いて行った。 Q_T -Upgrade Machine は直径 0.2 m、長さ 4.5 m の真空チャンバーを用いた装置であり、チャンバー内の実験領域において ECR 放電による高電子温度プラズマ (~ 3 eV) と低温熱電子 (~ 0.2 eV) を重畳することで電子温度勾配 (ETG: electron temperature gradient) を形成することができる。電子温度勾配の制御により ETG モード (~ 0.5 MHz) が励起することを示した Moon et al. [Rev. Sci. Instrum., 2010] による実験では、ドリフト波モードの kHz 帯の低周波揺動も同時に励起されることが報告されている。本研究ではこの低周波揺動を対象に、チャンバー内の揺動の電場ベクトルと電流ベクトルを同時に計測し、それらのベクトルからエネルギー交換量の算出を行う。計測には、電場ベクトル計測用のツインプローブと電流ベクトル計測用のマッハプローブを組み合わせたコンビネーションプローブを新たに開発し使用した。プローブを真空チャンバー内で可動させる機構を設けることにより、チャンバーの軸方向および動径方向、方位角方向の三成分ベクトルを計測可能である。

現在は計測した電場ベクトルと電流ベクトルの内積演算から、相互作用におけるエネルギー交換量の定量的な評価を行うことを目指し、解析を進めている段階である。本講演では、コンビネーションプローブの性能評価に加え、観測された電場の揺動と電流の揺動の位相関係や、揺動の成長を捉えた過渡応答計測についての詳細な解析結果を報告する予定である。

大型レーザーを用いた無衝突ワイベル衝撃波の生成 Weibel instability mediated collisionless shock generation using large-scale laser systems

坂和 洋一^{1*}; 森田 太智¹; 蔵満 康浩²; 加藤 恒彦³; 森高 外征雄¹; 佐野 孝好¹; 富田 健太郎⁴; 松清 修一⁴; 大西 直文⁵; 水田 晃⁶; Woolsey N⁷; Gregori G⁸; Koenig M⁹; Spitkovsky A¹⁰; Huntington C¹¹; Kugland N L¹¹; Ross J S¹¹; Park H-S¹¹; Remington B¹¹; 高部 英明¹

SAKAWA, Youichi^{1*}; MORITA, Taichi¹; KURAMITSU, Yasuhiro²; KATO, Tsunehiko³; MORITAKA, Toseo¹; SANO, Takayoshi¹; TOMITA, Kentaro⁴; MATSUKIYO, Shuichi⁴; OHNISHI, Naofumi⁵; MIZUTA, Akira⁶; WOOLSEY, N⁷; GREGORI, G⁸; KOENIG, M⁹; SPITKOVSKY, A¹⁰; HUNTINGTON, C¹¹; KUGLAND, N L¹¹; ROSS, J S¹¹; PARK, H-S¹¹; REMINGTON, B¹¹; TAKABE, Hideaki¹

¹ 阪大レーザー研, ² 国立中央大学 台湾, ³ 広島大, ⁴ 九州大, ⁵ 東北大, ⁶ 理化学研究所, ⁷ ヨーク大 英国, ⁸ オックスフォード大 英国, ⁹ LULI フランス, ¹⁰ プリンストン大 米国, ¹¹ ローレンツリバモア研 米国

¹ ILE Osaka Univ, ² National Central University Taiwa, ³ Hiroshima Univ, ⁴ Kyushu Univ, ⁵ Tohoku Univ, ⁶ RIKEN, ⁷ York Univ UK, ⁸ Oxford Univ UK, ⁹ LULI France, ¹⁰ Princeton Univ USA, ¹¹ LLNL USA

Collisionless shocks are considered to be sources of high-energy particles or cosmic rays, and occur when a coulomb mean-free-path is longer than the shock-front thickness. In such plasmas wave-particle interactions and collective effects play an essential role in the shock formation. In addition to local observations of spaces plasmas by spacecraft and global emission measurements of astrophysical plasmas, a laboratory experiment can be an alternative approach to study the formation of collisionless shocks.

In this paper, we investigate the formation of Weibel-instability mediated collisionless shocks in counter-streaming plasmas produced by large-scale laser systems. Kato and Takabe investigated the collisionless Weibel shock in two-dimensional PIC simulation using the injection method [1]. A scaling-law derived in simulation revealed that high-density (electron density $\sim 10^{20}$ cm⁻³), high-flow velocity (~ 1000 km/s) plasmas are required to produce the collisionless Weibel shock. In order to achieve these plasma parameters, a MJ-class high-power laser system or the world largest laser, the NIF laser (LLNL, USA), is required. Before starting the NIF experiment, we conducted OMEGA laser (LLE, USA) experiment and measured plasma parameters such as electron and ion temperatures, electron density, and flow velocity of counter-streaming plasmas using collective Thomson scattering, and current filaments produced by the Weibel instability using proton-radiography.

[1] T. N. Kato and H. Takabe, *The Astrophys. J. Lett.* 681, L93 (2008).

キーワード: 無衝突衝撃波, ワイベル不安定性, 大型レーザー実験

Keywords: collisionless shock, weibel instability, large-scale laser experiment

激光 XII 号レーザーを用いた無衝突衝撃波の実験的研究 Experimental study on collisionless shocks with high-power laser system "Gekko-XII"

森田 太智^{1*}; 坂和 洋一¹; 石川 大志¹; 山浦 祐太¹; 佐野 孝好¹; 森高 外征雄¹; 富田 健太郎²; 下田 諒²; 佐藤 裕太²; 松清 修一²; 諫山 翔伍²; 原田 大輔²; 大山 達也²; 藤野 亮佑²; 蔵満 康浩³; 米田 仁紀¹⁰; 長嶺 和慶¹⁰; Koenig Michel⁴; Yurchak Roman⁴; Michaut Claire⁵; Woolsey Nigel⁶; Crowston Robert⁶; Pelka Alexander⁷; Li Yutong⁸; Yuan Dawei⁸; Yin Chuanlei⁸; Zhong Jiayong⁹; Zhang Kai⁹; 高部 英明¹
MORITA, Taichi^{1*}; SAKAWA, Youichi¹; ISHIKAWA, Taishi¹; YAMAURA, Yuta¹; SANO, Takayoshi¹; MORITAKA, Toseo¹; TOMITA, Kentaro²; SHIMODA, Ryo²; SATO, Yuta²; MATSUKIYO, Shuichi²; ISAYAMA, Shogo²; HARADA, Daisuke²; OYAMA, Tatsuya²; FUJINO, Ryosuke²; KURAMITSU, Yasuhiro³; YONEDA, Hiroki¹⁰; NAGAMINE, Kazuyoshi¹⁰; KOENIG, Michel⁴; YURCHAK, Roman⁴; MICHAUT, Claire⁵; WOOLSEY, Nigel⁶; CROWSTON, Robert⁶; PELKA, Alexander⁷; LI, Yutong⁸; YUAN, Dawei⁸; YIN, Chuanlei⁸; ZHONG, Jiayong⁹; ZHANG, Kai⁹; TAKABE, Hideaki¹

¹ 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, ² 九州大学, ³ 国立中央大学, ⁴ LULI, Ecole Polytechnique, ⁵ LUTH, Observatoire de Paris, ⁶ University of York, ⁷ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, ⁸ Institute of Physics, Chinese Academy of Science, ⁹ National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, ¹⁰ 電気通信大学レーザー新世代研究センター
¹ Institute of Laser Engineering, Osaka University, ² Kyushu University, ³ National Central University, ⁴ LULI, Ecole Polytechnique, ⁵ LUTH, Observatoire de Paris, ⁶ University of York, ⁷ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, ⁸ Institute of Physics, Chinese Academy of Science, ⁹ National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, ¹⁰ Institute for Laser Science, University of Electro-communications

Collisionless shocks play significant roles in particle acceleration, for example, in Earth's bow shock and Supernova remnant shocks. In collisionless shocks, collisions between particles can not account for the formation mechanism and particle-field interactions are essential. Therefore, the shock thickness is much smaller than ion-ion mean free path and a large electromagnetic field exists at the vicinity of the shock. Laboratory experiments with high-power laser systems can be alternative to observations or in-situ measurements by satellites. Collisionless shocks have been produced and investigated in counter-streaming laser-produced plasmas. To investigate collisionless shocks, the measurements of an electric or magnetic field and of fundamental plasma parameters are required. Shocks have been measured by optical diagnostics such as interferometry, shadowgraphy, optical pyrometry, and Thomson scattering to obtain the fundamental plasma parameters: density, temperature, charge state, and flow velocity. We will present recent results from series of our experiments on collisionless shocks with Gekko-XII laser system.

キーワード: 無衝突衝撃波, レーザー, プラズマ, プラズマ計測
Keywords: collisionless shock, laser, plasma, diagnostics

レーザー実験を用いた無衝突衝撃波研究の現状と課題 Current status and issues of a study on collisionless shocks by using laser experiment

松清 修一^{1*}; 坂和 洋一²; 蔵満 康浩³; 富田 健太郎¹; 森田 太智²; 山崎 了⁴; 高部 英明²
MATSUKIYO, Shuichi^{1*}; SAKAWA, Youichi²; KURAMITSU, Yasuhiro³; TOMITA, Kentaro¹; MORITA, Taichi²; YAMAZAKI, Ryo⁴; TAKABE, Hideaki²

¹九州大学, ²大阪大学, ³国立中央大学, ⁴青山学院大学

¹Kyushu University, ²Osaka University, ³National Central University, ⁴Aoyama Gakuin University

Collisionless shocks are ubiquitous in various space and astrophysical environments like a termination shock of a stellar wind, planetary bow shocks, supernova remnant shocks, etc. Recently, collisionless shocks have been able to be experimentally generated by using high power laser facilities. One of the advantages in an experimental study is that both the global and the local structures of the phenomenon are simultaneously accessible in principle, which is inherently difficult in-situ or remote sensing observations in space. However, the shocks produced in the laser experiments and the method for measuring them are quite different from those in space. A majority of the shocks produced in laser experiments are unmagnetized shocks. The methodology for measuring their local quantities in the transition region has not been established.

On the other hand, basic structures and dissipation mechanisms in an unmagnetized shock have not been well understood theoretically. So far high Mach number electrostatic shocks are thought to be generated by the counter streams of two non-identical plasmas. In this study microstructures of such electrostatic shocks are studied by using a full particle-in-cell simulation. In addition, characteristics and issues of currently adopted method of measuring local quantities in shock transition region, known as Thomson scattering measurement, are also discussed.

キーワード: 無衝突衝撃波, レーザー実験, 数値実験

Keywords: collisionless shock, laser experiment, numerical simulation

無電極電気推進のための外部電極群による磁化プラズマ内への電磁場励起過程：1次元PICシミュレーション
Electromagnetic Field Excitation in Magnetized Plasmas by External Electrodes: 1D PIC Simulation Studies

大塚 史子^{1*}; 羽田 亨¹; 篠原 俊二郎²; 谷川 隆夫³
OTSUKA, Fumiko^{1*}; HADA, Tohru¹; SHINOHARA, Shunjiro²; TANIKAWA, Takao³

¹ 九大・総理工, ² 東京農工大・工, ³ 東海大・総科研
¹Interdis. Grad. Sch. Eng. Sci., Kyushu Univ., ²Inst. Eng., TUAT, ³RIST, Tokai Univ.

無電極プラズマ電気推進では、プラズマ外部に電極群を設置することで、プラズマとの接触による電極群損耗を回避できる反面、プラズマを効率良く加速するためには、外部電磁場をプラズマ内部に効率よく励起させる必要がある。本講演では、外部電極群による磁化プラズマ内への電磁場励起過程を1次元PIC計算により議論する。電磁場励起手法として、電極板を用いた静電 (electrostatic: ES) モデルと電流アンテナを用いた電磁 (Electromagnetic: EM) モデルのふたつを検討する。ここで、1次元方向に垂直な背景磁場および低域混成周波数以下の外部周波数を選び、また粒子計算コードは VORPAL(Tech-X 社) を用いる。

ES モデルでは、プラズマ境界の電極板間の電位差により、静電場が励起される。一方、EM モデルでは、プラズマ境界のアンテナ電流に駆動された電磁波動の重ね合わせとして定在波が励起される。外部周波数の関数として、両モデルによる電場浸透度の評価を行う。また、電磁場がプラズマ内部に完全浸透する場合、ES モデルでは空間一様な電場が励起される一方、EM モデルではプラズマ半径に依存して、プラズマ境界が節や腹になる電場が励起される。プラズマ半径に依存する電磁場励起過程を議論する。

キーワード: 外部電磁場, 外部電極群, 磁化プラズマ, 電気推進, 無電極電気推進

Keywords: external electromagnetic field, external electrodes, magnetized plasmas, electric thruster, electrodeless electric thruster

荷電粒子ビーム放出を用いた衛星帯電制御の数値シミュレーション Numerical simulation of satellite potential control using charged particle beam emission

星 賢人^{1*}; 村中 崇信²; 小嶋 浩嗣³; 白井 英之⁴; 篠原 育⁵; 山川 宏³

HOSHI, Kento^{1*}; MURANAKA, Takanobu²; KOJIMA, Hirotsugu³; USUI, Hideyuki⁴; SHINOHARA, Iku⁵; YAMAKAWA, Hiroshi³

¹ 京都大学大学院工学研究科, ² 中京大学工学部電気電子工学科, ³ 京都大学生存圏研究所, ⁴ 神戸大学大学院システム情報学研究科, ⁵ 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所

¹Graduate School of Engineering Kyoto University, ²School of Engineering Chukyo University, ³Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ⁴Graduate school of system informatics Kobe University, ⁵Japan Aerospace Exploration Agency/Institute of Space and Astronautical Science

宇宙空間を飛行する人工衛星は、周辺のプラズマにより自然と帯電してしまうことが知られている。

衛星表面での帯電は放電を引き起こす一因となり搭載電子機器の故障につながると共に、衛星の電位自体が背景プラズマを加速してしまうことで、計測にも悪影響を及ぼす。そのため、通常は可能な限り帯電を抑制するように設計が行われるが、完全に帯電を抑えることは難しい。

そこで電子エミッタ・イオンエミッタを用いて衛星の帯電を緩和することで、計測結果への帯電の影響を抑える手法がよく用いられている。

人工衛星の帯電は周辺のプラズマ中のイオンや電子が衛星表面に衝突することで起こり、一般に衛星表面の電位は流入してくる電流と流出していく電流の平衡を与える点で定まる。イオン電流・電子電流・光電子電流・二次電子電流などの平衡から、日照時には一般に正に帯電し、日陰時には負に帯電する。エミッタ装置を用いて強制的に衛星から電流を流すことで、この平衡点を任意にずらし、衛星の電位を制御することが可能である。

本研究では、数値シミュレーションを用いて、様々なパラメータの下での衛星の帯電制御について検討を行った結果について報告し、どのような状況であれば任意の帯電制御が可能なのかを明らかにする。

キーワード: 衛星帯電, 宇宙機帯電, 荷電粒子ビーム

Keywords: satellite charging, spacecraft charging, charged particle beam

NICT 新太陽電波望遠鏡-II New solar radio telescope in NICT - II

久保 勇樹^{1*}; 亘 慎一¹; 石井 守¹; 石橋 弘光¹; 岩井 一正²

KUBO, Yuki^{1*}; WATARI, Shinichi¹; ISHII, Mamoru¹; ISHIBASHI, Hiromitsu¹; IWAI, Kazumasa²

¹ 情報通信研究機構, ² 国立天文台野辺山太陽電波観測所

¹National Institute of Information and Communications Technology, ²Nobeyama Solar Radio Observatory, National Astronomical Observatory of Japan

太陽電波バーストは、宇宙天気予報を行う上で監視すべき重要な現象の一つであると共に、太陽コロナ中での CME や衝撃波の伝搬、粒子加速・輸送等、コロナ中の高エネルギー現象を研究するための基礎データとしても重要である。GHz 帯で観測されるバーストは太陽フレアや太陽コロナ中で生成される高エネルギー粒子の加速・輸送過程を反映している。その高エネルギー粒子が励起するコロナ中のプラズマ波動は、モード変換を受けることで電磁波として放射され、結果として MHz 帯の太陽電波バーストとして観測される。このように、GHz 帯と MHz 帯それぞれで観測される電波バーストは、コロナ中の高エネルギー粒子を軸として密接に関連している。したがって、コロナ中での高エネルギー現象を統一的に理解するためには、GHz 帯から MHz 帯までの非常に広帯域を連続的に、しかも高時間分解能で分光観測する必要がある。しかし、GHz 帯から MHz 帯までをカバーしている太陽電波分光計は世界的に見ても少ない。現時点で、世界で最も広帯域をカバーする太陽電波分光計はスイスの Phoenix-4 であり、その帯域は 100MHz~4.0GHz、時間分解能は 125 ミリ秒であるが、フレアによる粒子加速を直接観測するには、さらに高い周波数での高時間分解能分光観測が要求される。現在、NICT では世界最高の周波数帯域 (70MHz~9.0GHz) と時間分解能 (8 ミリ秒) を持つ新太陽電波望遠鏡の開発を行っており、2014 年 3 月にアンテナの建設が完了し、テスト観測段階に入る予定となっている。本講演では、NICT で開発中の新太陽電波望遠鏡の現状を紹介する。

キーワード: 太陽電波, 太陽コロナ, 電波スペクトル計, 宇宙天気

Keywords: Solar radio waves, Solar corona, Radio spectrograph, Space weather

惑星間空間から星間媒質へ広がる宇宙空間プラズマ観測の最前線 Frontier of space plasma observations expanding from interplanetary space to interstellar medium

徳丸 宗利^{1*}
TOKUMARU, Munetoshi^{1*}

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

太陽は超音速のプラズマ流、太陽風を吹き出すことで星間媒質の中に太陽圏 (heliosphere) と呼ばれる領域を形成している。その広がりには約 100AU にも達する。太陽圏の内部ではプラズマと電磁場の相互作用を通じて太陽風の生成、衝撃波の励起・伝搬、高エネルギー粒子の加速などの興味深い物理現象が発生することから、そこは宇宙空間プラズマの実験場として様々な観測研究が展開されてきた。その一つが、惑星間空間シンチレーション (interplanetary scintillation, IPS) を使った太陽風の遠隔測定に基づいた研究である。これまでの IPS 観測からは、太陽風のグローバルな分布が太陽活動に密接に関係しながら短期・長期の時間スケールで大きく変動することが明らかになっている (Tokumaru et al., 2013)。

現在、太陽圏の観測研究には大きな展開が起こっている。その新展開の一つは、Voyager 1,2 (V1,V2) や IBEX 探査機による太陽圏境界域の探査によってもたらされた (Gurnett et al., 2013, McComas et al., 2009)。V1 は 2004 年に終端衝撃波を 94AU で通過していたが、2012 年 8 月に 121AU で太陽圏境界面 (heliopause) に達し、星間空間へ突入した。V2 は 2007 年に 83AU で終端衝撃波を通過、目下、heliopause を目指して航行中である。一方、IBEX 衛星は高エネルギー中性原子 (ENA) の撮像観測により太陽圏をとりまく大規模なリボン構造の存在が明らかになっている。これらの観測データを解釈しようとするとき不可欠となるのが、太陽圏境界域の 3 次元構造に関する情報である。先述した IPS 観測からは内部太陽圏における太陽風のグローバルな分布が得られることから、そのデータに基づいた MHD シミュレーションにより太陽圏境界域の構造を精度よく決定することができる。この IPS 観測による太陽圏シミュレーションデータを Voyager や IBEX の研究チームに提供することで、太陽圏境界域の共同研究が進められている。

もう一つの新展開は特異な太陽活動の到来によってもたらされた。今サイクルは太陽活動が過去 100 年来の低調さであり、これに伴って太陽風密度の顕著な低下や高速風・低速風の分布が従来と異なるなどの変化が起きていることが IPS 観測から判明している (Tokumaru et al., 2009, 2010, 2012)。この事実は太陽圏境界域や惑星磁気圏への影響 (宇宙天気) に関する研究において重要である他、太陽風加速機構の謎を解く手がかりを与える。また、今回の特異な太陽活動における観測結果は、17 世紀のマウンダー極小期における地球寒冷化の謎を解明する手がかりともなる。

数年後に予想される V2 の星間媒質への到達により、太陽圏を取りまく星間プラズマ雲 (Local Interstellar Cloud) について詳細な議論が可能になるだろう。太陽圏は Local Bubble と呼ばれる低密度 (但し高 β) な領域内にあり、そのプラズマ特性についてパルサー電波観測などから議論されている (Spiegel, 2009)。今後は Local Bubble と太陽圏を一体とした領域で、探査機の直接測定と地上からの電波観測を組み合わせた宇宙空間プラズマの研究が発展しゆくであろう。

キーワード: 太陽風プラズマ, 惑星間空間シンチレーション, 太陽圏, 恒星間媒質, 太陽活動周期
Keywords: solar wind plasma, interplanetary scintillation, heliosphere, interstellar medium, solar cycle

磁気圏におけるプラズマの階層構造と自己組織化 Scale hierarchy and self-organization in magnetospheric plasma

吉田 善章^{1*}
YOSHIDA, Zensho^{1*}

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科
¹ Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo

Inhomogeneous magnetic field gives rise to interesting properties of plasmas which are degenerate in homogeneous (or zero) magnetic fields. Magnetospheric plasmas, as observed commonly in the Universe, are the most simple, natural realization of strongly inhomogeneous structures created spontaneously in the vicinity of magnetic dipoles. In this talk, we describe the experimental results from a "laboratory magnetosphere" RT-1, and theoretical modeling of its spontaneous confinement.

The RT-1 device produces a magnetospheric plasma by a levitated superconducting magnet. Stable confinement (particle and energy confinement time = 0.5 s) of high-beta (local electron beta >0.7); electron temperature >10 keV plasma has been demonstrated (which are promising characteristics for an innovative concept of advanced fusion; it is also applicable as a particle trap for experimental particle physics or atomic physics). The radial profile of the electron density $n(r)$ is highly peaked. Fitting the data by a function $n(r) = n_0 r^{-p}$, we estimate $p=2.8\pm 0.4$ for a wide range of operating parameters. Multiplying $n(r)$ by the magnetic flux tube volume, we can estimate the particle number $N(r)$ in a unit magnetic-flux tube. While $n(r)$ is a steep increasing function towards the center of the dipole magnetic field, $N(r)$ is a decreasing function, hence interchange modes are stable. Whereas the simple kinetic model predicts a flat distribution of $N(r)$ [1], the model of grand-canonical equilibrium explains the observed equilibrium state [2].

Theoretically, we can describe the self-organized confinement of the magnetospheric plasma as a grand-canonical equilibrium in a "foliated phase space" of magnetized particles [3]. What makes the distribution function fundamentally different from the conventional Boltzmann distribution is the topological constraints on the phase space which limits the actual domain where the particles can occupy; the adiabatic invariants pose such constraints. Taking into account the constancy of the magnetic moment and the parallel action, we obtain a foliated phase space of coarse-grained variables, on which the invariant measure is distorted by the inhomogeneous magnetic field. The grand-canonical equilibrium has an inhomogeneous density when it is immersed in the laboratory flat space. Hence, the creation of a steep-density clump is a natural consequence of equipartition in the magnetic-coordinate phase space.

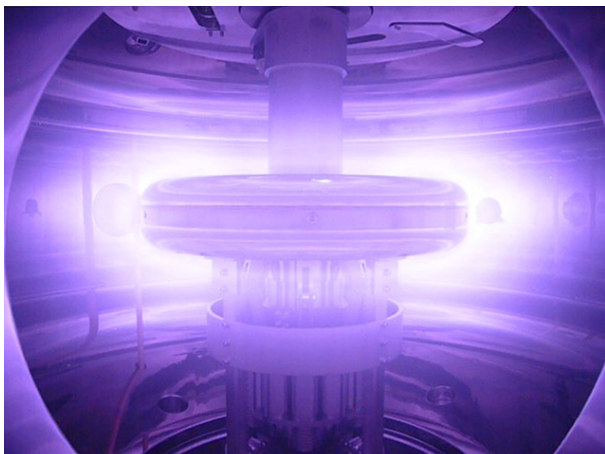
[1] A. Hasegawa, Phys. Scr. T116 (2005) 72.

[2] Z. Yoshida et al., Plasma Phys. Control. Fusion 55 (2013), 014018.

[3] Z. Yoshida and P.J. Morrison, in "Nonlinear physical systems: spectral analysis, stability and bifurcation", (ISTE and John Wiley and Sons, 2014) Chap. 18; <http://arxiv.org/abs/1303.0887>

キーワード: 内向き拡散, 断熱不変量, 葉層構造, 高ベータプラズマ, ダイポール磁場, 非中性プラズマ

Keywords: inward diffusion, adiabatic invariant, foliation, high-beta plasma, dipole magnetic field, non-neutral plasma



磁場を持たない障害物下流のウェイクへの太陽風プラズマの侵入 Solar wind plasma entry into the wake behind an unmagnetized obstacle

中川 朋子^{1*}
NAKAGAWA, Tomoko^{1*}

¹ 東北工業大学工学部情報通信工学科

¹Information and Communication Engineering, Tohoku Institute of Technology

月のように大規模な磁場構造を持たず、主として不導体で構成される障害物に太陽風が吹きつけた場合、プラズマのほとんどがその表面で吸着され、下流にはウェイクと呼ばれるプラズマ密度の薄い領域ができる。ウェイクへのイオンの侵入を考える際には、真空中へのプラズマの流入の理論が良く使われてきたが、地球軌道付近の太陽風には、バルク速度がイオンの熱速度より速く、電子の熱速度より遅いという特徴があるため、電子だけが太陽風のバルク速度に逆らって障害物の下流側に吸着することができ、下流側表面を負に帯電させる。この帯電による電場が、電子の流入を阻害しイオンを加速するため、太陽風中にできるウェイクの境界におけるプラズマの進入は、単に真空中へのプラズマ流入とは異なる様相を示すと考えられる。

帯電による電場はデバイ長の範囲内に限定されるため、デバイ長に対して大きな天体の場合は帯電を無視できると考えられがちであるが、ウェイク中は電子の密度が非常に下がっていてデバイ長自体が長いことに加え、天体の裏面までの長い距離にわたって電場による加速を受け続けるため、小さな天体よりも大きな天体のほうがむしろ、真裏にイオンが入りやすい。

本講演では、太陽風中のデバイ長に対し障害物の大きさを8倍、16倍、32倍と変えて行った帯電を入れた2次元粒子コードによるシミュレーション結果を報告する。

キーワード: ウェイク, 太陽風, 月, 帯電, デバイ長, 粒子シミュレーション

Keywords: wake, solar wind, surface charging, electron thermal speed, Debye length, particle-in-cell simulation

京コンピュータを用いた弱磁化小天体のグローバルブラソフシミュレーション Global Vlasov simulation of a small body with a magnetic anomaly with the K-computer

梅田 隆行^{1*}
UMEDA, Takayuki^{1*}

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

The interaction between a plasma flow and a small dielectric body with a weak intrinsic global magnetic field is studied by means of a five-dimensional (5D) full electromagnetic Vlasov simulation with two configuration spaces and three velocity spaces. In the present study, entry processes of ions into the nightside wake tail are examined. The simulation result shows that the bow shock and the magnetopause are formed on the dayside. However, most of solar-wind ions are reflected at the dayside magnetopause and are picked up by the interplanetary magnetic field. Then, a small part of the reflected ions are taken into the deep wake tail near the body by the E cross B cycloid motion. The present result, in which the spatial resolution is low and the Debye-scale charge separation on the dayside surface is not solved, is obtained by using a recent cluster computer system. Currently we are performing a 5D high-resolution global Vlasov simulation by using the K-computer. The direct comparison between the low- and high-resolution runs would show importance of fully kinetic global simulations.

キーワード: シミュレーション, プラズマ, 小天体, 磁気圏, ブラソフコード, 京コンピュータ
Keywords: simulation, plasma, small geophysical body, magnetosphere, Vlasov code, K computer

木星磁気圏界面位置の太陽風動圧依存性 Dependence of Jovian Magnetopause Location on Solar Wind Dynamic Pressure

北川 普崇^{1*}; 笠原 慧²; 埜 千尋³; 木村 智樹²; 藤本 正樹²
KITAGAWA, Hiroataka^{1*}; KASAHARA, Satoshi²; TAO, Chihiro³; KIMURA, Tomoki²; FUJIMOTO, Masaki²

¹ 東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ³ Institut de Recherche en Astrophysique et Planetologie

¹ Earth and Planetary Science, School of Science, University of Tokyo, ² Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ³ Research Institute in Astrophysics and Planetology

木星磁気圏は太陽風動圧の変動により大きくその大きさを変化させると考えられている。これは磁気圏界面の前面の中心からの距離の頻度分布は2こぶであると観測されていることによる。頻度分布の2こぶの間の確率は非常に小さく、木星磁気圏の大きさは太陽風動圧の大きさでどちらかの状態に分かれると考えられている。しかしその一方で木星磁気圏界面位置の太陽風動圧依存性は位置を分けるような様相を示していない。ただしその解析では磁気圏内の磁気圧で考察されており、太陽風動圧そのものではない。その解析で磁気圧を用いていたのは木星軌道において太陽風観測点が存在しない為である。そこで我々は、MHDシミュレーションを用いて地球近傍の太陽風パラメータを木星軌道まで伝播させる事により、木星磁気圏界面位置の太陽風動圧依存性を解析し、2こぶ分布の説明を目指した。本研究では、Galileo衛星のデータを太陽風動圧とともに解析した。その結果2こぶのピークは太陽風動圧の頻度分布を反映したものである可能性が高いと分かった。2状態に分かれるような分布の形状はGalileo衛星の磁気圏界面を通過する時期の太陽風動圧の頻度分布がゆがんでいることに起因している可能性が考えられると分かった。

キーワード: 木星磁気圏界面, 太陽風動圧

Keywords: Jovian Magnetopause, Solar Wind Dynamic Pressure

Pickup ion acceleration via multiple reflection between two successive CIRs Pickup ion acceleration via multiple reflection between two successive CIRs

坪内 健^{1*}
TSUBOUCHI, Ken^{1*}

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科
¹Tokyo Institute of Technology

Interstellar neutral particles, during their propagation inside the heliosphere, become ionized by the charge exchange with the solar wind (SW) plasma. The interplanetary magnetic field picks up these newborn ions, called "pickup ions" (PUIs), and carries them away into the outer heliosphere with SW. The gyrating velocity of PUIs around the magnetic field is equivalent to the SW flow speed, hundreds of km/s, which is much faster than the SW thermal velocity. This property enables PUIs to be accelerated more efficiently at the shock than the thermal SW particles. Thus PUIs are considered to be the dominant source of anomalous cosmic rays (ACRs) generated at the heliospheric termination shock.

However, the well-known diffusive shock acceleration (DSA) process alone is insufficient to raise the PUI energy up to the ACR range, typically in the order of MeV. This is because the primary PUI energy (10 keV at most) is still too low to be injected into DSA, where at least hundreds of keV is necessary. Therefore, some preacceleration should take place inside the heliosphere before SW and PUI reach the termination shock. Interplanetary shocks are the most possible source for it. In the present study, we focus on the shocks driven by the interaction of the fast SW with the ahead-flowing slow SW. The regions bounded by these shocks are called corotating interaction regions (CIRs); forward shock in the slow SW side and reverse shock in the fast SW side.

We demonstrate how particles are accelerated at this CIR system by performing hybrid simulations. The simulation results show that more efficient acceleration is identified in the PUI reflected at the shock than in those transmitted through the shock. The acceleration takes place while the PUI stays close to the shock surface. This situation is similar to the shock-drift or surfing acceleration mechanism. However, our results indicate that the acceleration is not dominant in the component transverse to the magnetic field, i.e., the direction of motional electric field. Rather, the net acceleration is confirmed in the field-aligned component. The mechanism will be discussed in terms of the characteristic of the Lorentz force balance acting on PUIs.

The periodic boundary condition applied in the present simulation virtually allows the successive appearance of two CIRs. After the reflected PUI travels the "inter-CIR" space, it encounters the shock of another CIR, where the reflection again takes place. While one reflection increases the PUI energy only a few times, this multiple reflection process yields the most energetic PUI with its maximum energy up to 100 keV, probably enough for the injection into DSA. Recent CIR observations have confirmed the presence of the energetic PUI in the solar wind between two CIRs, which may prove the present results.

超新星残骸での H α 輝線放射と非熱的 X 線放射で測定した膨張速度の差異の理論的研究 Study on The Difference Between Proper-Motion of Balmer hydrogen line emission and Non-Thermal X-Ray emission in SNRs

霜田 治朗^{1*}; 井上 剛志²; 大平 豊¹; 山崎 了¹; 添田 正信¹
SHIMODA, Jiro^{1*}; INOUE, Tsuyoshi²; OHIRA, Yutaka¹; YAMAZAKI, Ryo¹; SOEDA, Masanobu¹

¹ 青山学院大学, ² 国立天文台

¹Aoyama Gakuin University, ²National Astronomical Observatory of Japan

粒子加速の現場であると考えられている超新星残骸では、加速電子によるシンクロトロン放射や、水素原子からの H α 輝線等が観測されている。これら二つの放射の観測から、衝撃波上流の運動エネルギーをどれだけ加速粒子の生成に使ったのかが見積もられている (Helder et al. 2009)。標準的な粒子加速理論 (D.S.A.) によると加速粒子は衝撃波近傍で加速すると考えられているので、X 線シンクロトロン放射領域の移動速度を観測することで衝撃波の速度、すなわち運動エネルギーが分かる。また H α 輝線の線幅から衝撃波下流の温度が分かる。水素原子の電荷交換反応によって下流の陽子が水素原子から電子をもらい H α 輝線を放射するので、下流の陽子温度に対応した線幅をもつと考えられるためである。

しかし、これら二つの放射は同じ領域で光っているように見えるが、その移動速度は X 線シンクロトロン放射が約 6000km/s (Helder et al. 2009)、H α 輝線が約 1200km/s (Helder et al. 2013) と大きな差があるため、X 線シンクロトロン放射と H α 輝線の放射領域は実は異なる可能性がある。

本研究では衝撃波が伝搬する星間媒質の現実的非一様性によって衝撃波の伝搬速度に局所的な差が生まれ、衝撃波面の形状が波打つ効果を考える。この効果を考慮した 3 次元の MHD シミュレーション (Inoue et al. 2013) の結果を擬似的に観測することで上述の Helder et al. の結果が統合的に理解できることを示す。

キーワード: 超新星残骸, 衝撃波, 宇宙線

Keywords: supernova remnants, shock wave, cosmic ray

ジェットと星間中性水素クランプ相互作用の磁気流体シミュレーション Magnetohydrodynamic Simulations of the Interaction of a Jet with Interstellar Neutral Hydrogen Clumps

朝比奈 雄太^{1*}; 小川 崇之¹; 松元 亮治¹
ASAHINA, Yuta^{1*}; OGAWA, Takayuki¹; MATSUMOTO, Ryoji¹

¹ 千葉大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Chiba University

An astrophysical jet transfers the energy released near the gravitating object and interact with the interstellar medium. When the jet propagates in the interstellar medium interacting with its environment. We carried out magnetohydrodynamic simulations of the jet propagation in neutral hydrogen (HI) clumps taking into account the interstellar cooling. At the initial state, HI clumps are assumed to be in thermal equilibrium. As the clumps are compressed by the bow shock ahead of the jet, the shocked cloud is heated up but since the density enhancement increases cooling rate, the cloud is subsequently cooled down. As a result, cold, dense sheath is formed around the jet. The enhanced density triggers the cooling instability and prompts the formation of the cold, dense gas.

We studied the dependence of numerical results on the volume filling factor of the HI clumps. We found that when the volume filling factor is large, the propagation speed of the jet is slow and arc-shaped cold dense region is formed. When the volume filling factor is small, propagation speed does not decrease so much and dense cloud distribution is more elongated. The distribution of the cold, dense gas and the length of the jet propagation speed depend on the filling factor.

We report the application of this model to molecular clouds toward the stellar cluster Westlund 2 and TeV γ -ray source HESS J1023-575 observed by NANTEN2 and Mopra telescope. HESS J1023-575 is located between these molecular clouds. The shape of molecular cloud on the right of HESS J1023-575 is like an arc and molecular clouds on the other hand distribute linearly. The difference of the filling factor can explain the difference of the shape of these molecular clouds.

キーワード: ジェット, 星間ガス, 磁気流体

Keywords: jet, interstellar medium, magnetohydrodynamics

磁気圏型 RT-1 装置における高ベータプラズマ生成と計測器開発 High beta plasma production and their diagnostics in magnetosphere RT-1 device

西浦 正樹^{1*}; 吉田 善章¹; 齋藤 晴彦¹; 矢野 善久¹; 川面 洋平¹; 野上 智晃¹; 山崎 美由梨¹
NISHIURA, Masaki^{1*}; YOSHIDA, Zensho¹; SAITOH, Haruhiko¹; YANO, Yoshihisa¹; KAWAZURA, Yohei¹; NOGAMI, Tomoaki¹; YAMASAKI, Miyuri¹

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

¹ Graduate school of frontier sciences, The University of Tokyo

磁気圏型プラズマ装置 (ring trap 1: RT-1) は新しい概念の核融合実験装置である。実験室において真空容器内に磁気浮上させた超電導コイルによりダイポール磁場を発生させ、その磁場中に閉じ込められたプラズマの特性を理解するための研究を進めている。ここ数年、電子サイクロトロン加熱 (electron cyclotron heating: ECH) により、数 10keV の高エネルギー電子の生成やその電子が引き起こす不安定性の励起、密度分布のピーキングなど多様な現象が観測されている [1, 2]。ECH 入射パワーの増強を行い、従来の運転密度領域である 10^{17}m^{-3} を更に拡大させるための最適化実験 (ビーム偏波制御, 収束性の向上) を進めている。生成したプラズマはミリ波干渉計を用いた線平均密度計測により密度評価を行っている。その結果入射ビームの最適化により線平均密度で $6.2 \times 10^{17}\text{m}^{-3}$ かつ電子反磁性は 5.6 mWb にまで到達した。この値は磁気圧力に対するプラズマ圧力の比であるベータ値がおおよそ 100% 近くに達していると予想される。このようなプラズマに対し、密度上昇に伴う空間構造の変化や密度ピーキングを調べるためにマイクロ波反射計の整備を行い、初期結果を得ており、解析を進めている。

ECH を用いた場合、電子加熱は十分行えるがイオン温度は低い状態にある。そこで 3 ターンループアンテナを用いた遅波によるイオンサイクロトロン加熱 (ion cyclotron heating: ICH) を行っている。ECH 単独で電子密度を 10^{18}m^{-3} オーダーに上昇させた場合、加熱効率が向上し、イオン加熱によるイオン温度が向上することが期待できる。ICH によるイオン温度上昇をエネルギーアナライザーにより観測している。

ICH によるイオン加熱時により詳細なイオンの加熱情報を測定するために、イオンのエネルギーとピッチ角情報を得ることができるイオンプローブによる測定の準備を進めている。元々は核融合装置内で発生した高エネルギーイオンの損失過程を計測するために使われていたが、その手法を RT-1 プラズマのイオンのエネルギー分布測定に適用することを念頭に開発を進めている。このイオンプローブは先端に設けたピンホール、その内部に埋め込まれたシンチレータから構成されている。ピンホールからプローブヘッド内に侵入したイオンはプローブヘッド内のシンチレータ上に発光分布を作る。その発光分布を高感度な EMCCD カメラにより観測することでイオンのエネルギーとピッチ角を同時に得ることが可能になる。

発表では先に述べた RT-1 における ECH の最適化によるパラメータ領域の拡大、イオンプローブ設置に向けた進捗状況、及び今後の予定について報告する。

参考文献

[1] Z. Yoshida et al., Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 235004.

[2] H. Saitoh et al., Nucl. Fusion 51 (2011) 063034.

キーワード: プラズマ, 磁気圏, プラズマ計測, プラズマ加熱
Keywords: plasma, magnetosphere, plasma diagnostics, plasma heating

太陽風－イオンスケール磁気圏相互作用のハイブリッドシミュレーション Hybrid simulations of the interaction between the solar wind and the ion scale magnetosphere

中村 雅夫^{1*}
NAKAMURA, Masao^{1*}

¹ 大阪府立大学
¹Osaka Prefecture University

The interaction between the solar wind and the ion scale magnetosphere with a dipole magnetic field is investigated by a three-dimensional hybrid simulation. In the present study, the ion scale magnetosphere has a dayside stand-off distance which is several to a hundred times larger than the ion Larmor radius of the solar wind proton in the magnetic field strength at the dayside magnetopause boundary. The hybrid simulation treats the ions as kinetic super particles via particle-in-cell method and the electrons as a massless fluid. In the interaction between the solar wind and the magnetosphere, the interplanetary magnetic field (IMF) condition controls not only the reconnection regions but also the subsolar sheath flow due to the ion kinetic effects. Those influence the structures of the bow shock and the magnetopause boundary layer. We will also discuss the momentum transfer process from the solar wind into the magnetosphere and to the magnetized object.

キーワード: イオンスケール磁気圏, 太陽風ミニ磁気圏相互作用, 3次元ハイブリッドシミュレーション
Keywords: Ion scale magnetosphere, Interaction between solar wind and mini-magnetosphere, 3D hybrid simulation

粒子シミュレーションによる宇宙機近傍のプラズマ電磁擾乱の研究 Full PIC simulations on plasma electromagnetic disturbance in the vicinity of spacecraft

白井 英之^{1*}; 三宅 洋平¹
USUI, Hideyuki^{1*}; MIYAKE, Yohei¹

¹ 神戸大学 大学院システム情報学研究科

¹ Graduate School of System Informatics, Kobe University

人類の宇宙環境利用がますます盛んになる中、宇宙機とプラズマ (SP) の相互作用の理解が急務となっている。宇宙システムの長時間運用を保障し、また科学衛星の「その場」観測で得られる様々な情報を正しく解釈するには、この SP 相互作用の定量的な理解が不可欠となる。

宇宙環境においては、人工衛星やステーション等の宇宙機は宇宙プラズマとの接触により帯電し、その浮遊電位は衛星表面での電流バランスによって決定される。その電流は、背景プラズマの流入のみならず、衛星表面から放出される光電子や二次電子、そして、イオンエンジンに代表される電気推進器からの能動的なプラズマ噴射からなる。この衛星帯電により衛星周辺のプラズマ環境は影響を受ける。シースやウェイクと呼ばれる非一様なプラズマ領域が衛星近傍やプラズマ流下流に形成されるとともに、衛星周辺の電磁界も擾乱を受ける。これらの SP 相互作用を理解することは科学衛星によるプラズマ環境観測やそのデータ解析において重要である。なぜなら、これにより衛星観測データから衛星起源の人工擾乱の影響を分離することができるからである。また、電界センサーなど衛星搭載観測機器を設計する上で信頼できる観測データを得るには衛星近傍擾乱を最小限に抑えることが必要であるが、この擾乱状態を自己無撞着に得るために、我々は衛星筐体をシミュレーション領域に取り込んだプラズマシミュレーションを行っている。

この SP 相互作用問題を解くために、我々は EMSES プラズマ粒子シミュレーションコードを開発した。EMSES は標準的な電磁 PIC 手法をもとにし、それに衛星の金属筐体をキャパシタンス行列法によりシミュレーション内に取り込む。加えて、衛星表面からの光電子や 2 次電子放出も数値的に再現できる。これまで、EMSES を用いて GEOTAIL、BepiColombo/MMO、そして Solar Probe Plus の各衛星の環境についてシミュレーション研究を行ってきた。

本講演では、まず EMSES における宇宙機の数値的な取り扱いを簡単に紹介し、その後、EMSES を用いて行った科学衛星環境解析の事例をいくつか紹介する。まず、希薄プラズマ流中での Cluster 衛星後方に形成されるウェイク領域とその電界計測への影響に関するシミュレーション結果を紹介する。このシミュレーションでは、mm オーダーの非常に細かいワイヤーブームを数値的に取り込むことに成功し、実パラメータレベルで衛星帯電によるウェイク領域の形成、その電界計測への影響を明らかにすることができた。また、最近の研究トピックとして太陽近傍環境における SP 相互作用の EMSES シミュレーションも紹介する。強い太陽光により光電子放出量が増大し、それにより衛星表面近傍で負電位バリア領域が形成される。これにより正味の光電子量が抑制され結果として衛星は負に帯電するが、この状況での衛星電磁環境について述べる。

キーワード: 衛星プラズマ環境, 宇宙機 - プラズマ相互作用, 電磁粒子シミュレーション, 衛星帯電, 電磁擾乱

Keywords: Spacecraft plasma environment, Spacecraft-plasma interactions, Electromagnetic Particle simulation, Spacecraft charging, electromagnetic disturbance

京を用いた磁場連星中性子星合体の数値相対論シミュレーション General relativistic simulations of magnetized binary neutron star merger on K

木内 建太^{1*}; 久徳 浩太郎²; 関口 雄一郎¹; 柴田 大¹
KIUCHI, Kenta^{1*}; KYUTOKU, Koutarou²; SEKIGUCHI, Yuichiro¹; SHIBATA, Masaru¹

¹ 京都大学基礎物理学研究所, ² ウィスコンシン大学ミルウォーキー校
¹Yukawa Institute for Theoretical Physics, ²University of Wisconsin-Milwaukee

連星中性子星は、中性子星で構成される二重連星であり現在までに9個観測されている。連星中性子星は重力波放出によって、軌道エネルギーと軌道角運動量を徐々に失い、最後には合体に至る。観測されている連星中性子星の内、6個は宇宙年齢以内合体すると見積もられている。合体時に放出される重力波は2017年頃から本格稼働する地上型重力波干渉計 KAGRA や advanced LIGO, advanced VIRGO で年間10回程度観測可能であり、重力波が直接観測されれば、強重力場における一般相対性理論の検証、中性子物質の状態方程式の検証が可能になる。さらに、連星中性子星合体はショートガンマ線バーストと呼ばれる突発的高エネルギー天体現象の有力な駆動源候補であるが、重力波観測によるこの仮説の検証も可能になるかもしれない。さらに、鉄より重い元素の合成現場は超新星爆発であるというのが通説であったが、最新の超新星爆発の理論研究によるとその可能性は極めて難しくなっているため、連星中性子星合体は重元素合成の有力なサイトとして近年精力的に研究されている。

このような背景のもと、連星中性子星合体過程の理論的解明は重要な研究課題となっている。連星合体は典型的に密度が10の15乗グラム毎立方センチメートル、温度が10の10乗度に達する現象であるため、解析的取り扱いが破綻し数値モデル化が必須になる。我々のグループではこの問題に対して数値相対論を用いて取り組んでいる。数値相対論とは、一般相対性理論の基礎方程式であるアインシュタイン方程式並びに流体方程式、ニュートリノ輻射輸送を連立させて数値的に解くことで強重力場の現象を理論的に解き明かすことを目的とした研究分野である。

パルサーの観測により中性子星が一般に10の12乗程度の磁場を保持していることが観測的に確立しているが、さらに10の14乗の強磁場を持つ強磁場中性子星の存在が観測的に示唆され注目を浴びている。しかし、連星合体過程で磁場がどのような役割を果たすかは良く分かっていない。合体過程では様々な流体不安定性が磁場の増幅機構となり得るが、この種の不安定性は短波長であるため、高解像度数値シミュレーションが必須になる。既存のシミュレーションでは不安定モードを十分に解像出来ているとは言い難く、科学的結果に疑問が残る状況であった。我々はスーパーコンピュータ京を使用することで世界最高解像度のシミュレーションを実行し、連星中性子星合体過程における磁場の役割を明確にした。以下に合体過程と磁場増幅機構を項目別に記す。

(1) 連星合体時の接触面におけるケルビン-ヘルムホルツ不安定性

連星合体時には互いの星表面付近で速度差が生じるためケルビン-ヘルムホルツ不安定になる。その結果、渦が生じるが、線形解析によるとより短波長のモードが大きな成長率を持つことが分かる。磁場が存在すると渦によって磁力線が引き伸ばされるため磁場が増幅すると考えられているが、今回我々のグループはこの磁場増幅が有意に起こることを数値相対論シミュレーションで初めて示した。解像度に対する計算結果の収束性チェックを行うことで、最大磁場が合体の前後で少なくとも30倍近く増幅されることが分かった。既存のシミュレーションで用いられていた解像度では高々増幅率は数倍であり十分な解像度がないと答えを間違えることを示した。

(2) 合体後に形成される超大質量中性子星内部における磁気回転不安定性

連星合体の後、強い微分回転と熱的圧力に支えられた超大質量中性子星が過渡的に形成される。この星は磁気回転不安定性に対して不安定であるが、高密度/高角速度のため不安定モードは非常に短くなる。我々のシミュレーションでは、このモードによる磁場増幅を解像することに成功した。その結果、超大質量中性子星は10の16乗から17乗程度の強い磁場を持つことが分かった。

(3) ブラックホール降着円盤における磁気回転不安定性と質量放出

超大質量中性子星は非軸対称構造に起因する角運動量輸送と重力波による角運動量放出によって、最終的にブラックホールに重力崩壊する。降着円盤内部では磁気乱流による角運動量輸送が起こるとともに、降着円盤表面はケルビン-ヘルムホルツ不安定になる。これらの物理機構で生成された渦がエネルギーを外向きに運ぶことで、円盤風が駆動されることが分かった。

本講演ではシミュレーション結果を詳細に紹介する予定である。

有限体積マルチモーメント移流法を用いた電磁ブラソフシミュレーション Electromagnetic Vlasov simulations of magnetized plasma with a finite-volume multi-moment advection scheme

箕島 敬^{1*}; 松本 洋介²; 天野 孝伸³

MINOSHIMA, Takashi^{1*}; MATSUMOTO, Yosuke²; AMANO, Takanobu³

¹ 海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス領域, ² 千葉大学大学院理学研究科, ³ 東京大学 地球惑星科学専攻

¹Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ²Graduate School of Science, Chiba University, ³Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

The Vlasov simulation, which directly discretizes the Vlasov equation on grid points in phase space, has been proposed as an alternative method to the common Particle-In-Cell simulation, to improve the accuracy of kinetic plasma simulations. Although the electrostatic Vlasov simulations have been successfully carried out thus far, the electromagnetic Vlasov simulation of magnetized plasma is still limited, owing to numerical difficulty in solving the distribution function in velocity space.

To overcome the difficulty, we develop a new numerical scheme, specifically designed to solve the Vlasov equation in magnetized plasma. The scheme advances multiple piecewise moments of a physical profile based on their governing equations, to preserve the profile with high accuracy. The scheme allows us to perform a long-time calculation of the distribution function of magnetized plasma with small numerical diffusion.

In this talk, we first present the scheme and its performance. Then, we report the application of the scheme to two-dimensional (2D3V) electromagnetic Vlasov simulations. Long-time simulations of the linear wave propagation in magnetized plasma are conducted with quite small numerical errors. We also conduct the simulation of collisionless magnetic reconnection. The simulation resolves macroscopic structure without numerical noise, and is in good agreement with previous studies. Furthermore, the simulation resolves microscopic structure of the non-Maxwellian plasma velocity distribution around the reconnection site, e.g., acceleration by the reconnection electric field at the X-point, high energy beams around the boundary layer, and heating by the magnetic compression at the downstream. Since the simulations have been successfully carried out with the grid size much larger than the Debye length, the Vlasov simulation is a powerful technique to treat global-scale kinetic plasma phenomena.

キーワード: 移流方程式, ブラソフシミュレーション, 磁気リコネクション

Keywords: Advection equation, Vlasov simulations, Magnetic reconnection

プラズマハイブリッドシミュレーションモデルの一般化 Generalization of Plasma Hybrid Simulation Model

天野 孝伸^{1*}; 東森 一晃¹; 白川 慶介¹

AMANO, Takanobu^{1*}; HIGASHIMORI, Katsuaki¹; SHIRAKAWA, Keisuke¹

¹ 東京大学地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

宇宙プラズマの非線形現象を扱う自己無撞着な数値シミュレーションモデルとして、イオンを運動論的に扱い電子を慣性の無視できる流体として扱うハイブリッドモデルが広く用いられている。この手法は電磁流体スケールからイオンの慣性長のスケールまでを正しく取り扱うことが出来るが、一方で質量0の電子の存在を仮定しているため高周波の whistler 波の取り扱いが困難であり、このため数値的安定性に問題を抱えていた。我々は最近、ハイブリッドモデルに電子慣性効果を「適切に」組み込むことによってこの問題が解決できること、またこれによって低密度領域や真空領域の扱いが可能になることを示した。本研究ではこのモデルを更に発展させ、電子の運動論的效果を組み込む手法の可能性について議論する。

電子の運動論的效果は一般的には最も原始的な Vlasov-Maxwell 方程式を用いなければ扱うことが出来ないと考えられている。このモデルでは電磁波や Langmuir 波などの高周波の波動までが全て含まれており、特に宇宙プラズマでは多くの場合において電子のプラズマ周波数とサイクロトロン周波数は前者の方が非常に大きいため、計算量が莫大になってしまうという問題が有る。逆に考えれば、例えば電子と whistler 波とのサイクロトロン共鳴などを考える際には高周波成分による寄与は小さいと考えられ、近似的には準中性条件が成り立っているものと予想される。そこで本講演では電荷中性条件を仮定した、イオンと電子を共に運動論的に粒子として扱う手法の是非を検討する。基本方程式としては Maxwell 方程式の変位電流を無視した Vlasov-Ampere 方程式系を採用し、静電場についての Poisson 方程式は用いない。従って本モデルでは電場は通常一般化されたオームの法則に対応する方程式から決定する必要があるが、この電場の決定方程式を Vlasov-Ampere 方程式系より厳密に導出した。講演ではこの厳密な方程式を用いることによって電荷中性条件を仮定しながらも電子サイクロトロン共鳴の正しい取り扱いが可能とあることを示す。

キーワード: プラズマ, 数値シミュレーション

Keywords: plasma, numerical simulation

磁気圏 MHD シミュレーションコードの Xeon Phi に対する最適化 Optimization of Magnetohydrodynamic Simulation Code for Planetary Magnetosphere to Xeon Phi

深沢 圭一郎^{1*}

FUKAZAWA, Keiichiro^{1*}

¹九州大学情報基盤研究開発センター

¹Research Institute for Information Technology, Kyushu University

For investigating the global structures of plasma, such as the planetary magnetospheres, the Magnetohydrodynamic (MHD) equations are often used, in which full kinetics of plasma are neglected by taking the moments of the Vlasov equations. The MHD equations are highly nonlinear and are very complex to solve by hand calculations. Thus computer simulations play essential roles in studies of global magnetosphere.

The numerical MHD code for the magnetosphere has been optimized for vector-type supercomputers for a long time because the MHD code is a kind of fluid code and most of supercomputers with vector processors have high performance to solve the fluid codes in 1990's. These codes often have achieved a very high computational efficiency (the ratio of the effective performance to the theoretical performance). However, almost 100% of the "Top 500" supercomputer systems in the world adopt the massively parallel scalar type processors and more than 85% of systems consist of the x86 processor architecture in these days. The other scalar type computers are POWER and SPARC architectures. Recently the new coprocessor Xeon Phi which has many cores (~60 cores) of X86 architecture is introduced to the supercomputer system and achieved good performance of the Linpack benchmark.

In this study I evaluate the performance of MHD code for the planetary magnetosphere on the single Xeon Phi coprocessor. For the performance evaluation, I use the three-dimensional domain decomposition method and a cache-hit type of three-dimensional domain decomposition method with the flat MPI and hybrid MPI. As the results, I found that normal three-dimensional decomposition of the MHD model with the hybrid MPI is suitable for Xeon Phi coprocessor and achieved computing performance efficiency of ~7%. Furthermore, I add the optimization to the MHD code based on the Xeon Phi architecture and obtained the computing performance efficiency of almost 10% which is the double performance of FX10 single node.

NICTサイエンスクラウドを活用した高速データ処理技術によるグローバルMHDシミュレーションの流体要素追尾 A Study of Fluid Element Tracing in Global MHD Simulations via Parallel Data Processing on the NICT Science Cloud

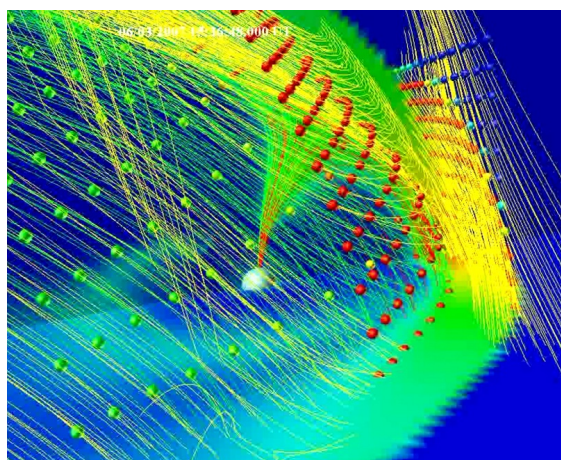
村田 健史^{1*}; 深沢 圭一郎²; 郭 智宏³; 海老原 祐輔⁴; 才田 聡子⁵; 藤田 茂⁶; 田中 高史⁷; 久保田 康文¹; 渡邊 英伸¹; 建部 修見⁸; 田中 昌宏⁸; 木村 映善⁹

MURATA, Ken T.^{1*}; FUKAZAWA, Keiichiro²; GUO, Zhihong³; EBIHARA, Yusuke⁴; SAITA, Satoko⁵; FUJITA, Shigeru⁶; TANAKA, Takashi⁷; KUBOTA, Yasubumi¹; WATANABE, Hidenobu¹; TATEBE, Osamu⁸; TANAKA, Masahiro⁸; KIMURA, Eizen⁹

¹ 情報通信研究機構, ² 九州大学, ³ 株式会社数理技研, ⁴ 京都大学, ⁵ 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構, ⁶ 気象大学校, ⁷ 九州大学宙空環境研究センター, ⁸ 筑波大学, ⁹ 愛媛大学

¹National Institute of Information and Communications Technology, ²Kyushu University, ³SURIGIKEN Co.,Ltd., ⁴Kyoto University, ⁵Research Organization of Information and Systems, ⁶Meteorological College, Japan Meteorological Agency, ⁷SERC, Kyushu University, ⁸University of Tsukuba, ⁹Ehime University

地球磁気圏と太陽風の相互作用を理解するため、3次元グローバルMHDシミュレーションを用いて研究が行われてきた。MHDシミュレーションデータを可視化する際に、磁力線の可視化は物理を理解する上で重要である。しかし精度よく磁力線を追尾し可視化することは、大規模な時系列データを処理する必要があるため困難であった。我々は大規模データを処理することができるNICTサイエンスクラウドを利用することで磁力線追尾可視化技法の開発を行ってきた。本論文ではこれまでの開発の現状について紹介する。



太陽黒点崩壊解析のための磁場の追跡モジュールの開発 Development of magnetic field tracking module for analyzing a decaying sunspot

加藤 翔大^{1*}; 今田 晋亮¹; 町田 忍¹
KATO, Shota^{1*}; IMADA, Shinsuke¹; MACHIDA, Shinobu¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

ひので衛星に搭載された可視光磁場望遠鏡 (Solar Optical Telescope: SOT) の観測データを用いて太陽表面における磁場構造を解析するために、磁気領域を自動で検出し各領域の時間変化を追跡するモジュールを開発した。このモジュールは強度、サイズ、移動距離の3つの閾値を持ち、この閾値に基づいて以下の3つの処理を行うことで磁場の時間変化を追跡する。

1. 強度閾値に基づいて磁気領域を検出する。
2. サイズ閾値により微小領域を削除する。
3. 時間変化による移動距離に基づいて同一領域を検出し追跡を行う。

単純な構造のサンプルデータを作成し追跡テストを行い、正しく追跡が行われていることを確認した。本研究では、開発したモジュールを太陽表面における磁気要素の起源の一つである黒点に適用し、黒点の崩壊過程について解析した結果を報告する。2009年12月29日から2010年1月2日まで5日間にわたって黒点を長期観測したデータを解析に用いた。本研究では、特に黒点崩壊過程の南北・東西非対称性について着目した考察結果も報告する。

キーワード: 太陽黒点, モジュール開発, 自動識別, 自動追跡
Keywords: sunspot, development of module, auto detection, auto tracking

太陽表面磁気対流の研究における、観測・数値シミュレーションデータへの画像自動認識手法の利用 Application of feature recognition technique in the investigation of magneto-convection on the solar surface

飯田 佑輔^{1*}; 堀田 英之²
IIDA, Yusuke^{1*}; HOTTA, Hideyuki²

¹宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所, ²HAO/日本学術振興会
¹ISAS/JAXA, ²High Altitude Observatory/JSPS

太陽表面における磁気対流現象に関する、画像認識手法を用いた観測・数値シミュレーションデータの解析手法とその有用性について紹介する。

太陽表面磁気対流は、太陽フレア・太陽ジェット・X線輝点といった多くの太陽表面活動現象の起因であり、その理解は太陽物理学の基本的な重要課題であるのみならず、我々の地球の最も近くに位置する恒星であるため最も詳細に観測や数値シミュレーションを行うことができる天体磁気対流現象の一つとしても、興味深い。太陽表面での磁気対流の基本要素(対流セル構造とそれにより掃き寄せられた磁極構造)は、太陽半径のスケール(70万km)に対して非常に小さく(<1,000km)、これらの統計的性質の大規模構造への寄与が重要視されている。よって、太陽表面磁気対流をその基本要素から研究するためには、このような小さな構造を十分な数捉えるようなデータを取得しなければならず、観測・数値シミュレーションの両面から困難であった。2000年台後半からの衛星観測技術と計算機技術の進歩によって、これらの問題は解決されつつあり、ようやく太陽表面磁気対流の研究は探索の緒についたところであると言える。しかしながら、実際にこれらのデータの解析を行うに際して、「磁場要素・対流要素の統計的性質を如何にして取り出すか」という新たな解析の困難に直面している。

このような中で、画像自動認識手法の利用が着目され始めている。本発表では、発表者らが開発した太陽表面磁極・対流セルの自動認識・追跡コード、それを実際の観測・数値シミュレーションデータへ適用することにより得られた磁極・対流セルの統計性質を紹介する。本研究では、画像の自動認識を利用することで、先行研究と比べて莫大な数の統計解析が可能となったことを強調したい。また、今回3学会合同セッションを通して、他分野の研究において画像自動認識手法が有効であるかについて、積極的な相互議論を行いたいと考える。

キーワード: 太陽, 磁気対流, 画像自動認識

Keywords: the Sun, magneto-convection, feature recognition

相対論的プラズマシミュレーションにおける数値チェレンコフ不安定の特徴とその抑制 On stability properties of the numerical Cherenkov instability in relativistic plasma flows

池谷 直樹^{1*}; 松本 洋介¹
IKEYA, Naoki^{1*}; MATSUMOTO, Yosuke¹

¹ 千葉大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Chiba University

相対論的な速度を持つプラズマを扱う際の有効な手法のひとつとして、PIC (Particle-In-Cell) シミュレーション法が知られている。本計算法では、電磁場はシミュレーション空間内に定義されたグリッド点に入れ子状に配置され、格子間隔や時間間隔は有限な値を持つ。その電磁場の標準解法として知られる FDTD 法による数値シミュレーションでは、差分近似による数値分散が発生し、ナイキスト波数近くになるにつれ電磁波の位相速度は光速を下回る。そのため、相対論的な流れが支配する系を扱う際に、数値チェレンコフ放射と呼ばれる数値不安定性が発生することが知られている。この問題は相対論的なプラズマに対する数値計算における重要な問題の一つであり、様々な方面からアプローチがなされてきた。一つの方法として、数値分散がないマクスウェル方程式の解析解を与える擬似スペクトル法が挙げられるが、フーリエ空間で解く必要があるため、境界条件、超並列計算において大きな制約となるといった課題が残されている。一方、差分法による方法では電流に対するデジタルフィルタリングにより強制的に高波数領域を除去する方法が使われてきたが、これは物理的な波も同時に取り除いてしまうといった問題がある。しかし、近年、差分法によるテストによって、特定のクーラン数において数値不安定の成長率が落ち、数値不安定性が抑制されるという結果が報告された (Vay et al., 2011, Godfrey & Vay, 2013)。数値チェレンコフ不安定の分散関係が導かれ、成長率が特定のクーラン数において 0 となるためであると理解されている。また、この特定のクーラン数は電磁場の数値解法に依存することも明らかになっている。

本研究では、PIC シミュレーションパッケージ pCANS を用いて、数値チェレンコフ不安定の数値実験を行い、クーラン数による不安定の成長の特性を調べた。pCANS の特徴として、マクスウェル方程式を陽的な FDTD 法に対して陰的な形で解いていることにあり、その違いによる特性の変化を調べた。数値実験では、pCANS の 2 次元コードを用いて、1 方向に相対論的な速度を持ったプラズマを与え、励起された電磁場の波数空間上における特徴と時間発展から得られた線形成長率について、各クーラン数に対する依存性を調べた。その結果、クーラン数が 1.0 の値をとるときに成長率が著しく落ちていたことが明らかになった。また、インプリシット数を $\alpha=0.5 \sim 0.51$ ($\alpha=0.5$ でクランク・ニコルソン法) まで変化させた結果、成長が抑制される範囲が 0.9~1.0 まで広がることが明らかになった。本研究によって、数値チェレンコフ放射の対処法の一つである、クーラン数を適切に選ぶことによる成長の抑制は、pCANS を用いた数値実験でも認められた。また、従来の結果において成長率の著しい低下はクーラン数が 0.5、0.7 のときに見られたが、pCANS で採用されている陰的スキームにおいては、この特徴がクーラン数が 1.0 のところで見られた。本公演では、上記の結果を踏まえた相対論的衝撃波への応用の結果も併せて報告する。

キーワード: 粒子シミュレーション, 相対論的プラズマ, 数値チェレンコフ放射, 衝撃波

Keywords: particle-in-cell simulation, relativistic plasma, numerical Cherenkov radiation, shocks

動的負荷分散技法 OhHelp を適用した電子ハイブリッドコードの性能評価 Electron hybrid code simulations with OhHelp load balancer

加藤 雄人^{1*}; 三宅 洋平²; 中島 浩³; 臼井 英之²; 大村 善治⁴

KATO, Yuto^{1*}; MIYAKE, Yohei²; NAKASHIMA, Hiroshi³; USUI, Hideyuki²; OMURA, Yoshiharu⁴

¹ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ² 神戸大学大学院システム情報学研究科, ³ 京都大学学術情報メディアセンター, ⁴ 京都大学生存圏研究所

¹Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, ²Graduate School of System Informatics, Kobe University, ³Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University, ⁴Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

A spatially one-dimensional electron hybrid code has been developed for the study of the generation process of whistler-mode chorus emissions and relativistic electron acceleration in the Earth's inner magnetosphere [1-3]. In the electron hybrid code, we treat cold electrons as a fluid and energetic electrons as particles by the Particle-in-Cell (PIC) method. Since we assume an inhomogeneous background magnetic field in the simulation system so as to treat the bounce motion of energetic electrons along a magnetic field line, the distribution of energetic electrons in the system is non-uniform and energetic electrons move around the magnetic equator assumed at the center of the simulation system. While the electron hybrid code has been parallelized through the particle decomposition method, we need to improve the scalability of the electron hybrid code so as to use a large simulation system and billions of particles for simulations under initial conditions corresponding to the real magnetosphere.

In the present study, we have developed a spatially one-dimensional electron hybrid code domain-decomposed by OhHelp [4]. The OhHelp is a library which enables us to conduct PIC simulations by achieving both dynamic load balancing and scalability. The efficiency and scalability of OhHelp have been confirmed by a 3D full PIC simulations [5]. We show the efficiency and scalability of the developed code tested on the system A (Cray XE6) of Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University. We compare the performance of the developed code and those of the code with the particle decomposition.

[1] Katoh Y., Y. Omura, Computer simulation of chorus wave generation in the Earth's inner magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L03102, doi:10.1029/2006GL028594, 2007.

[2] Katoh, Y., Y. Omura, and D. Summers, Rapid energization of radiation belt electrons by nonlinear wave trapping, *Ann. Geophys.*, 26, 3451-3456, 2008.

[3] Katoh, Y. and Y. Omura, Effect of the background magnetic field inhomogeneity on generation processes of whistler-mode chorus and hiss-like broadband emissions, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 4189-4198, doi:10.1002/jgra.50395, 2013.

[4] Nakashima, H., Y. Miyake, H. Usui, and Y. Omura, OhHelp: A Scalable Domain-Decomposing Dynamic Load Balancing for Particle-in-Cell Simulations, *Proc. 23rd Intl. Conf. Supercomputing*, 90-99, 2009.

[5] Miyake, Y., H. Usui, and H. Nakashima, Development of a Scalable PIC Simulator and Its Application to Spacecraft-Plasma Interaction Problems, *Proc. JSST 2012, OS6-8*, pp. 262-267, 2012.

キーワード: 動的負荷分散技法, 粒子コード

Keywords: dynamic load balancer, PIC simulation

静止衛星及び低軌道衛星による対流圏NO₂観測を想定した地表面BRDFの影響に関する研究
Effect of Surface BRDF on the Geostationary and Low Orbit Observations of Tropospheric NO₂

野口 克行^{1*}; リヒター アンドレアス²; ロザノフ ラジミール²; ロザノフ アレクセイ²; バローズ ジョン²; 入江 仁士³
; 北 和之⁴
NOGUCHI, Katsuyuki^{1*}; RICHTER, Andreas²; ROZANOV, Vladimir²; ROZANOV, Alexei²; BURROWS, John²; IRIE, Hitoshi³; KITA, Kazuyuki⁴

¹ 奈良女子大学, ² ブレーメン大学, ³ 千葉大学, ⁴ 茨城大学

¹Nara Women's University, ²University of Bremen, ³Chiba University, ⁴Ibaragi University

We investigated the effect of surface reflectance anisotropy, Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF), on geostationary and low orbit satellites' retrievals of tropospheric NO₂. We first develop an empirical model of the three BRDF coefficients for each land cover type over Tokyo, and then apply the model to the calculation of land cover type dependent AMFs and BAMFs. Results show that the variability of AMF among the land types is up to several tens percent, and if we neglect the reflectance anisotropy, the difference from BRDF's AMF reaches 10% or more. The evaluation of the BAMFs calculated shows that not to consider variations in BRDF will cause large errors if the concentration of NO₂ is high close to the surface, although the importance of BRDF for AMFs decreases for large AOD.

パッシブレーダの研究開発—地上デジタル放送波を用いた水蒸気推定手法の開発— R&D of passive radar -Water vapor estimation with digital terrestrial broadcasting wave-

川村 誠治^{1*}; 太田 弘毅¹; 花土 弘¹
KAWAMURA, Seiji^{1*}; OHTA, Hiroki¹; HANADO, Hiroshi¹

¹ 情報通信研究機構

¹National Institute of Information and Communications Technology

パッシブレーダとは、自ら電波を放射する従来型レーダとは異なり、他の目的で既に使用されている電波を利用して何がしか有効な情報を得るレーダシステムである。新たな周波数を必要としないため究極の周波数有効利用といえる。情報通信研究機構 (NICT) では、これまで蓄積されてきたリモートセンシングの技術、特にバイスタティック受信技術の延長としてパッシブレーダを捉え、環境計測を目的としたパッシブレーダ開発を進めている。

本研究では、パッシブレーダ開発の一環として地上デジタル放送波を用いた水蒸気推定手法の開発を行っている。近年都市部で局地的大雨等の局所的で激しい気象現象が多発しているが、現状その予測は困難である。予測が困難である主要な原因の一つに、観測の欠如が挙げられる。雨の元である水蒸気の情報には降雨予測に非常に重要だが、その観測手段は未だ限られている。現在有効な水蒸気観測手段として GPS を用いた手法があるが、空間スケール数 km で時々刻々変化する局地的大雨の予測には分解能が不足している。本研究では、空間分解能数 km、時間分解能 30 秒程度で面的に広範囲の水蒸気を常時モニターするシステムの開発を目指している。

電波は伝搬の過程で水蒸気による遅延を受ける。この遅延量が計測できれば、伝搬路上の水蒸気積算値を推定することができる。例えば伝搬距離が 10 km の場合、相対湿度 20 % と 100 % では遅延時間差が約 2.7 ns である。有効な観測のためにはサブナノ秒の精度で遅延時間を精密測定する必要がある。地デジ波は OFDM 方式で符号化されており、その中には既知信号が埋め込まれている。既知信号から複素遅延プロファイルを算出しその位相を用いることで、原理的には約 4.5 ms 毎に伝搬遅延を高精度 (ピコ秒オーダー) に求めることが可能である。

サブナノ秒の精度を議論する場合、電波塔 (スカイツリー) 側、受信局側のそれぞれの局発の位相変動が大きな誤差要因となる。そこで、スカイツリーを含む直線上に 2 つの受信点を設け、それぞれで遅延時間を測定する。この測定値にはスカイツリーと受信局それぞれの局発の位相変動が含まれているが、両者の差を取ることでスカイツリー側の位相変動を相殺することができる。残った 2 地点間の位相変動差を同期により相殺することで、水蒸気量を推定する。

地デジ波を受信し、リアルタイムで遅延量 (遅延プロファイルの位相) を測定するシステムをソフトウェア無線の技術を用いて開発した。本システムにより、地デジ波を受信するだけで放送局の局発の位相変動までリアルタイムで測定できるようになった。この測定システムをスカイツリーを含む直線上の 2 地点に配置してそれぞれの局発を同期させれば、2 地点間の水蒸気量に相当する遅延量を求めることができる。現在同期手法について検討を進め、実証実験を計画している。水蒸気推定の実証ができれば、装置の小型化を進め、多点展開を行っていく予定である。他観測やデータ同化と連携し、実用システムの構築を目指す。

キーワード: パッシブレーダ, 地上デジタル放送波, 水蒸気, 伝搬遅延

Keywords: passive radar, digital terrestrial broadcasting wave, water vapor, propagation delay

隣接した2基の1.3 GHz ウィンドプロファイラレーダーによる福井県嶺北地方における局地循環の観測 Observation of local circulation in north area of Fukui prefecture by using two adjoining 1.3-GHz wind profiler radars

中城 智之^{1*}; 山本 真之²; 青山 隆司¹; 橋口 浩之²; 宇治橋 康行³
NAKAJO, Tomoyuki^{1*}; YAMAMOTO, Masayuki²; AOYAMA, Takashi¹; HASHIGUCHI, Hiroyuki²; UJIHASHI, Yasuyuki³

¹ 福井工業大学 電気電子情報工学科, ² 京都大学生存圏研究所, ³ 福井工業大学 建築生活環境学科
¹Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Fukui University of Technology, ²Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ³Department of Architecture and Environmental Engineering, Fukui University of Technology

私達の生活様式が引き起こす地球規模の環境変動の私達への影響が懸念されるようになって久しい。大気関係では、近年、頻度と被害の大きさが増加傾向にある豪雨は、地球温暖化との関係が指摘されている。また、大気汚染物質の問題では、黄砂やPM2.5に代表される微小粒子状物質による健康被害に加え、解決済みと思われてきた光化学オキシダントの濃度が1980年代以降、全国的に再び増加に向かっていることが知られている。さらには、2011年に発生した福島第一原子力発電所の事故以降、放射能の拡散状況に世界的な関心が向けられている。これらの大気環境問題の解決のために、その実態を明確に把握することが求められている。

これらの大気環境問題は地球規模であると同時に局所的でもある。すなわち、豪雨の発生や大気汚染物質の拡散は、地形などの地域毎の特徴によって異なって発生する風系、いわゆる局地循環の影響を強く受ける。局地循環が卓越する高度は地表から数km以下の大気境界層であり、代表的な局地循環として、地表温度のコントラストに伴って発生する海陸風や山谷風が知られている。大気境界層は、地表との摩擦や地表からの熱輸送の影響によって発生する大気乱流が支配的な大気層であり、その実態は地域ごとに大きく異なる。したがって、上記の大気環境問題の解明には、地域毎に局地循環の特徴を明らかにすることが必要不可欠である。

このような背景の下、福井工業大学では文部科学省の戦略的研究基盤形成支援事業「北陸地域の環境の計測と保全に関する研究拠点形成」プロジェクト(平成23-27年度)において、福井県沿岸域に立地する福井工業大学あわらキャンパスに1.3GHzウィンドプロファイラレーダー(Wind Profiler Radar; WPR)が設置され、福井平野における局地循環の実態を把握することを目的として2012年12月から連続観測を実施している。

これまでの観測から、福井平野における海陸風循環の時間変化および高度構造の詳細が明らかとなった。また、日射の影響で海陸風循環が恒常的に発生しており、雲の発生に影響を及ぼしている事、さらに、直線距離で24kmの極めて近距離にある気象庁WINDAS福井局との比較から、海陸風循環が海岸線方向および内陸方向に数10kmの水平スケールで発生しており、しばしば3層構造となる事が明確となった。これらの事は気象学的には基本的な事柄であるが、福井県嶺北地方において海陸風循環の空間的・時間的実態をこれほど詳細に示した例は他にない。また、WINDAS福井局との比較では、高度約1km以下の下層において、24kmの近距離であっても異なる水平風がしばしば観測される。この事は、大気境界層の観測の重要性を改めて示している。

また、台風17号に伴う停滞前線の通過によって、福井県嶺北地方の広い範囲で14時から16時にかけて豪雨を観測した2013年9月3日の観測データについて解析を行った。その結果、13時頃の停滞前線の通過に伴う典型的な水平風の変化が検出された。WINDAS福井局でも同様の水平風が観測されており、本学WPRで観測された水平風構造の妥当性が裏付けられると同時に、前線通過に伴う広範囲に存在する風系であることが確認された。

本学WPRでは前線通過時刻(13時頃)の7時間前から、1m/sに達する比較的強い上昇流が高度200mの下層から高度4~5kmまでの広い範囲で断続的に発生していたことが確認された。さらに、豪雨が嶺北地方各地で観測され始めた14時の2時間前に、高度4~5kmにおいて短時間ではあるが、4m/sにも達する極めて強い上昇流が観測された。同日のMTSATでは、午前中から豪雨の発生した時間帯にかけて、光学的に厚い雲が福井県嶺北地方に収束する様子が確認されており、観測された上昇流は福井県嶺北地方に豪雨をもたらした積乱雲システムの一部であると推測される。

一方、WINDAS福井局ではこれほど顕著な上昇流は観測されておらず、豪雨時における上昇流の水平スケールが、本学WPRとWINDAS福井局間の直線距離24kmよりも小さいことが強く示唆された。すなわち、豪雨発生予測の観点からは、隣接した複数のWPRによる観測によって、豪雨の原因となる積乱雲システム到来の前兆である下層の上昇流を効率よく検出可能となると考えられる。

本研究で得られた成果は、近接した複数のWPRによる局地循環観測が局所的な気象予測の精度向上や豪雨の発生予測に極めて有効なツールであり得ることを強く示唆している。

キーワード: 大気境界層, 局地循環, 海陸風循環, 豪雨, ウィンドプロファイラレーダー

PEM36-03

会場:312

時間:4月28日 09:30-09:45

Keywords: atmospheric boundary layer, local circulation, sea and land breeze, heavy rain, wind profiler radar

冬季北極域の中層大気擾乱と太陽活動度との関係 Relationship between solar activity and disturbance in the middle atmosphere during Arctic winter

坂野井 和代^{1*}; 木下 武也²; 村山 泰啓²
SAKANOI, Kazuyo^{1*}; KINOSHITA, Takenari²; MURAYAMA, Yasuhiro²

¹ 駒澤大学, ² 情報通信研究機構

¹ Komazawa Univ., ² National Institute of Information and Communications Technology

本研究は、冬季北極域における代表的な擾乱現象である成層圏突然昇温を、中間圏まで含めた中層大気全体の擾乱として捉え、その擾乱について太陽活動度との関係を解明することを目的としている。成層圏突然昇温と太陽活動度との関連は、太陽活動 11 年周期による成層圏の熱的構造の変調として、成層圏領域では研究が進んでいる。冬季北極域成層圏の代表的な熱的構造は、北半球環状モード (Northern hemisphere Annular Mode: NAM) と呼ばれるパターンを示し、極域が低温・中緯度域が高温となる正のモードとその逆パターンとなる負のモードに分類される。Labitzke(2005) は、北極域・中緯度の上部成層圏温度と F10.7 index の相関を、QBO の位相に分けて比較し、QBO 西 (東) 風位相時には、太陽活動極大で負 (正) の NAM、極小で正 (負) の NAM となることを示した。

本発表では、中層大気擾乱と太陽活動度を定量的に比較するための準備として、気象全球客観解析データ (英国 Met Office が提供する UKMO データおよび NASA が提供する MERRA データ) を用いて、中間圏まで含めた中層大気擾乱の程度を指標化することを試みている。

まず始めに、UKMO データ帯状平均東西風の東風領域 (成層圏突然昇温時に対応) の、最低高度を指標として使うことを検討した。日々の帯状平均東西風データから、高度 15km 以上の範囲において、東風となっている高度領域の最低高度を抽出、それぞれのイベントでその抽出した最低高度を平均し、1つのイベントに対して1つの指標 (今後、この指標を ZEW index とする) を作成した。導出した ZEW index を QBO の東風位相と西風位相に分けて、太陽活動度 (F10.7 index) との相関図を作成した。この結果、おおむね ZEW index < 35 が大昇温に対応し、ZEW index 伝統的な成層圏突然昇温の分類に対応した擾乱度を定量的に表す指標としては使えそうであることを確認した。

次に、1000~0.1hPa (約 65km 高度) の高度において AO index を計算し、中間圏まで含めた中層大気全体の擾乱度を表す指標として使用できるか検討を始めた。10hPa より高高度で AO index を用いた研究は例がなく、慎重な検討を必要とするが、以下のようなことが明らかになった。中層大気での AO index の値のピークは、0.5hPa (~50km) にある。100hPa - 0.1hPa において AO index の正負はほぼ一致するが、ときおり 10hPa の上下で正負が異なる場合もある。AO index の負のピーク値が大きいことと、大昇温とは対応しない、また負の領域が 10hPa 以下まで達していることも、必ずしも大昇温とは対応しない。今後は、これら2つの指標 (ZEW index および AO index) の比較および、中層大気擾乱と太陽活動度との関係を調べていく予定である。ただし、AO index の計算において、現在は海面気圧から導出される AO パターンを基にしているが、成層圏/中間圏の AO パターンは、海面気圧から導出される AO のパターンとは多少異なる可能性が高いため、成層圏/中間圏のジオポテンシャル高度偏差場から主成分分析の第一モードを計算して AO index を計算し、2つの結果を比較する必要がある。特に SSW イベント時に、10hPa 高度以上で、AO の示す循環パターンを詳細に確認することが重要であると思われる。また伝統的に使用されている昇温の分類と、10hPa 高度以上の AO index の関係は、さらに解析期間を増やして検討を続ける。

キーワード: 中層大気擾乱, 太陽活動, 北極振動, 成層圏準 2 年周期振動, 北極域, 成層圏突然昇温

Keywords: Middle atmosphere disturbance, Solar activity, Arctic Oscillation, QBO, Arctic region, Stratospheric sudden warming

ミリ波分光放射計によって観測された昭和基地上空の中層大気中におけるO₃とNOの時間変動

Temporal variations of O₃ and NO in the middle atmosphere above Syowa Station observed by a millimeter-wave radiometer

大山 博史^{1*}; 磯野 靖子¹; 上村 美久¹; 長濱 智生¹; 水野 亮¹; 堤 雅基²; 江尻 省²; 中村 卓司²
OHYAMA, Hirofumi^{1*}; ISONO, Yasuko¹; UEMURA, Miku¹; NAGAHAMA, Tomoo¹; MIZUNO, Akira¹; TSUTSUMI, Masaki²; EJIRI, Mitsumu²; NAKAMURA, Takuji²

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 国立極地研究所

¹Solar-Terrestrial Environmental Laboratory, Nagoya University, ²National Institute of Polar Research

Precipitation of energetic particle into the atmosphere impacts abundances of atmospheric constituents in the middle atmosphere. Highly energetic solar protons, which directly enter the middle atmosphere, cause increase of HO_x and NO_x species. Energetic electrons also increase NO_x in the thermosphere, and the downward transport in the polar vortex moves the produced NO_x to lower altitudes. These NO_x species cause a decrease of O₃ in the middle atmosphere through catalytic reactions [Seppälä et al. 2006; Daae et al., 2012]. To investigate the effect of NO_x on O₃ variation in the polar region, a ground-based millimeter-wave spectroscopic radiometer was installed at Syowa Station, Antarctica in March 2011. The instrument has recorded brightness temperature spectra of rotational emission from the atmospheric O₃ and NO molecules. From the NO spectra, both multiple short-term enhancements and seasonal variation of NO column are observed [Isono et al., 2014]. The short-term enhancements are correlated with the energetic particle precipitation. In the present study, O₃ profiles are retrieved from the brightness temperature spectra between 238.94-239.24 GHz, whose spectral range has sensitivity to the O₃ abundance between 20 and 70 km. The optimal estimation scheme is used for the O₃ profile retrieval, along with radiative transfer calculation through the use of the NCEP reanalysis data and spectroscopic parameters. Since the O₃ spectra are integrated over 1 hour every 6 hours, we usually derive four O₃ profiles in a day. We present the result of O₃ retrieval and discuss how the O₃ mixing ratios at given altitudes response to the short-term NO column enhancement.

キーワード: オゾン, 一酸化窒素, 遠隔計測

Keywords: ozone, nitric oxide, remote sensing

第VIII期南極重点研究観測における高機能ライダーの現状 Current status of Syowa lidar project in the prioritized observation project for VIII-th term JARE

江尻省^{1*}; 津田卓雄¹; 西山尚典¹; 阿保真²; 富川喜弘¹; 鈴木秀彦³; 川原琢也⁴; 堤雅基¹; 中村卓司¹
EJIRI, Mitsumu K.^{1*}; TSUDA, Takuo¹; NISHIYAMA, Takanori¹; ABO, Makoto²; TOMIKAWA, Yoshihiro¹; SUZUKI,
Hidehiko³; KAWAHARA, Takuya⁴; TSUTSUMI, Masaki¹; NAKAMURA, Takuji¹

¹ 国立極地研究所, ² 首都大学東京大学院システムデザイン研究科, ³ 立教大学理学部, ⁴ 信州大学工学部
¹National Institute of Polar Research, ²Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University, ³College of Science,
Rikkyo university, ⁴Faculty of Engineering, Shinshu University

国立極地研究所は、2010年より6年間のプロジェクトとして第VIII期重点研究観測「南極域から探る地球温暖化」を推進している。中層・超高層大気観測研究は、その中のサブテーマIに位置付けられており、地表から超高層大気にいたる大気の変動をとらえる計画で、これまでに継続観測してきた各種レーザー・光学観測機器に加えて、第VIII期で新たに大型のレーザーやライダーなどの測器の開発・導入・観測を進めている。ライダープロジェクトとして、現在、南極昭和基地(69S, 39E)に設置しているレイリー/ラマンライダーは、Nd:YAGレーザーの三倍高調波を用いた355nmのライダーで、受信望遠鏡には82cmのナスミスカセグレン望遠鏡と35cmのシュミットカセグレン望遠鏡を用いている。受信チャンネルは、レイリー散乱に感度を変えた3チャンネルと、386nmの窒素振動ラマン散乱に1チャンネルを持ち、2011年2月から対流圏上部と中層大気(<70-80 km)の温度の鉛直分布を観測している。現在までに350晩以上の観測を行い、3000時間以上の温度データを取得しており、昭和基地上空の、複数の極成層圏雲(PSC)や極中間圏雲(PMC)の信号を取得している。また、観測高度をさらに上空、超高層大気にまで広げ、より高高度での大気重力波の活動や、オーロラ活動に伴うイオン化学反応を介した大気微量成分の組成変動など、超高層大気中の様々な力学・化学過程を通じた大気の変動をとらえるべく、国内で波長可変共鳴散乱ライダーの開発を進めている。送信系には波長可変のアレキサンドライト・レーザーと第2高調波発生器を用いており、インジェクションシーダーの波長を波長計で制御することで、基本波として768-788 nm、第2高調波として384-394 nmのうち任意の波長のレーザーパルスを得ることが出来る。これにより南極昭和基地において、カリウム原子(770 nm)、鉄原子(386 nm)、カルシウムイオン(393 nm)、窒素イオン(390-391 nm)の原子とイオンを狙って、高度80 km以上の大気温度、原子やイオンの高度分布などを測定する計画である。この波長可変共鳴散乱ライダーシステムは現在、国内で開発・改良を行いながら、金属原子密度及び、温度の観測試験を行っている。試験観測では、レーザーパルスの出力~120-160 mJ/pulse、繰返し周波数は約25 Hzで送信し、35 cmのシュミットカセグレン望遠鏡で散乱光を受信した。本講演では、南極昭和基地でのレイリー/ラマンライダーによる最近の観測結果、国内での共鳴散乱ライダーシステム開発と観測試験の状況、および今後の計画について紹介する。

キーワード: ライダー, 南極観測, 中層・超高層大気, 共鳴散乱, レイリー散乱, ラマン散乱

Keywords: Lidar, Antarctic observation, middle and upper atmosphere, Resonance scattering, Rayleigh scattering, Raman scattering

昭和基地レイリー/ラマンライダーの狭帯域化による極中間圏雲の昼間観測 A daytime observation of polar mesospheric clouds with Syowa Rayleigh Raman lidar system equipped with a new etalon unit

鈴木 秀彦^{1*}; 中村 卓司²; 江尻 省²; 阿保 真³; 山本 晃寛⁴; 川原 琢也⁴; 富川 喜弘²; 堤 雅基²; 津田 卓雄²; 西山 尚典²
SUZUKI, Hidehiko^{1*}; NAKAMURA, Takuji²; EJIRI, Mitsumu²; ABO, Makoto³; YAMAMOTO, Akihiro⁴; KAWAHARA, Taku d⁴; TOMIKAWA, Yoshihiro²; TSUTSUMI, Masaki²; TSUDA, Takuo²; NISHIYAMA, Takanori²

¹ 立教大学, ² 国立極地研究所, ³ 首都大学東京, ⁴ 信州大学

¹Rikkyo University, ²National Institute of Polar Research, ³Tokyo Metropolitan University, ⁴Shinshu University

2011年2月に第52次南極地域観測隊(JARE52)によって、対流圏から上部中間圏までの大気温度鉛直分布観測が可能なレイリー/ラマンライダーが昭和基地に導入され、2014年2月現在に至るまで順調に運用が行われている。本装置では、ファーストライトとなる2011年2月4日に、昭和基地では初となるライダーによる極中間圏雲(PMC)の検出に成功している[Suzuki et al., 2013]。しかし、本装置は冬期の夜間観測をメインターゲットとしたものであり、背景光由来のショットノイズの影響を強く受けてしまう昼間の観測は不可能であった。そのため、白夜期を中心に最盛期を迎えるPMCの観測は難しく、Suzuki et al. [2013]での報告も、PMC発生期間の終期にあたる2月の暗夜時間帯に得られた1例を示すのみとなっている。そこで、我々は、JARE55の夏期観測期間以降(2013年12月下旬?)のPMC観測を本格的に実施するために、背景光強度を大幅に削減可能な狭帯域エタロンユニットを開発し、昭和レイリー/ラマンライダーに導入した。本発表では、エタロンユニット導入後のライダーシステムによって昼間の検出に成功した昭和基地上空の極中間圏雲について速報する。

キーワード: 極中間圏雲, 夜光雲, ライダー, 南極

Keywords: polar mesospheric cloud, noctilucent cloud, lidar, Antarctic

トロムソ上空でオーロラ擾乱時に観測されたスボラディックナトリウム層の生成・維持機構の解明 Study on generation and sustaining mechanism for an SSL during a night of high auroral activity above Tromsø

高橋 透^{1*}; 野澤 悟徳¹; 津田 卓雄²; 大山 伸一郎¹; 藤原 均³; 堤 雅基²; 川原 琢也⁴; 斎藤 徳人⁵; 和田 智之⁵; 川端 哲也¹; 松浦 延夫¹; Hall Chris⁶

TAKAHASHI, Toru^{1*}; NOZAWA, Satonori¹; TSUDA, Takuo²; OYAMA, Shin-ichiro¹; FUJIWARA, Hitoshi³; TSUTSUMI, Masaki²; KAWAHARA, Takuya⁴; SAITO, Norihito⁵; WADA, Satoshi⁵; KAWABATA, Tetsuya¹; MATUURA, Nobuo¹; HALL, Chris⁶

¹ 名大・STE 研, ² 国立極地研究所, ³ 成蹊大学理工学部, ⁴ 信州大学工学部, ⁵ 理化学研究所, ⁶ トロムソ大学

¹STEL, Nagoya Univ., ²NIPR, ³Faculty of Science and Technology, Seikei Univ., ⁴Faculty of Engineering, Shinshu Univ., ⁵RIKEN, ⁶Univ. of Tromsø

本発表ではノルウェー・トロムソ (69.6° N, 19.2° E) で観測されたスボラディックナトリウム層 (Sporadic Sodium Layer:以下 SSL) の生成・維持機構についてナトリウムライダー、EISCAT レーダー、流星レーダーデータを用いた解析結果を示す。SSL 内の中性ナトリウム原子は、スボラディック E (Es) 層と異なり電磁気的な力を受けないので、背景大気の大気ダイナミクスのトレーサーとして利用することができる。しかし、SSL は初めて報告 [Clemesha et al., GRL, 5(10), 873-876, 1978] されて以来 35 年間におよび様々な研究がなされてきているにも関わらず、SSL の生成・維持機構については未だ統一的な理解は得られていない。SSL は高・低緯度での報告例が多く、中緯度では稀少である。これには生成原因に大きく関わっていると考えられている [Sheft et al., GRL, 16(7), 1757-1718, 1989]。生成原因としてこれまでに Es 層内での化学変化、流星の降り込み、オーロラ降下粒子によるスパッタリング降下、電場によるナトリウムイオンとナトリウム分子イオンの集積などが提唱されている [Cox and Plane, JGR, 103, 6349-6359, 1998; Heinselman, et al., GRL, 25, 3059-3062, 1998.; Kirkwood and von Zahn, JAP., 53, 389-407, 1991; Nagasawa and Abo, GRL, 22(3), 263-266, 1995; von Zahn et al., GRL, 14, 76-79, 1987]。その中でも特に Es 層と高い相関で同時に出現していることが知られている。

大気安定度や化学反応に寄与する背景大気温度構造も SSL の生成・維持機構として注目されている。ナトリウム密度と中性大気温度はナトリウム層上部では反相関であることや SSL 層内部において約 40 K の温度上昇が観測されたに報告例がある。[Gardner et al., JGR, 98, 16,865-16,873, 1993]。本研究では先行研究における問題点を 2 点指摘する。まず最初に、先行研究の多くは生成原因を単一の物理過程を仮定していたことが挙げられる。SSL 層が発生する中間圏・下部熱圏は下層大気から伝搬する大気波動や地磁気活動に伴い激しく変動する。よって、複合的な生成・維持メカニズムを調査することが重要である。2 つ目、SSL 周辺の温度導出方法である。SSL 内はナトリウム密度が数秒から数十秒のオーダーで激しく変化する。これまでの研究では SSL 内の温度を 5 分程度の時間一様性を過程していた為、導出誤差が大きく議論が不十分であった可能性がある。よって、時間分解能良く温度、ナトリウム密度を導出することが必要である。本研究に用いるトロムソナトリウムライダーはノルウェー・トロムソの EISCAT 観測所敷地内に設置され、高速波長変換と高レーザー出力パワーを有し、高空間・時間分解能で大気温度、ナトリウム密度を導出することができる。また、本サイトでは EISCAT レーダー、流星レーダー、フォトメーター、デジタルカメラなどの観測機器が集約されており、様々な物理量の同時観測が可能である。

2012 年 1 月 22 日夜、オーロラ活動は非常に活発であった。強いオーロラの降り込みの約 19 分後、背景密度の最大約 6 倍のナトリウム密度を持つ SSL が高度 94 km 付近に出現した。この SSL のピーク密度は 2116 UT から 2142 UT までは背景大気の約 2 から 6 倍であった。その後、SSL は約 2 km (96 km) 上昇し、背景ナトリウム層の 2 倍から 3 倍程度の密度を維持しながら (高度幅 1 km 以下) 2200 UT に約 96 km まで達した後、2400 UT までなだらかに約 2 km 下降し消滅した。

SSL 内の大気温度を 15 秒分解能で導出した結果、SSL 内の温度に顕著な増減はなかった。しかし、2000 UT 以降、SSL は背景温度の最小値の高度領域に位置していることがわかった。EISCAT UHF レーダーの電子密度データは、同時帯に Es 層が出現していたことを示している。Es 層は SSL 出現前から、より高高度 (100 km 以上) に存在していた。Es 層は時間と共に高度を下げ 2118 UT には高度約 94 km に達し、その後、高度上昇して、2200 UT 以降は緩やかに下降した。Es 層と SSL の高度を比較すると SSL 出現時の 2118 UT から 2200 UT まではそれぞれのピークがほぼ同じ高度領域に存在していた。2200 UT 以降、Es 層は SSL より約 2 km 低い高度に位置していた。これらの結果は SSL 層の生成原因として Es 層が寄与しており、維持機構として背景大気温度構造が寄与している事を示していると考察した。本発表では電場と Es 層により SSL 層が生成され、背景大気温度構造によって維持された物理過程について発表する。

キーワード: スボラディックナトリウム, ナトリウムライダー, オーロラ, EISCAT, 流星レーダー

PEM36-08

会場:312

時間:4月28日 11:00-11:15

Keywords: Sporadic sodium layer, sodium lidar, aurora, EISCAT radar, meteor radar

南極昭和基地大型大気レーダーによって観測された極域冬期中間圏エコーの季節変動

Seasonal variation of Polar Mesosphere Winter Echo (PMWE) observed by PANSY radar

西山 尚典^{1*}; 佐藤 薫²; 堤 雅基¹; 佐藤 亨³; 中村 卓司¹; 西村 耕司¹; 高麗 正史²; 富川 喜弘¹; 江尻 省¹; 津田 卓雄¹
NISHIYAMA, Takanori^{1*}; SATO, Kaoru²; TSUTSUMI, Masaki¹; SATO, Toru³; NAKAMURA, Takuji¹; NISHIMURA, Koji¹; KOHMA, Masashi²; TOMIKAWA, Yoshihiro¹; EJIRI, Mitsumu¹; TSUDA, Takuo¹

¹ 国立極地研究所, ² 東京大学 大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻, ³ 京都大学 大学院 情報学研究科

¹National Institute of Polar Research, ²Department of Earth and Planet Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, ³Graduate School of Informatics, Kyoto University

In the lower thermosphere at the altitude of around 100 km, both neutral turbulence and ionization of atmosphere due to solar radiations cause irregularities of reflective index, and as a result back scatter echoes from that altitude are frequently observed by radars on the ground. In the mesosphere, Polar Mesosphere Summer Echo (PMSE) is reported to be a strong echo associated with ice particles, which are produced around the coldest mesopause region in the polar summer, by a number of past radar observations [Cho and Rottger, 1997; Rapp and Lübken, 2004]. It should be also noted that occurrence rate of PMSE is very high (80-90%) [Bremer et al., 2003]. On the other hand, Polar Mesosphere Winter Echo (PMWE) is also known as back scatter echo from 55 to 85 km in the mesosphere, and it has been observed by MST and IS radar in polar region during winter [e.g., Ecklund and Balsley, 1981; Czechowsky et al., 1989; Lübken et al., 2006; Strelnikova and Rapp, 2013]. Due to the lack of free electrons and ice particles in the dark and warm mesosphere during winter, it is suggested that PMWE requires strong ionization of neutral atmosphere associated with precipitations of Solar Energetic Particles (SEPs) during geomagnetically disturbed periods [Kirkwood et al., 2002; Zeller et al., 2006]. However, the detailed generation process of PMWE has not been identified yet, partly because the reported PMWE occurrence rate was quite low (2.9%) [Zeller et al., 2006].

In the VIII-th six-year project of the Japanese Antarctic Research Expedition (JARE) from 2010, the middle and upper atmosphere research is one of the sub-projects of the prioritized research project entitled 'Global warming revealed from the Antarctic', and comprehensive ground based observations with various remote sensing instruments for the middle and upper atmosphere have been operating continuously in Syowa station. We analyzed data obtained by PANSY (Program of the Antarctic Syowa MST/IS) radar, which is the core instrument of the project, focusing on PMWE in the context of neutral-plasma atmospheric coupling process between the middle and upper atmosphere. PANSY radar is a 47 MHz VHF radar with 125 kW (full system 500 kW) output power, and it is the largest MST radar composed 5,000 m² (full system 20,000 m²) antenna array in Antarctica at the moment. PANSY has already identified a number of PMWE near local noon since operation of mesosphere observation mode was started in June 2012.

We would like to show seasonal variations of occurrence characteristics of PMWE between June 2012 and July 2013. Taking full advantage of PANSY radar's detectability, we calculated monthly-averaged height-time section of backscatter echo power in austral winter between 2012 and 2013. The result demonstrated that durations of PMWE strongly depended on hours of sunlight, although occurrence heights of PMWE, which range from 60 to 80 km, were fixed on every month and year. These statistical characteristics of PMWE were consistent with previous studies suggesting ionization at the PMWE height due to solar radiation play a dominant role in generation of PMWE [Zeller et al., 2006; Lübken et al., 2006]. However, the mean occurrence rate of PMWE estimated by our study was 20-30%, which was considerably higher than that of previous studies. It implies that atmospheric turbulence in the mesosphere would be driven by breakings of atmospheric gravity waves more frequently than past observations, especially in Antarctica, and the role of atmospheric gravity waves cannot be ignored when considering the long-termed climate changes.

キーワード: 冬季極域中間圏エコー, 南極昭和基地大型大気レーダー, 大気重力波, 中性大気-プラズマ結合

Keywords: Polar Mesosphere Winter Echo, PANSY radar, Atmospheric gravity wave, Neutral-plasma interaction

大気光イメージングにより観測された南極昭和基地 (69S,39E) 上空の大気重力波の解析 Analysis of atmospheric gravity waves observed by airglow imaging at Syowa Station (69S,39E), Antarctica

松田 貴嗣^{1*}; 中村 卓司²; 江尻 省²; 堤 雅基²; 塩川 和夫³; 田口 真⁴; 鈴木 秀彦⁴
MATSUDA, Takashi S.^{1*}; NAKAMURA, Takuji²; EJIRI, Mitsumu K.²; TSUTSUMI, Masaki²; SHIOKAWA, Kazuo³; TAGUCHI, Makoto⁴; SUZUKI, Hidehiko⁴

¹ 総合研究大学院大学, ² 国立極地研究所, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ⁴ 立教大学
¹Graduate University for Advanced Studies, ²National Institute of Polar Research, ³Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ⁴Rikkyo University

大気重力波 (以下、重力波) は重力を復元力とした波動の一種であり、下層大気で励起された重力波は中間圏・下部熱圏へ運動量とエネルギーを輸送し、中間圏界面の平均風加速を引き起こすことで大循環を駆動し温度構造に影響を与える。重力波の種々のパラメータのうち、水平位相速度は波動の超高層大気への伝搬可能性を議論する上で重要なパラメータである。超高層大気下部にあたる高度 90km 付近で発光する大気光をイメージング観測することで、この領域の重力波を観測でき、水平位相速度を含めた水平伝搬特性を導出することができる。大気光イメージングによる重力波の統計解析の結果は 1990 年代以降数多く報告されているが、研究グループごとに重力波イベントの判別基準が異なることもあり、異なる観測地点で得られた結果同士を詳細に比較することは困難であった。また、近年自動観測により大気光イメージング観測データを大量に蓄積している観測点が増加してデータ量が巨大化する現状に比べ、重力波の解析方法はマンパワーに頼った統計解析であり、解析研究が追い付いていないという状況となっている。解析者の違いによる結果の偏りがなく、多地点観測や長期観測により得られた大量のデータを簡単に処理することのできる統計解析の手法の開発が急務となっていた。

我々極地研のグループでは、そのような問題を解決するために 3 次元フーリエ変換を用いた新しい解析方法を開発し、2013 年 SGEPS 秋学会 (第 134 回総会および講演会) で紹介した。解析では、まず時間的に 60 分以上連続して雲やオーロラの影響がなく取得した大気光画像を地平座標に展開し、3 次元フーリエ変換を行うことで、東西波数、南北波数、周波数空間でのパワースペクトルを求めた。次に各周波数の波数空間スペクトルから、東西位相速度、南北位相速度空間でのスペクトルに変換し、最後に周波数方向にスペクトルを積分することで 2 次元の水平位相速度スペクトルを導出した。なお、このときに重力波として伝搬する成分を取り出すために対地周波数 (対地周期) を 8-64 分、波数 (水平波長) 5-100km の成分のみを取り出して処理している。この手法を 2011 年 4 月から 9 月の昭和基地のデータについて適用し、目視により導出された水平位相速度と比較したところ、新手法が大気光画像から水平伝搬方向の統計を求めると解析手法として有効であることを示していた。

新手法により、大気光イメージングデータを効率的に処理し、解析者による偏りの影響を受けずに水平伝搬方向の年変動などを議論することが可能になった。昭和基地では、2002 年および、2008 年から現在までの毎年全天大気光イメージング観測を行っている。また、南極大陸では、Halley 基地 (75S, 26W), Rothera 基地 (67S, 68W), McMurdo 基地 (78S, 167E), Davis 基地 (69S, 78E), 南極点基地 (90S) など多くの地点で大気光イメージング観測が行われている。これらの大量のデータを解析し南極域の中間圏・下部熱圏の重力波の振る舞いを記述することは重要課題であるが、我々はまず昭和基地における 7 年にわたるデータの解析を行い、重力波の季節変動や年変動を調べることを開始した。本発表では、その解析の状況を報告する。

キーワード: 大気重力波, 大気光イメージング
Keywords: atmospheric gravity wave, airglow imaging

母子里および鹿児島で観測された昼間トウイーク空電の初検出 First detection of daytime tweek atmospherics observed at Moshiri and Kagoshima, Japan

大矢 浩代^{1*}; 塩川 和夫²; 三好 由純²
OHYA, Hiroyo^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo²; MIYOSHI, Yoshizumi²

¹ 千葉大学大学院工学研究科, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Graduate School of Engineering, Chiba University, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

It is well known that tweek atmospherics can be observed only at night except for solar eclipse days, because daytime attenuation rate of the tweeks is much larger (~ 70 dB/1000 km) than that in nighttime (~ 3 dB/1000 km). In this presentation, we firstly report detection of daytime tweeks at Moshiri (Geographic coordinate: 44.37°N, 142.27°E) and Kagoshima (31.48°N, 130.72°E), Japan, on non-solar eclipse days in December, 1980. The daytime tweeks were observed both before and during a large magnetic storm during 16-20 December, 1980. The minimum Dst value was -240 nT at 04:00 UT on 20 December. The average occurrence numbers of the daytime tweeks at Moshiri and Kagoshima were 2.7 and 0.3 tweeks per minute, respectively. The local times (LT) when the daytime tweeks occurred were through 07:00 - 17:00 LT at Moshiri, while they were 07:00 - 09:00 LT and 15:00 - 17:00 LT at Kagoshima. All the daytime tweeks show clear frequency dispersion. The average duration was 18.94 ms, while that of nighttime tweeks is ~ 50 ms. The average reflection heights of daytime tweeks at Moshiri and Kagoshima were 86.2 km and 94.7 km, respectively. The average reflection heights of nighttime tweeks at Moshiri and Kagoshima in same period were 87.1 km and 92.1 km, respectively. The variation of the daytime tweek reflection height was higher than that of nighttime tweeks. The horizontal propagation distance in daytime cannot be estimated from the dispersion, because the duration was too short to estimate the distance.

We found through a theoretical consideration that the VLF/ELF attenuation on the D-region ionosphere depends not only on the ionospheric height, but also the sharpness of electron density profiles, β . The β is a conventional parameter proposed by Wait and Spies [1964]. When the β increases, the attenuation decreases. Even daytime, when the β is occasionally large, the attenuation would become less down to be able to observe the tweeks. In this talk, we will show the results of the daytime tweeks and discuss their occurrence mechanism.

地磁気 Sq 場の 100 年以上の長期変化 Long term variation of geomagnetic Sq field over 100 years

竹田 雅彦^{1*}

TAKEDA, Masahiko^{1*}

¹ 京大理・地磁気世界資料解析センター

¹Data Analysis Center for Geomag. and Space Magnetism, Kyoto Univ

100 年以上の長期に亘る各観測所での地磁気 Sq 場の振幅変化を求め、電気伝導度や中性風の影響、それらの変化の大きな要因である太陽活動度、各地点での主磁場強度との関連を調べた。Sq 振幅の数年程度以上の時間規模の太陽活動度依存性は、電離層電気伝導度の太陽活動度依存性によって説明できた。概して風速は太陽活動度が小さいほど風速が大きい傾向があり、長期変化についても太陽活動度の長期変化に対応して 1900 年代の始めと終わりで速く中程で遅くなるが、それ以外の長期変化は見出されない。また、電離層ダイナモ理論は主磁場強度が弱くなると Sq 場は強くなると予測するが観測所毎の解析結果は必ずしもそうはならず、その理由としては Sq 場の強度が観測所上空の主磁場にのみ支配されているわけではないということが考えられる。

学会時には全地球的球関数解析で得られた等価電流渦との関係についても触れる予定である。

キーワード: 地磁気日変化, 長期変化, 太陽活動度, 主磁場強度, 電気伝導度, 風速

Keywords: geomagnetic daily variation, long-term variation, solar activity, main field strength, electric conductivity, wind velocity

地磁気日変化に見られる超高層大気の長期変動 Long-term variation in the upper atmosphere as seen in the geomagnetic solar quiet (Sq) daily variation

新堀 淳樹^{1*}; 小山 幸伸²; 能勢 正仁²; 堀 智昭³; 大塚 雄一⁴; 谷田貝 亜紀代⁴

SHINBORI, Atsuki^{1*}; KOYAMA, Yukinobu²; NOSE, Masahito²; HORI, Tomoaki³; OTSUKA, Yuichi⁴; YATAGAI, Akiyo⁴

¹ 京都大学生存圏研究所, ² 京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所 ジオスペース研究センター, ⁴ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, ²Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism Graduate School of Science, Kyoto University, ³Nagoya University Solar Terrestrial Environment Laboratory Geospace Research Center, ⁴Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

It has been well-known that the geomagnetic field on the ground shows a regular variation with a fundamental period of 24 hours during a solar quiet day. This daily variation depends on local time, latitude, season and solar cycle and has been called solar quiet (Sq) geomagnetic field daily variation. The Sq variation is mainly produced by magnetic effects due to ionospheric currents flowing in the E region of the ionosphere around 105 km. The global pattern of the Sq variation of the H-component shows positive and negative changes in the equatorial and middle-latitude regions around noon, respectively. The Sq current system expected from the geomagnetic field perturbations consists of two large current vortices: one is an anticlockwise current in the northern hemisphere and the other is a clockwise current in the southern hemisphere. The Sq current is dominant in the daytime ionosphere where ionospheric conductivity is relatively large, and is driven by electric fields originating from the ionospheric dynamo via the interaction between ionized and neutral particles. According to the Ohm's law, the main variables in the Sq amplitude are the ionospheric conductivity, the polarization electric field, the solar diurnal tide, and the intensity of the ambient magnetic field at the E-region height. Then, to investigate the long-term variation in the Sq amplitude is important for understanding the physical mechanism of long-term variation in the upper atmosphere related to solar activity and lower atmospheric change such as global warming. In this study, we investigated long-term variation in the Sq amplitude using 1-hour geomagnetic field data obtained from 184 geomagnetic observation stations within a period of 1947-2012 in order to clarify the physical mechanism of long-term variation in the upper atmosphere. For the analysis of long-term observation data obtained from a lot of geomagnetic stations, we took advantage of the IUGONET data analysis system (metadata database search system and data analysis software). The Sq amplitude is defined as a difference of the H-component of geomagnetic field between the maximum and minimum values each solar quiet day. We identified the solar quiet day as the day when the maximum Kp value is less than 4 for each day. As a result, the Sq amplitude observed at all the geomagnetic stations showed a clear dependence on the 11-year solar activity and it tended to be enhanced significantly during solar maximum. The Sq amplitude became the smallest around the minimum of 23/24 solar cycle in 2008-2009. The relationship between the Sq amplitude and F10.7 solar activity index was not linear but nonlinear. This nonlinearity could be interpreted as the decrease of production rate of electrons and ions in the ionosphere for the strong extreme ultraviolet (EUV) and ultraviolet (UV) fluxes. In order to minimize an effect of solar activity including the long-term variation in the Sq amplitude, we calculated second orders of fitting curve between the F10.7 solar index and Sq amplitude during 1947-2012, and examined the residual Sq amplitude defined as the deviation from the fitting curve. As a result, majority of the residual Sq trends passed through the trend test showed a negative value without dependence on geographical latitude and longitude. The tendency was strong in India, the southern part of Africa, and the northern part of America and Europe. In a region of northern part of America and Europe, the secular variation of magnetic inclination becomes relatively large, compared with other regions. Therefore, the long-term trend in the residual Sq amplitude could be linked to a change in the ionospheric conductivities associated with the secular variation of the ambient magnetic field and the upper atmosphere and electro motive force ($U \times B$) via the interaction between ionized and neutral particles.

キーワード: 地磁気日変化, 太陽活動, 長期変動, 地磁気永年変化, 電離圏電気伝導度, 地球温暖化

Keywords: Geomagnetic solar quiet daily variation, Solar activity, Long-term variation, Geomagnetic secular variation, Ionospheric conductivity, Global warming

HFDで観測された波面状Es水平移動速度の短時間増加 Temporal increases of horizontal speed of frontal Es observed by HFD

富澤 一郎^{1*}; 宮脇 公望¹
TOMIZAWA, Ichiro^{1*}; MIYAWAKI, Masami¹

¹ 電気通信大学宇宙・電磁環境研究センター

¹Center for Space Science and Radio Engineering, The University of Electro-Communications

HFD観測によって得られた多数の波面状Esの水平移動速度を2012年を通して詳しく解析したところ、数10分から数時間のスケールで一時的に速度が増加する場面があることに気づいた。この一時的な速度増加現象は、1年間を通じて29回観測されたが全体の2.4%とわずかであり、主として夏季の21時JST頃に最も発生頻度が高いことが分かった。速度増加率は30%以下であったが、時にはピーク速度は200m/sを超えることもあった。速度変動の開始から終了までの継続時間は、40から300分まで大きく変化した。変動開始からピークまでの前半の速度増加時間の平均は35分、ピークから変動終了までの後半の速度減少時間の平均は50分と後半の時間の方が長いことが分かった。このような速度変動の原因としては、E層高度の広域電界の時間的変動または中性大気水平移動速度の時間変動によるものと考えられる。前者は広域で同時に変動し、後者は大気の移動に伴う空間的な時間ずれを生ずる。100km以上離れた観測点の速度変化時間について比較したところ、最大20分の時間ずれを生じることから、後者が原因と判断できる。つぎに、この速度変動の隣接波面間距離を求め、それをピークに関してプロットしたところ、ピーク付近で50km以下の最小値を取り、ピークから遠ざかるに従って次第に長くなって約200kmに達するような不等間隔構造であり、さらに各々のイベントについて全ての波面間隔を総計することにより、全体構造の大きさを求めたところ、最大1400kmで65%が400km以下の局所的変動現象であることが分かった。一方、100km以上離れた観測点のピーク速度が異なり、その速度変化の形状が異なることから、構造が非等方であると考えられる。以上の特徴を総合し、今回観測された速度変化を伴うEs波面が直線ではなく渦状構造をもつと結論した。

キーワード: 波面状Es, 水平移動速度, 短時間増加, HFD観測

Keywords: frontal Es, horizontal speed, temporal increase, HF Doppler observation

ロケット及び地上観測による中規模伝搬性電離圏擾乱の研究 Study of medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTID) with sounding rockets and ground observations

山本 衛^{1*}; 加藤 寛大¹; 石坂 圭吾²; 横山 竜宏³; 岩上 直幹³; 高橋 隆男⁵; 田中 真⁵; 遠藤 研⁶; 熊本 篤志⁶; 渡部 重十⁷; 山本 真行⁸; 阿部 琢美⁹; 斎藤 享¹⁰; 津川 卓也³; 西岡 未知³; Bernhardt Paul¹¹; Larsen Miguel¹²
YAMAMOTO, Mamoru^{1*}; KATO, Tomohiro¹; ISHISAKA, Keigo²; YOKOYAMA, Tatsuhiko³; IWAGAMI, Naomoto³; TAKAHASHI, Takao⁵; TANAKA, Makoto⁵; ENDO, Ken⁶; KUMAMOTO, Atsushi⁶; WATANABE, Shigeto⁷; YAMAMOTO, Masa-yuki⁸; ABE, Takumi⁹; SAITO, Susumu¹⁰; TSUGAWA, Takuya³; NISHIOKA, Michi³; BERNHARDT, Paul¹¹; LARSEN, Miguel¹²

¹ 京都大学生存圏研究所, ² 富山県立大学, ³ 情報通信研究機構, ⁴ 東京大学理学研究科, ⁵ 東海大学情報教育センター, ⁶ 東北大学理学研究科, ⁷ 北海道大学理学研究科, ⁸ 高知工科大学, ⁹ JAXA 宇宙科学研究所, ¹⁰ 電子航法研究所, ¹¹ NRL, ¹² クレムソン大学

¹RISH, Kyoto University, ²Toyama Prefectural University, ³NICT, ⁴School of Science, University of Tokyo, ⁵ICT Education Center, Tokai University, ⁶School of Science, Tohoku University, ⁷School of Science, Hokkaido University, ⁸Kochi University of Technology, ⁹JAXA/ISAS, ¹⁰ENRI, ¹¹NRL, ¹²Clemson University

Medium-scale traveling ionospheric disturbance (MSTID) is an interesting phenomenon in the F-region. The MSTID is frequent in summer nighttime over Japan, showing wave structures with wavelengths of 100-200 km, periodicity of about 1 hour, and propagation toward the southwest. The phenomena are observed by the total electron content (TEC) from GEONET, Japanese dense network of GPS receivers, and 630 nm airglow imagers as horizontal pattern. It was also measured as Spread-F events of ionograms or as field-aligned echoes of the MU radar. MSTID was, in the past, explained by Perkins instability (Perkins, 1973) while its low growth rate was a problem. Recently 3D simulation study by Yokoyama et al (2009) hypothesized a generation mechanism of the MSTID, which stands on electromagnetic E/F-region coupling of the ionosphere. The hypothesis is that the MSTID first grows with polarization electric fields from sporadic-E, then show spatial structures resembling to the Perkins instability. We recently conducted a observation campaign to check this hypothesis. We launched JAXA ISAS sounding rockets S-310-42 and S-520-27 at 23:00 JST and 23:57JST on July 20, 2013 while an MSTID event was monitored in real-time by the GPS-TEC from GEONET. We found 1-5mV/m northeastward/eastward electric fields during the flight. Variation of electric fields were associated with horizontal distribution of plasma density. Wind velocity was measured by the TME and Lithium releases from S-310-42 and S-520-27 rockets, respectively, showing southward wind near the sporadic-E layer heights. These results are consistent to the expected generation mechanism shown above. In the presentation we will discuss electric-field results and its relationship with plasma density variability together with preliminary results from the neutral-wind observations.

Keywords: MSTID, Sounding rocket, Electric field, GPS-TEC, Observation campaign

IMAP/VISIで観測された赤道電離異常に伴う O630nm 発光特性 Characteristics of O630nm emission associated with equatorial ionization anomaly obtained with IMAP/VISI

坂本 大樹¹; 坂野井 健^{1*}; Perwitasari Septi¹; 大塚 雄一²; 齊藤 昭則³; 秋谷 祐亮³; 穂積 裕太³; 山崎 敦⁴
SAKAMOTO, Daiki¹; SAKANOI, Takeshi^{1*}; PERWITASARI, Septi¹; OTSUKA, Yuichi²; SAITO, Akinori³; AKIYA, Yusuke³; HOZUMI, Yuta³; YAMAZAKI, Atsushi⁴

¹ 東北大学大学院理学研究科, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 京都大学大学院理学研究科, ⁴ 宇宙科学研究所
¹Grad. School of Science, Tohoku University, ²STEL, Nagoya University, ³Grad. School of Science, Kyoto University, ⁴ISAS / JAXA

低緯度電離圏 F 領域における特有の現象として赤道異常 (EIA: Equatorial Ionization Anomaly) がある。EIA とは磁気赤道から電場により持ち上げられたプラズマが高高度で磁力線に沿って南北両半球へ降下することで発生する現象であり、プラズマの密度分布は赤道上で極小をとらず、その両側 (磁気緯度約 $\pm 15^\circ$) で極大をとる分布となる。この EIA に伴う O630nm 発光に関するこれまでの研究は、主に地上からの光学ならびに電波観測に基づき行われてきた。そのため、広域の観測することが困難であり、EIA の南北の対称性や季節変化、地方時依存性などの特徴を詳細に調べることが出来なかった。

ISS (国際宇宙ステーション) に搭載された IMAP/VISI は、高度約 400km から全経度と緯度約 $\pm 52^\circ$ の広範囲に渡って 630nm 大気光観測を行うことが可能であり、EIA に伴う O630nm 発光のグローバル観測ができる。

本研究ではこの ISS - IMAP/VISI の利点を生かし、2012 年 9 月から 2013 年 12 月の 1 年間以上に取得された約 950 パスの O630nm 発光観測データを統計解析し、EIA に伴う O630nm 発光の地方時依存性、経度分布、季節変動や南北非対称性、磁気嵐依存性などの時間・空間変動を明らかにすることを目的とする。

データ解析手法について、まず O630nm の強度分布を導出し、これを緯度方向に積分した。また、解析イベント選定基準は、主に以下の 4 点を満たすものとした。(1) 中緯度における大気光強度から決定された背景の大気光より強いピークを持つこと、(2) EIA に伴う増光の全領域が観測されていること、(3) 南北両半球の EIA が分離していること、(4) 月の位相が 0.5 (半月) 以下の日、または 0.5 以上でも月が出ていない時間帯であること。

データ解析の結果、EIA に伴う O630nm 発光の地方時依存性については、日没から時間経過し深夜に行くに従い発光が減少する傾向が見られた。しかしながら、同じ地方時における発光強度の値の分散が大きい結果となった。この事実は、単なる地方時依存性に加えて経度依存性、季節依存性等の他の変動要因が重なっていることを示唆する。

次に、EIA に伴う O630nm 発光の季節依存性については、南北両半球とも、冬半球側で EIA に伴う O630nm 発光強度がより強くなる結果が得られた。この事実は、地軸の傾きのために、冬半球では熱圏潮汐風が極向き風となり、電離圏イオンを押し下げる効果で解釈される。しかし、いずれの月においても発光強度に大きなばらつきを示した。

また EIA に伴う O630nm 発光強度の経度依存性について、秋分時 (2013 年 9 月から 10 月) の観測データを用いて調べた。この結果、磁気赤道 (dip equator) が地理赤道の南に位置する場所 ($200^\circ \sim 310^\circ$) では北半球において EIA に伴う O630nm 発光強度が南半球より大きくなり、これ以外では南半球で発光強度が大きくなる結果となった。これは熱圏潮汐風による電離圏上下変動による効果と考えられる。

2013 年 3 月の磁気嵐時における EIA に伴う O630nm 発光強度変動については、Dst 指数の絶対値が 90 以上の時に発光が小さくなる結果になった。また Dst 指数の絶対値が 90 以下の時には、Dst 指数と O630nm 発光との間には明確な相関関係は見られなかった。また、赤道環電流発達時に O630nm 発光強度の減少がみられ、この発光減少の原因として、赤道環電流発達時に Region2 電流系の昼間側の西向き電場が低緯度まで侵入し、EIA 発達に影響を与えたことが考えられる。

キーワード: 国際宇宙ステーション, 大気光, 熱圏, 電離圏, 赤道異常, IMAP

Keywords: ISS, airglow, thermosphere, ionosphere, equatorial ionization anomaly, IMAP

ISS-IMAP と地上イメージャとの同時観測による大気光構造の解析 Analysis of the airglow structures using the simultaneous observations by ISS-IMAP and all-sky imagers

幸野 淑子^{1*}; 齊藤 昭則¹; 大塚 雄一²; 坂野井 健³
YUKINO, Hideko^{1*}; SAITO, Akinori¹; OTSUKA, Yuichi²; SAKANNOI, Takeshi³

¹ 京大・理・地球物理, ² 名大 STE 研, ³ 東北大・理

¹Dept. of Geophysics, Kyoto Univ., ²STEL, Nagoya Univ., ³Grad. School of Science, Tohoku Univ.

ISS-IMAP とハワイ全天イメージャの同時観測により大気重力波の空間構造の解析を行った。水平波長が 10km?100km の中間圏・熱圏における大気重力波については多くの地上観測がなされてきているが、全経度域において水平スケール 100 km 以上の大気重力波を観測することを目的として、2012 年 7 月 21 日に ISS-IMAP が打ち上げられた。国際宇宙ステーション (ISS) の軌道高度は約 400 km、軌道傾斜角は 51.6 度である。ISS-IMAP の可視・近赤外分光観測装置 (VISI) は大気光の撮像を行っており、その空間分解能は 10 km?25 km である。本研究では、ハワイ (20.48 度 N、156.2 度 W) の全天イメージャのデータと、ISS-IMAP/VISI のデータを用いて、大気重力波の空間構造を解析した。VISI の観測波長は 630 nm、730 nm と 762 nm であり、ハワイ全天イメージャの観測波長は 630 nm と、557.7 nm で、5.5 分の時間分解能で得られる。両観測から得られる 630 nm 大気光構造の比較と、高度 95 km 付近で発光する全天イメージャから得られる 557.7 nm 大気光構造と ISS-IMAP/VISI から得られる 762 nm 大気光とについて、VISI がハワイの上空を通過し、かつ、地上観測点上空が晴れの日のデータの比較を行った。その結果、ハワイ全天イメージャでプラズマ・バブルが観測された時刻において、VISI でも 630 nm でプラズマ・バブルが観測され、両観測の比較により、空間スケール及び鉛直構造を解析した。また、プラズマ・バブルを利用して全天イメージャと VISI の輝度比較を行い、VISI の観測感度校正を行った。発表では大気重力波の構造の空間スケールについても報告する。

キーワード: 大気光, プラズマ・バブル, ISS-IMAP

Keywords: airglow, plasma bubble, ISS-IMAP

ISS-IMAP/EUVIで観測された夕方側電離圏上部Heイオンの水平構造 Horizontal structures of ionized Helium in the topside ionosphere of dusk side observed by ISS-IMAP/EUVI

穂積 裕太^{1*}; 齊藤 昭則¹; 山崎 敦²; 村上 豪²; 吉川 一郎³
HOZUMI, Yuta^{1*}; SAITO, Akinori¹; YAMAZAKI, Atsushi²; MURAKAMI, Go²; YOSHIKAWA, Ichiro³

¹ 京都大学大学院理学研究科地球物理学教室, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ³ 東京大学
¹Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, ²Institute of Space and Astronautical Science / Japan Aerospace Exploration Agency, ³The University of Tokyo

Horizontal structures of ionized Helium in the topside ionosphere of dusk side were obtained with the Extreme Ultra Violet Imager (EUVI) of the ISS-IMAP (Ionosphere, Mesosphere, upper Atmosphere and Plasmasphere mapping) mission. EUVI has taken image of He He II radiation (30.4 nm) from the International Space Station (ISS) since October 2012. In this work, images taken in 2013 were analyzed. North-south asymmetry and longitudinal structure of ionized Helium were found. Seasonal dependence of these horizontal structures will be discussed.

キーワード: 上部電離圏, ISS-IMAP, ヘリウムイオン
Keywords: Topside ionosphere, ISS-IMAP, Ionized Helium

SuperDARN 北海道-陸別 HF レーダーを用いた太陽フレアによる電離圏環境変動の研究 Study of ionospheric disturbance characteristics during solar flare events using the SuperDARN Hokkaido radar

渡辺 太規¹; 西谷 望^{1*}
WATANABE, Daiki¹; NISHITANI, Nozomu^{1*}

¹ 太陽地球環境研究所
¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

電離圏は電波通信や衛星通信の安定性を確保するために重要な領域である。短波帯電波が突然通信不能となるデリンジャー現象をはじめ、太陽フレア時には X 線、 γ 線、EUV、高エネルギー粒子などが地球に到達することで、様々な電離圏擾乱が生じる。そのため、電波通信や衛星通信を利用するにあたって、太陽フレアによる電離圏擾乱の特性を理解することは必要不可欠である。本研究では、フレアによる電離圏擾乱の中でも特に電離圏電子密度変動を研究した。過去のフレア時における電離圏電子密度変動については、GPS やビーコン電波等を用いた全電子数突然増加 (SITEC) がよく研究されてきた。SITEC は電子密度を高度で積分しているため、電子密度変化の高度分布は得られない。本研究においては、フレア時における電離圏電子密度変動の高度別特性の識別を行った。太陽フレア時、短波帯電波にはドップラーシフトが生じることが知られている。このドップラーシフトは D,E 層での電子密度変化から影響を受けた場合と、F 層での電子密度変化から影響を受けた場合で、異なる周波数依存性と仰角依存性を持つ。本研究はこの性質を利用し、2006 年 12 月から 2013 年 5 月までに生じた M2.0 クラス以上のフレアイベントに対し、北海道-陸別 HF レーダーの電波のドップラーシフトを解析した。その結果、D,E 層の電子密度変動の影響が大きいと考えられるイベントが多数見受けられた。どちらの影響が強いか判別できないイベントも多く見受けられたが、F 層の電子密度変動の影響が大きいと考えられるイベントは存在しなかった。よって、本研究では太陽フレア時では、D,E 層の電子密度変動が支配的であると結論付けた。またレーダーのドップラーシフトの性質を量的に解析することで、電子密度変化量を見積もった。この変化量に対して独立に、衛星観測による X 線、EUV 放射強度データを用いて計算を行い、電離圏電子密度変化量を算出した。これらの計算結果を比較することで、レーダー観測の妥当性を評価した。

キーワード: SuperDARN, 北海道-陸別 HF レーダー, 太陽フレア, 電離圏変動, 光化学反応, レンジ依存性
Keywords: SuperDARN, Hokkaido radar, solar flares, ionospheric disturbances, photochemical reaction, range dependence

大気圏潮汐作用による電離圏夜間中緯度電子密度異常の変化 Thermospheric tidal effects on the ionospheric midlatitude summer nighttime anomaly

陳佳宏^{1*}; Lin Charles¹; Chang Loren²; Huba J. D.³; 齊藤 昭則⁴; 劉正彦²
CHEN, Chia-hung^{1*}; LIN, Charles¹; CHANG, Loren²; HUBA, J. D.³; SAITO, Akinori⁴; LIU, Jann-yenq²

¹台湾国立成功大学地球科学学科, ²台湾国立中央大学太空科学研究所, ³Plasma Physics Division, Naval Research Laboratory, Washington, D. C., USA, ⁴日本京都大学理学研究科

¹Department of Earth Science, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, ²Institute of Space Science, National Central University, Chung-Li, Taiwan, ³Plasma Physics Division, Naval Research Laboratory, Washington, D. C., USA, ⁴Department of Geophysics, Kyoto University, Kyoto, Japan

This study use a 3D physics-based ionospheric model, SAMI3, coupled with the National Center for Atmospheric Research Thermosphere Ionosphere Electrodynamics General Circulation Model (TIEGCM) and Global Scale Wave Model (GSWM) to simulate the mesospheric and lower thermospheric tidal effects on the development of midlatitude summer nighttime anomaly (MSNA). Using this coupled model, the diurnal variation of MSNA electron densities at 300 km altitude is simulated on both June solstice (day of year (DOY) 167) and December solstice (DOY 350) in 2007. Simulation results show successful reproduction of the southern hemisphere MSNA structure including the eastward drift feature of the southern MSNA, which is not reproduced by the default SAMI3 runs using the neutral winds provided by the empirical Horizontal Wind Model 93 (HWM93) neutral wind model. A linear least squares algorithm for extracting tidal components is utilized to examine the major tidal component affecting the variation of southern MSNA. Results show that the standing diurnal oscillation component dominates the vertical neutral wind manifesting as a diurnal eastward wave-1 drift of the southern MSNA in the local time frame. We also find that the stationary planetary wave-1 component of vertical neutral wind can cause diurnal variation of the summer nighttime electron density enhancement around the midlatitude ionosphere.

キーワード: 中緯度, 電子密度異常, 大気圏潮汐作用

Keywords: Midlatitude Summer Nighttime Anomaly, thermospheric tidal effect

カスプ域の熱圏質量密度異常に対する水平イオンドラッグの影響 Horizontal ion drag effect on the thermospheric mass density anomaly in the cusp

松村 充^{1*}; 田口 聡²
MATSUMURA, Mitsuru^{1*}; TAGUCHI, Satoshi²

¹ 電気通信大学宇宙・電磁環境研究センター, ² 電気通信大学情報理工学研究科

¹Center for Space Science and Radio Engineering, University of Electro-Communications, ²Graduate School of Informatics and Engineering, University of Electro-Communications

CHAMP 衛星の観測により、熱圏のカスプ域では質量密度が周囲よりも統計的に約 30 % 高くなることが知られている。多くの研究では、質量密度の増大は、加熱による鉛直方向の質量輸送によって引き起こされると考えられており、何が加熱率をカスプ域で極大にするかが研究の焦点となっている。一方、水平方向の質量輸送に関しては全く言及されていない。極域の電離圏対流は、イオンドラッグを通じて中性大気に水平運動量を与えるため、対流速度やそれによるイオンドラッグの分布が、中性大気の質量分布にも影響を与える可能性がある。我々はこれまでに、昼夜境界がカスプ域付近にある場合については、イオンドラッグによってカスプ域付近で中性大気が圧縮されて質量密度が増大することを示した。我々は今回、昼夜境界がカスプ域付近にない場合について数値シミュレーションを行った。その場合においても、質量密度増大はカスプ域に局在化されることが明らかになった。イオンドラッグを含めない場合は、質量密度増大はカスプ域に局在化されなかった。本講演では対流速度およびイオンドラッグの分布と質量密度の増減の関係に着目して、質量密度がどのようにしてカスプ域に局在化されるのか説明する。

キーワード: 熱圏, 質量密度, カスプ, CHAMP 衛星

Keywords: thermosphere, mass density, cusp, CHAMP satellite

極冠パッチの縁 Edge of polar cap patches

細川 敬祐^{1*}; 田口 聡¹; 小川 泰信²
HOSOKAWA, Keisuke^{1*}; TAGUCHI, Satoshi¹; OGAWA, Yasunobu²

¹ 電気通信大学, ² 国立極地研究所

¹University of Electro-Communications, ²National Institute of Polar Research

A highly sensitive all-sky EMCCD airglow imager (ASI) has been operative in Longyearbyen, Norway (78.1N, 15.5E) since October 2011. One of the primary targets of this optical observation is a polar cap patch which is defined as an island of enhanced plasma density in the F region drifting anti-sunward across the central polar cap. Since the electron density within patches is often increased by a factor of 2-10 above that in the surrounding region, all-sky airglow measurements at 630.0 nm wavelength are capable of visualizing their spatial distribution in 2D fashion.

During a 4-h interval on the night of December 4, 2013, a series of polar cap patches was observed by the ASI in Longyearbyen. By using the high-quality ASI images, we estimated the gradients in the leading/trailing edges of the patches and found that the gradient in the leading edge is 2-3 times steeper than that in the trailing edge. We also identified finger-like undulating structures growing along the trailing edge of the patches. Generation of these fingers is probably governed by a structuring through the gradient-drift instability which is known to occur only along one side of patches.

From these observations, we suggest that such a structuring process can transport and mix the patch plasma across their trailing edges so that the scale size of the edges get extended. This means that the structuring through the plasma instability can strongly influence the large-scale shape of patches. Such a knowledge is of particular importance for better understanding the space weather effects of patches on the trans-ionospheric satellite communications in the polar cap region.

キーワード: 極冠域電離圏, 大気光, 極冠パッチ, プラズマ不安定

Keywords: Polar cap ionosphere, Airglow, Polar patches, Plasma instability

SEALION 観測データを用いた、赤道エレクトロジェット、日没付近の赤道電場増加、赤道スプレッド F 出現についての相関解析
Correlation analysis between equatorial electrojet, pre-reversal enhancement and equatorial spread F in Southeast Asia

国武学^{1*}; 津川卓也¹; 横山 竜宏¹; 西岡 未知¹; 山本 和憲¹; 石橋 弘光¹; 長妻 努¹; 丸山 隆¹; 石井 守¹; 塩川 和夫²
KUNITAKE, Manabu^{1*}; TSUGAWA, Takuya¹; YOKOYAMA, Tatsuhiko¹; NISHIOKA, Michi¹; YAMAMOTO, Kazunori¹; ISHIBASHI, Hiromitsu¹; NAGATSUMA, Tsutomu¹; MARUYAMA, Takashi¹; ISHII, Mamoru¹; SHIOKAWA, Kazuo²

¹ 情報通信研究機構, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹NICT, ²STE Lab., Nagoya Univ.

赤道スプレッド F (equatorial spread F) [ESF] の発生には、日没付近の電場増加 (pre-reversal enhancement) [PRE] が関連することが知られている。PRE 強度、ESF 発生と赤道エレクトロジェット (equatorial electrojet) [EEJ] との関連については、地磁気データとイオノゾンデ観測データとを用いて研究が進められてきた。Uemoto et al.(2010) により、赤道エレクトロジェットが日没前 1 - 2 時間に西向きに流れている場合 (夕方にカウンターエレクトロジェットが出現している場合) には、PRE の強度が抑制され、ESF の発生も減ることが統計的に示された。その解析には、2007 年 11 月から 2008 年 10 月の東南アジア域での SouthEast Asia Low-latitude Ionospheric Network (SEALION) 観測データが用いられた。この期間は、太陽活動極小期にあたる。

本研究では、引き続き、SEALION 観測データを用いている。期間を、2007 年から 2013 年と 7 年間に拡張し、太陽活動極小期から極大期まで解析することにした。日々変化に焦点を当てたイベント解析と長期データを用いた統計解析とを行なった結果を報告する。用いたデータは、地磁気観測が、Phuket (地理緯度 北緯 8.09 度、地理経度 東経 98.32 度、dip lat. -0.2 度)、Kototabang (南緯 0.20 度、東経 100.32 度、dip lat. -10.1 度)、イオノゾンデ観測が、Chumphon (北緯 10.72 度、東経 99.37 度、dip lat. 3.0 度)、Chiang Mai (北緯 18.76 度、東経 98.93 度、dip lat. 12.7 度)、Kototabang (南緯 0.20 度、東経 100.32 度、dip lat. -10.1 度) である。

キーワード: エレクトロジェット, スプレッド F, PRE, 日々変化, SEALION, 赤道
Keywords: electrojet, equatorial spread F, day-to-day variation, SEALION

子午面イオノゾンデ観測網による低緯度電離圏ダイナミクス : Ionospheric Ceiling Low-latitude ionosphere dynamics as deduced from meridional ionosonde chain: Ionospheric ceiling

丸山 隆^{1*}; 上本 純平¹; 石井 守¹; 津川 卓也¹; SUPNITHI Pornchai²; KOMOLMIS Tharadol³
MARUYAMA, Takashi^{1*}; UEMOTO, Jyunpei¹; ISHII, Mamoru¹; TSUGAWA, Takuya¹; SUPNITHI, Pornchai²; KOMOLMIS, Tharadol³

¹ 情報通信研究機構, ² モンクット王工科大学ラカバン, ³ チェンマイ大学

¹National Institute of Information and Communications Technology, ²King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, ³Chiang Mai University

Peculiar ionospheric features at low latitudes originate in the earth's magnetic field configuration that has a shape of arch. Near the magnetic equator, the daytime eastward electric field raises the ionosphere to high altitudes where the ion-neutral collision frequency reduces. The ionospheric plasma slips down over off-equatorial latitudes along the arch-shaped magnetic field line by the earth's gravity acceleration and the reduced ion-neutral drag, which is called the fountain effect. As a consequence, the latitudinal distribution of ionospheric critical frequency (foF2) forms two crests at low latitudes and a trough above the magnetic equator, which is well-known equatorial anomaly in foF2 distribution. As for the diurnal variation of the ionosphere above the magnetic equator, foF2 once increases in the morning and decreases before noon along with the development of the equatorial anomaly, which is called noon bite-out. Another feature at the magnetic equator, associated with the fountain effect, is the relatively steady ionospheric peak height (hmF2) around noon, even though the EXB drift is upward throughout the daytime. However, not much attention has been paid to hmF2 except for the time rate of change of it in connection with the vertical plasma drift velocity.

Interest in the equatorial anomaly has been focused mostly on foF2 (or NmF2), and there have been a few studies on hmF2 variations associated with equatorial anomaly development. In this paper, we revisit the equatorial anomaly in terms of height variations. For this purpose, we analyzed scaled ionogram parameters from three stations located along the magnetic meridian that is a primary component of Southeast Asia low-latitude ionospheric network (SEALION); one at the magnetic equator and the others at conjugate off-equatorial latitudes near 10 degrees magnetic latitude.

The daytime hmF2 was investigated for each season during the solar minimum period, 2006-2007 and 2009. The peak height increased for approximately 3 hr after sunrise at all locations, as expected from the daytime upward EXB drift. The apparent upward drift ceased before noon at the magnetic equator, while the layer continued to increase at the off-equatorial latitudes, reaching altitudes higher than the equatorial height around noon. The noon time restricted layer height at the magnetic equator did not depend on the season, while the maximum peak height at the off-equatorial latitudes largely varied with season. The daytime specific limiting height of the equatorial ionosphere was termed ionospheric ceiling. Numerical modeling using the SAMI2 code reproduced the features of the ionospheric ceiling quite well. Dynamic parameters provided by the SAMI2 modeling were investigated and it was shown that the ionospheric ceiling is another aspect of the fountain effect, in which increased diffusion of plasma at higher altitudes has a leading role.

キーワード: 赤道異常, EXB ドリフト, 低緯度電離圏観測ネットワーク

Keywords: equatorial anomaly, fountain effect, ionospheric ceiling, EXB drift, SEALION

プラズマバブルの高精細3次元数値シミュレーション Three-dimensional high-resolution plasma bubble modeling

横山 竜宏^{1*}; 品川 裕之¹; 陣 英克¹
YOKOYAMA, Tatsuhiko^{1*}; SHINAGAWA, Hiroyuki¹; JIN, Hidekatsu¹

¹ 情報通信研究機構

¹National Institute of Information and Communications Technology

電離圏のプラズマは、その運動が中性大気との衝突によって強く支配されているため、中性大気と電離大気の相互作用を解明することは電離圏の物理過程を理解する上で非常に重要である。一方、電離圏内では地球磁場に沿った導電率が非常に高く、電場を通じてE-F領域間は強く結合されている。赤道域電離圏においては、赤道スプレッドF/プラズマバブルと呼ばれる現象の研究が古くから行われている。プラズマバブルに伴う局所的なプラズマ密度の不規則構造が発生した場合には、電波の振幅、位相の急激な変動(シンチレーション)が生じるため、GPS等による電子航法に深刻な障害を及ぼすことが知られており、その生成機構と発生の日々変化の解明が強く求められている。現象の発見当初から、プラズマバブルは電離圏F領域下部におけるRayleigh-Taylor不安定が原因であると予想され、磁気赤道上の2次元断面における数値シミュレーションにより、不安定の非線形成長がプラズマバブル生成の主な原因であることが確認された。2000年代後半以降になると、3次元でのプラズマバブルシミュレーションが一般的となり、プラズマバブルの3次元構造、南北中性風の効果、重力波によるシーディング等が研究されてきた。3次元モデルの最大の特徴は、磁力線によって結合された低緯度電離圏E領域の影響を含ませることができる点である。Rayleigh-Taylor不安定の成長率を磁力線に沿って積分して考えた場合、磁力線で結合された南北両半球のE領域の導電率の影響は非常に重要であり、実際、両半球のE領域が同時に日没し、E領域の導電率が急激に減少する時期に、プラズマバブルの発生頻度が高くなることが知られている。しかし、従来の数値モデルによる研究では、E領域プラズマの影響については重視されておらず、また、グリッド間隔も比較的粗く、プラズマバブル内部の構造については議論されてこなかった。本研究では、高精細赤道域電離圏数値モデルを新たに開発し、プラズマバブルの内部構造や、E領域の条件とプラズマバブルの成長との関係について検討した。プラズマバブルの壁面では密度勾配が非常に急峻となるため、その密度勾配を離散グリッド状で再現するためには、精度の高い数値スキームが必要である。本研究で開発した数値モデルでは、水平方向のグリッド間隔を約2kmとし、移流スキームに時間、空間共に3次精度を持つCIP法を用いることにより、プラズマバブルの壁面の非対称性を再現することに成功した。また、E領域の条件に応じてプラズマバブルの成長が大きく異なることも明らかとなった。将来的には、全球大気圏電離圏モデル(GAIA)に組み込み、より現実的な条件におけるプラズマバブルの成長条件について研究を進展させる予定である。

キーワード: プラズマバブル, 赤道スプレッドF, 赤道電離圏, 数値シミュレーション

Keywords: plasma bubble, equatorial spread F, equatorial ionosphere, numerical simulation

小型気球搭載を目的としたテレメトリおよび簡易運用システムの基礎開発 Basic development of a small balloon-mounted telemetry with its operation system

河野 紘基^{1*}; 柿並 義宏¹; 山本 真行¹
KONO, Hiroki^{1*}; KAKINAMI, Yoshihiro¹; YAMAMOTO, Masa-yuki¹

¹ 高知工科大学

¹ Kochi Univ. of Tech

1. はじめに

国内において JAXA(宇宙航空研究開発機構) では科学観測用の高高度大気球が放球されている。特長として最高高度 50 km 程度まで上昇し、観測ロケットより安価かつ搭載機器の制限も少ないことから自由度の高い実験が可能であるが、大学等教育機関の研究室単位での大気球の独自開発は現実的に難しい。しかし近年の半導体センサーの普及により個人レベルでも打ち上げ可能な小型の気象観測気球(ラジオゾンデ)を用いて行う実験が海外で頻繁に行われるようになった(e.g. Near Space Ventures, Inc., 2013)。小型とはいえ直径 6 ft(≒ 180 cm)の観測気球の場合には気球本体と余裕浮力を除いた搭載能力は質量ベースで 2 kg ほどが見込め、到達高度は 35 km 程度まで期待できる。しかし国内において気球の飛行経路、ペイロードの落下地点予測は正確には困難であり、放球リスクは依然として高い状況にある。本研究では、国内での気象観測気球を用いた理学観測・工学実験を大学教育機関レベルで実現することを将来目標とし、現在行なっている装置開発の取り組みについて報告する。

2. 装置開発

将来的に計画している気象観測気球の放球に向けて、係留バルーンをプラットフォームとした装置開発を行った。具体的には、市販の安価な小型バルーンに搭載できる 250 g 程度の小型テレメータとテレメトリデータを受信する地上局システムである。テレメータには無線モジュール、GPS、気圧高度、温湿度、カメラ、加速度、電子コンパス、電源モニターの各項目を監視するセンサーを搭載しており、各センサーの計測値が随時地上局に送信されるようになっている。

地上局システムでは、PC 上で動作する気球運用支援ソフトウェアを新たに開発し、予め設定した地上局位置情報とセンサーデータを用いて計算したリアルタイム情報を操作者に視覚的に提供することができる。さらに、ソフトウェアが自動出力する KML 形式ファイルを順次 Google Earth に読み込むことで気球位置のリアルタイムマッピングを行うことが出来るほか、GPS 位置情報から球面三角法で算出した気球方位角・仰角の情報を、開発したカメラ三脚搭載型トラッキングローテータに入力することで、小型の通信アンテナ等を常時気球方向に自動追尾することが可能である。

3. 実験結果

開発システムの動作評価として行った係留気球実験では、テレメトリ回線の極端な通信品質の低下という想定外の事象が発生し、地上局とテレメータ間の運用限界距離が約 110 m と大幅に制限されてしまった。実験前に行った地上予備実験における 270 m の通信距離(パケットロス率 0%)の記録とは対照的である。トラッキングローテータの指向角計算は単独測位の GPS 位置情報を利用しているため誤差は 5 から 10 m 程度あり、かつローテータの最大可動仰角が 50°であったため近距離での動作評価はシビアな条件となるが、約 110 m の通信距離範囲内では安定してバルーンを指向することができた。また、テレメータ、開発ソフトウェアは想定通りに動作し、特に問題となる点は見つからなかった。本発表では、装置開発の詳細と 2014 年 1 月の係留バルーン実験で得られたデータを発表する予定である。

キーワード: 気象観測気球, 係留気球, 成層圏, 高層大気, テレメータ, 組み込みシステム

Keywords: Weather balloon, Tethered balloon, Stratosphere, Upper atmosphere, Telemeter, Embedded system

成層圏突然昇温が両半球の中間圏・下部熱圏へ与える影響について Impacts of stratospheric sudden warming events in the mesosphere and lower thermosphere

渡部 公子^{1*}; 田中 孝¹; 三好 勉信²

WATANABE, Kumiko^{1*}; TANAKA, Takashi¹; MIYOSHI, Yasunobu²

¹九州大学大学院理学府地球惑星専攻, ²九州大学理学研究院地球惑星科学部門

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

成層圏突然昇温(以下SSW)が極域や赤道域に及ぼす影響に関しては幅広く研究されているが、グローバルな観測データの制限等により、中間圏・下部熱圏にSSWが与える影響については詳しくわかっていない。特に、南半球への影響はほとんど調べられていないのが現状である。そこで本研究では、気象の再解析データを組み込んだ対流圏から熱圏までを解像できる大循環モデルを用いて、SSWに伴う気温場、風系場の変化についての力学的な解析を行った。特に、2008年から2010年に発生したSSWについて詳しく解析した。その結果、南半球の成層圏上部から熱圏までの領域で、SSW発生時に気温降下が起こっていることがわかった。これにより、北半球で発生したSSWの影響が南半球の中間圏から下部熱圏領域にまで及んでいることがわかった。また、SSWに伴って、北半球極域の下部熱圏では昇温がみられることもわかった。これは、SSW時に中間圏で励起されたプラネタリー波が下部熱圏まで伝播した結果と考えられる。

キーワード: 成層圏突然昇温, 中間圏, 下部熱圏

Keywords: stratospheric sudden warming, mesosphere, lower thermosphere

昭和基地レイリー/ラマンライダーによる対流圏から中間圏までの連続温度プロファイルの導出 Vertical profiles of atmospheric temperature between upper troposphere and mesosphere obtained from Rayleigh/Raman lidar

西山 尚典^{1*}; 中村 卓司¹; 江尻 省¹; 阿保 真²; 川原 琢也³; 津田 卓雄¹; 鈴木 秀彦⁴; 堤 雅基¹; 富川 喜弘¹
NISHIYAMA, Takanori^{1*}; NAKAMURA, Takuji¹; EJIRI, Mitsumu¹; ABO, Makoto²; KAWAHARA, Taku d³; TSUDA, Takuo¹; SUZUKI, Hidehiko⁴; TSUTSUMI, Masaki¹; TOMIKAWA, Yoshihiro¹

¹ 国立極地研究所, ² 首都大学東京大学院システムデザイン研究科, ³ 信州大学工学部, ⁴ 立教大学理学部
¹National Institute of Polar Research, ²Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University, ³Faculty of Engineering, Shinshu University, ⁴Faculty of Science, Rikkyo University

下層大気から上方へ伝搬する大気重力波は、上部対流圏から下部中間圏にかけて力学的なエネルギーと運動量の輸送および付与において重要な役割を担う。特に極域においては、これらの大気重力波の作用により極夜ジェットが減速することや、夏極から冬極への大規模子午線循環を引き起こすことが知られている。加えて、大気重力波の現実的な伝搬特性を考慮することで、既存の気候モデルに存在するバイアスが大きく改善されることが提唱されており、連続的な観測に基づいて上部対流圏から下部中間圏にかけての大気重力波の活動度を理解することは非常に重要な課題である。

国立極地研究所は、2010年より6年間の南極地域重点研究観測を実施しており、このサブプロジェクトの一つ「南極域中層・超高層大気を通して探る地球環境変動」の一貫として、レイリー/ラマン (RR) ライダーを南極昭和基地 (南緯 69 度, 東経 39 度) に設置し、2011 年 2 月から対流圏上部と中層大気 (10-80 km) の温度の鉛直分布の観測を開始し、ほぼ 3 年にわたり観測を続けている。

昭和に設置された RR ライダーは同時に 4 チャンネルのフォトンカウントのデータを取得することが可能であり、それぞれのチャンネルのデータは個別のバイナリデータとして記録される。これらのデータのうち 3 つのチャンネル、Raman (10-30km), Rayleigh-Low (20-65km), Rayleigh-High (30-80km) のデータを使うことで、上部対流圏から下部中間圏におよぶ大気温度の高度プロファイルを推定することが可能となる。従来までは各々のチャンネルで個別に導出され個々のチャンネルにおいて大気温度のオフセットが生じていたが、これらの高度プロファイルを連結し高度方向に連続した大気温度の高度プロファイルを得る為に、以下のようなデータ解析プロセスの改良を試みている。(1)Rayleigh-Low 及び Raman のチャンネルのデータにおいてライダー方程式を解く際に、方程式を解き始める初期高度の温度を同時刻におけるそれぞれ Rayleigh-High 及び Rayleigh-Low のチャンネルのデータから求められた温度を代入する。(2) 時間及び高度方向に変動する背景光によるショットノイズ数を考慮した上で、各チャンネルにおけるライダー方程式の初期高度を解析プログラム上で自動的に決定する。(3) 初期高度から低高度側へ伝搬する温度誤差の評価を行う為に、人為的に初期高度の温度に -50K から 50K のオフセットを与え、どの高度においてどの程度の誤差に収束するか評価を行う。これらの手法によって、上部対流圏から下部中間圏における高度方向に連続的な大気温度プロファイルを得ることが可能となれば、大気重力波のポテンシャルエネルギーの高度・時間変動や極域成層圏雲と背景の大気温度の関係といった重要な課題に対して非常に有用なデータセットが得られることが期待される。本講演では、これら解析手法の詳細やデータベース作成を含めた将来展望について報告する。

キーワード: レイリー/ラマンライダー, 大気温度, 中間圏, 成層圏, 大気重力波, 極域成層圏雲

Keywords: Rayleigh/Raman lidar, Atmospheric temperature, Mesosphere, Stratosphere, Atmospheric Gravity Waves, Polar Stratospheric Clouds

南極観測用の波長可変共鳴散乱ライダーシステム: 現況について Tunable resonance scattering lidar system for Antarctic observation: Current status

津田 卓雄^{1*}; 江尻 省¹; 西山 尚典¹; 阿保 真²; 松田 貴嗣¹; 川原 琢也³; 中村 卓司¹
TSUDA, Takuo^{1*}; EJIRI, Mitsumu¹; NISHIYAMA, Takanori¹; ABO, Makoto²; MATSUDA, Takashi¹; KAWAHARA,
Takuya³; NAKAMURA, Takuji¹

¹ 国立極地研究所, ² 首都大学東京大学院システムデザイン研究科, ³ 信州大学工学部

¹National Institute of Polar Research, ²Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University, ³Faculty of Engineering, Shinshu University

We are developing a new resonance scattering lidar system to be installed at Syowa Station (69S, 39E) in Antarctica. For the new lidar system, we have employed a tunable alexandrite laser covering the resonance scattering wavelengths of two neutral species, which are atomic potassium (K, 770.11 nm) and atomic iron (Fe, 386.10 nm), and two ion species, which are calcium ion (Ca^+ , 393.48 nm) and aurorally excited nitrogen ion (N_2^+ , 390.30 nm, 391.08 nm). Thus the tunable resonance scattering lidar system will provide information on the mesosphere and lower thermosphere as well as the ionosphere. Using the tunable lidar and co-located other instruments, we will conduct a comprehensive ground-based observation of the low, middle, and upper atmosphere above Syowa Station. This unique observation is expected to make important contribution to studies on the atmospheric vertical coupling process and the neutral and charged particle interaction. In this presentation, we report current status of the tunable lidar system in development and test observations at National Institute of Polar Research in Tachikawa, Japan.

キーワード: 共鳴散乱ライダー, 南極, 昭和基地, K層, Fe層

Keywords: Resonance scattering lidar, Antarctica, Syowa Station, K layer, Fe layer

カリウム共鳴散乱ライダー用ドップラーフリー飽和吸収分光実験 Doppler-free spectroscopy experiments for the Antarctic Potassium resonant lidar

川原 琢也¹; 津田 卓雄^{2*}; 西山 尚典²; 江尻 省²; 阿保 真³; 中村 卓司²
KAWAHARA, Takuya¹; TSUDA, Takuo^{2*}; NISHIYAMA, Takanori²; EJIRI, Mitsumu²; ABO, Makoto³; NAKAMURA, Takuji²

¹ 信州大学工学部, ² 国立極地研究所, ³ 首都大学東京大学院システムデザイン研究科

¹Faculty of Engineering, Shinshu University, ²National Institute Polar Research, ³System Design, Tokyo Metropolitan University

国立極地研究所は、6年間のプロジェクトとして第Ⅷ期重点研究観測「南極域から探る地球温暖化」を2010年より推進している。中層・超高層大気観測研究は、その中のサブテーマIに位置付けられており、これまでに継続観測してきたレーザー・光学観測機器に、第Ⅷ期で新たに開発・導入が進められている大型のレーザーやライダーなどの測器を加え、地表から超高層大気にいたる大気の変動をとらえる計画である。波長可変共鳴散乱ライダーは、このプロジェクトの一環として昭和基地(69°S, 36°E)への導入を目指して開発が進められている。

送信系には波長可変レーザーのアレキサンドライト・レーザーを用いており、基本波の発振領域768-788 nmと第2高調波(384-394 nm)とあわせてMLT領域の複数の共鳴散乱原子をターゲットにする。現在は770 nmのカリウム原子観測の準備をしており、既に2013年1月28日には国立極地研究所(36°N, 139°E)にてカリウム原子層の初観測に成功した。カリウムライダーとして密度観測のみならず温度観測を可能にするには、インジェクションシーディングによるスペクトル幅の狭帯域化と同時にシーダーの絶対波長モニターが必須である。そこで極地研究所で、カリウムセルを内蔵したToptica製のドップラーフリー飽和吸収分光装置システムを用いて絶対波長計測を行った。シーダーの波長を変化させ、飽和吸収分光装置を用いてカリウムセルを通過するシーダー透過光の強度をモニターし、共鳴散乱による減少量から吸収線を計測し絶対波長と対応させた。十分にシステムが安定化した後、波長スキャン範囲、ゲイン設定などの値の最適値を決定し、波長スキャン幅約5 fm(0.005 pm)で吸収線計測を行った。結果、約50 fm(0.05 pm)の間隔で存在する3本のクロスオーバー吸収線が明確に検出された。本講演ではこの実験の詳細を発表する。

キーワード: 南極, ライダー, カリウム, 共鳴散乱, ドップラーフリー

Keywords: Antarctica, lidar, Potassium, resonant scattering, Doppler Free

トロムソナトリウムライダーの 3 次元観測化：同期実験と検証 Development of a 3D sodium lidar: synchronous experimentation and validation

村仲 渉^{1*}; 川原 琢也²; 野澤 悟徳³
MURANAKA, Wataru^{1*}; KAWAHARA, Taku d²; NOZAWA, Satonori³

¹ 信州大学大学院, ² 信州大学 工学部, ³ 名大 STE 研

¹GSI, Shinshu University, ²Faculty of Engineering, Shinshu University, ³STE Lab., Nagoya University

EISCAT レーダサイト (Tromso, Norway) で稼働中の高出力安定ナトリウム温度・風ライダーは、2010 年の設置から現時点で 4 シーズン目の観測が行われている。このライダーは波長 589nm では世界有数の 4W の出力を誇り、受信系に口径 35cm の一般的な天体望遠鏡を用いても十分高感度な観測を行うことができる。現在は天頂と東西南北のそれぞれに天頂角 30 度とした 5 方向観測を中心に行っている。

我々が開発中のシステムでは、任意の観測方向に調整可能な 3 次元システムを目的としている。一連の観測方向制御は望遠鏡の視野内にレーザー光を導入する動作を含め完全自動化を目指す。送信系は鉛直・水平軸の 2 台の電動回転ステージ上ミラーにより射出方向の制御をおこなう。組み上げた送信系では射出方向の再現性の精度は 0.1mrad 以下と十分な精度を実現している。受信系は口径 35cm の市販の電動天体望遠鏡を用いる。望遠鏡の視野に天体を導入し、天体の位置と時刻から望遠鏡の姿勢の調整を行う。望遠鏡の観測方向の再現性の精度は 5.3mrad である。

本発表では、送受信系で同一方向を観測する同期実験により実際の 3 次元観測の検証を行うとともに、その問題点と解決方法を示す。

キーワード: ナトリウム, ライダー, 3 次元観測

Keywords: sodium, lidar, three dimensional

昭和基地で観測された熱圏・中間圏 NO の季節変動の要因の解析 Analysis of the factors of seasonal variation of the thermosphere-mesosphere NO observed at Syowa Station

上村 美久¹; 磯野 靖子¹; 水野 亮¹; 長浜 智生¹; 江尻 省²; 堤 雅基²; 中村 卓司^{2*}

UEMURA, Miku¹; ISONO, Yasuko¹; MIZUNO, Akira¹; NAGAHAMA, Tomoo¹; EJIRI, Mitsumu K.²; TSUTSUMI, Masaki²; NAKAMURA, Takuji^{2*}

¹ 名古屋大学 太陽地球環境研究所, ² 国立極地研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²National Institute of Polar Research

太陽陽子などの高エネルギー粒子が地球大気に降りこんだ際、極域の上部成層圏や中間圏では窒素酸化物 (NO、NO₂) が増加することが知られている (たとえば、Lopez-Puertas et al. 2005)。名古屋大学太陽地球環境研究所では国立極地研究所と共同して、南極昭和基地にミリ波分光観測装置を設置し、2012 年 1 月から NO スペクトルの連続観測を行っている。観測データから求められた下部熱圏・中間圏の NO カラム量は冬期におよそ $1.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 、夏期におよそ $0.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ が得られ、冬期の方が夏期の約 3~4 倍のカラム量が大きいという季節変化を示した。そこで、本研究では観測された NO カラム量の季節変化が熱圏・中間圏での化学反応過程による NO 自身の増加によるものか、大気輸送の影響によるものかを考察するために、熱圏・中間圏 CO の高度別の時間変化、極域における夜間の長さとの比較をおこなった。熱圏・中間圏において、CO は光化学寿命が 10 日~100 日程度と水平・垂直輸送にかかる時間と同等かそれより長く、大気輸送のトレーサーであると考えられる。CO の観測データとして AULA/MLS によるデータ (Version3.3) を用い、気圧 0.1-0.01 hPa、緯度 65° S-75° S のものを解析に利用した。

緯度 65° S-75° S の範囲の CO 混合比を一日ごとに平均したものの時間変化をみると、どの気圧においても冬期に体積混合比が増加し、夏期に減少する傾向を示した。CO 混合比の増加の始まる時期と NO カラム量の増加の始まる時期はほぼ一致しており、また、両者の季節変化は類似した特徴を示すように見える。さらに、気圧ごとの時間変化を見ると、冬期に CO 混合比のピークの時期は上方から下方にかけて遅れていく様子が見られており、これは時間経過とともに大気が下方に輸送されていることを示している。そこで、CO カラム量を算出し、NO カラム量とその変化を比べてみたところ、その相関は良いとは言えないものであった。一方、極域における夜間の長さとの比較を行ったところ、CO カラム量の変化との相関より、よい相関を得た。

これらのことより、下部熱圏・中間圏における冬期の NO カラム量の増加は NO を多く含む下部熱圏の大気塊の下降の影響に加えて、太陽光があたらないときは NO の消失反応が抑制されて NO カラム量の増加が起こり、春期にかけて太陽光が当たり始めた際に NO の消失反応が再開されカラム量の減少が起こっているものと考えられる。

本発表では、新しく取得したデータも加え、2 年分の観測結果について、熱圏・中間圏 CO の変化、極域における夜間の長さと比較した NO カラム量の季節変動について行った解析について述べる。

キーワード: ミリ波分光, 一酸化窒素 (NO)

Keywords: microwave spectroscopy, Nitric Oxide

CHAMP 衛星が観測した中低緯度における微細沿磁力線電流と主磁場に垂直な二成分の相関関係 Small spatial scale field aligned currents in middle and low latitudes as observed by the CHAMP satellite

中西 邦仁^{1*}; 家森 俊彦¹; 青山 忠司¹; Luhr Hermann²
NAKANISHI, Kunihito^{1*}; IYEMORI, Toshihiko¹; AOYAMA, Tadashi¹; LUHR, Hermann²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² ドイツ科学センター

¹Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, ²GeoForschungsZentrum, GFZ, Potsdam, Germany

我々は、低高度 (300-450 km) 精密磁場観測衛星 CHAMP の中低緯度の磁場観測データ解析から、周期が数十秒の微小 (1-5 nT) 磁場変動が全球的に存在する事を昨年の JPGU など報告してきた。磁場変動の周期と振幅の特徴から、下層大気起源の大気重力波による電離層ダイナモによって生成された微細な沿磁力線電流が全球的に存在すると解釈している。つまり、まず、下層大気擾乱によって励起した大気重力波が電離層まで伝搬する。次に、中性大気が振動しダイナモ作用が引き起こされ、Pedersen 電流および Hall 電流が流れる。次に、ダイナモ領域が有限であるため、分極電場が生じる。分極電場が磁力線に沿って反対半球方向に伝搬すると同時に、電離層電流が発散して沿磁力線電流となる。このようにして生成された沿磁力線電流の空間構造を、CHAMP 衛星が軌道に沿う時間変化として観測する。

また、新たに主磁場に垂直な 2 成分の相関関係の特徴について解析を行い、その結果、次の傾向がある事がわかった。観測地点の主磁場のデータについて、1) 正の伏角、正の偏角の場合、負の相関係数、2) 正の伏角、負の偏角の場合、正の相関係数、3) 負の伏角、正の偏角の場合、正の相関係数、4) 負の伏角、負の偏角の場合、負の相関係数の傾向がある。

当発表では、こうした相関関係の傾向も含めた磁場変動の特徴と整合的なモデルについて報告する。

キーワード: 沿磁力線電流の微細構造, 中低緯度, CHAMP 衛星, 大気重力波, 下層大気起源, 相関関係

Keywords: spatial structure of field aligned currents, middle and low latitudes, the CHAMP satellite, atmospheric gravity wave, the lower atmospheric origin, correlation relation

CHAMP 衛星が観測した電離圏上空微小磁場変動の起源 Atmospheric origin of small-scale magnetic fluctuations as observed by CHAMP above the ionosphere

青山 忠司^{1*}; 家森 俊彦²; 中西 邦仁¹
AOYAMA, Tadashi^{1*}; IYEMORI, Toshihiko²; NAKANISHI, Kunihito¹

¹ 京都大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻, ² 京都大学大学院 理学研究科 附属地磁気世界資料解析センター
¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Graduate School of Science, Kyoto University

我々は低高度(300~450km)精密磁場観測衛星 CHAMP の中低緯度の磁場観測データを解析し、周期が数十秒の微小(0.1~5nT)磁場変動が全球的に存在することを明らかにした。今までに磁場変動の特徴、特に明白な地理的特徴を持った季節依存性から、対流圏起源の水平方向のスケールが約 100 km の大気重力波による E 層ダイナモによって生成された沿磁力線電流の微細構造(~100 km)であると報告してきた。

そこで本発表では、対流圏起源の現象である事を検証するために大気重力波の活動度が高くなると知られている台風や前線などのメソスケールの気象イベントに注目し、電離圏上空での磁場変動との比較を行った。解析手法として、衛星位置から磁力線に沿って電離層高度(110km)までトレースしたその直下における気象イベントと比較した。

その結果、多くの台風や前線などの強い降雨エリア上空で大きな磁場擾乱が見られた。発表では統計的に対応関係を調べた結果も示す。

キーワード: 沿磁力線電流, 電離層ダイナモ, 大気重力波, 音波共鳴, CHAMP 衛星, 台風

Keywords: field-aligned current, ionospheric dynamo, atmospheric gravity wave, acoustic resonance, CHAMP satellite, typhoon

多点広角カメラ連続画像を用いた流星・火球速報システムの最適化 Optimization of notification system for bright meteor signals by using wide angle images at multiple sites

伊代野 淳^{1*}; 和田 直己²

IYONO, Atsushi^{1*}; WADA, Naoki²

¹ 岡山理科大学理学部基礎理学科, ² 岡山理科大学理学研究科総合理学専攻

¹Dept. of Fundamental Science, Okayama university of Science, ²Graduate School of Science, Okayama university of Science

1. 背景

岡山理科大学では、2011年11月より広角カメラによる夜間並びに昼間の空のデータ蓄積を行ってきた。当初スカイモニターとしての導入であったが、画像蓄積型の CCD カメラによる連続観測、サーバへのデータを転送により、実時間に近い形でデータ取得が可能であることが分かり、これらの利点を用いた明るい流星並びに火球現象の速報システムの開発に取り組んできた。ソフトウェアによる画像処理のみでは効率的な流星・火球の検出が難しいことが判明し、現在赤外線センサー並びに低周波音センサーとの連動をはかり、検出の効率化に取り組んでおり、その結果を報告する。

2. システム

システムは広角のレンズを組み込んだ CCD カメラと画像サーバーを接続し、ハウジングの中に設置し、連続運転を行っている。画像は、128（およそ4秒露出）フレーム積分を行い、欠損がない時間間隔で画像サーバーから自動転送を行っている。現在、一日28800枚の画像、500MBのデータ量で蓄積を行っている。画像データは、コントラスト改善の画像処理と差分並びにオブジェクト検出処理ソフトを用いてほぼオンラインで解析を行っている。また、新たに赤外線センサー並びに低周波音センサーをハウジング内に設置して同観測することで、比較的明るい規模の流星・火球を確実にとらえることを目指している。

3. 開発

本研究では、画像取得、センサー情報を総合したソフトウェア処理によって流星軌跡検出、到来方向測定、光度プロファイル測定をほぼオンライン化し、速報として

WEBに掲載するシステムを構築する。本発表では、主としてソフトウェアの開発とセンサーの詳細並びに結果について報告を行う。

キーワード: 流星, 火球, 流星群, 多地点観測

Keywords: meteor, fireball, simultaneous? observation, meteor shower

S-310-40号機による夜間電離圏下部領域の中波帯電波伝搬特性観測 Measurement of propagation characteristics of MF band radio waves in lower ionosphere by S-310-40 sounding rocket

石坂 圭吾^{1*}; 板屋 佳汰¹; 芦原 佑樹²; 阿部 琢美³; 遠藤 研⁴; 熊本 篤志⁴

ISHISAKA, Keigo^{1*}; ITAYA, Keita¹; ASHIHARA, Yuki²; ABE, Takumi³; ENDO, Ken⁴; KUMAMOTO, Atsushi⁴

¹ 富山県立大学, ² 奈良高等専門学校, ³ 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所, ⁴ 東北大学

¹Toyama Prefectural University, ²NARA National College of Technology, ³ISAS/JAXA, ⁴Tohoku University

The ionospheric D region is important in radio wave propagation because it absorbs energy from waves at MF, HF and VHF, and it reflects LF and VLF signals. Then D region is present only during daylight hours. Therefore, in the night-time, the MF band radio waves are propagated as far as an area where its radio waves cannot be propagated in the daytime. This reason why the radio waves cannot receive is that the D region is disappeared at night. However, the MF band radio waves that transmit from distant place have not been often received at the mid latitude in the night-time. In this time the sporadic E region cannot be observed by the ionogram. We guess that the D region appear in the lowest ionosphere like a daytime. To farther study the structure of the lowest ionosphere, we propose a method to measure the very low electron densities that occur at altitudes from 50 km to 90 km using the partial and perfect reflection characteristics of electromagnetic waves.

S-310-40 sounding rocket experiment was carried out at Uchinoura Space Center (USC) at 23:48 JST on 19 December, 2011. The purpose of this experiment is the investigation of characteristics of radio wave propagation in the ionosphere and the estimation of electron density structure in the lower ionosphere, when the intensity of radio wave measured on the ground will be attenuate at night-time. In order to measure the radio waves, a LF/MF band radio receiver (LMR) is installed on the sounding rocket. The LMR has measured the propagation characteristics of four radio waves at frequencies of 60 kHz (JJY signal from Haganeyama radio station), 405 kHz (NDB station from Minami-Daito), 666 kHz (NHK Osaka broadcasting station) and 873 kHz (NHK Kumamoto broadcasting station) in the region from the ground to the lower ionosphere. The LMR consists of a loop antenna, a pre-amplifier and a detector circuit. The loop antenna is set up in the nose cone, which is transparent to the LF/MF band radio waves, and is not deployed during the flight. Therefore, the LMR can measure the relative attenuation of radio waves from the ground up to the ionosphere. Furthermore the loop antenna consists of three loop antennas in order to measure three components of four radio waves. Then we can obtain the propagation directions of radio waves in the ionosphere directly.

A propagation vector can be obtained from the propagation characteristic of radio wave. It is possible to estimate electron density profile from a propagation vector, because the propagation vector is dependent on the electron density profile in the radio wave propagation region. We have estimated the electron density profile by the propagation vector. When the electron density profile estimated by the propagation vector was compared with the electron density profile measured with the Langmuir probe and the impedance probe onboard the S-310-40 sounding rocket, it was found that electron density becomes the maximum at an altitude of 104 km.

We show the results of propagation characteristics of radio waves in the ionosphere and explain the propagation vector of radio wave in the ionosphere. And the electron density profile in the ionosphere can be estimated by the propagation vector. We will show the result that it is investigated the influence the lowest ionosphere region has on a MF band radio wave in this study.

キーワード: 電離圏, 電波伝搬特性, ロケット実験

Keywords: ionosphere, propagation characteristic of radio wave, rocket experiment

JARE55 南極観測船「しらせ」船上、標準電波強度計測：初期結果報告 Measurement of LF Standard-Frequency Waves JJY along the track of Shirase during JARE55: Preliminary Report

北内 英章^{1*}; 野崎 憲朗¹; 伊東 宏之¹; 近藤 巧¹; 土屋 茂¹; 今村 國康¹; 長妻 努¹
KITAUCHI, Hideaki^{1*}; NOZAKI, Kenro¹; ITO, Hiroyuki¹; KONDO, Takumi¹; TSUCHIYA, Shigeru¹; IMAMURA,
Kuniyasu¹; NAGATSUMA, Tsutomu¹

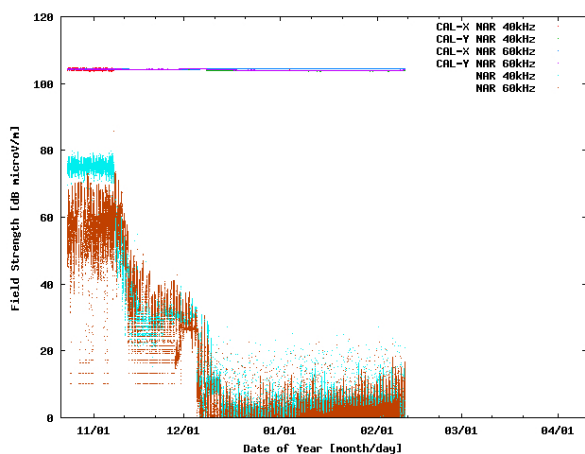
¹ 情報通信研究機構

¹ NICT

We developed a highly sensitive, reliable receiving system for the purpose of reception of low frequency (LF) radio waves. The system consists of digital lock-in amplifiers and crossed-loop antennas. Digital lock-in amplifier (DLA) employs phase-sensitive detection (PSD) of periodic signal multiplied by the input reference source of the known signal frequency. This makes it possible to realize very narrow bandpass filter around the reference frequency, detecting/measuring that of very weak signal even in noisy environment. The antenna, on the other hand, consists of orthogonally crossed, larger double loops (receivers R_X , R_Y) and smaller doubles (transmitters T_X , T_Y): the former receivers R_X , R_Y receive LF radio signals of x-, y-components, the latter transmitters T_X , T_Y transmit an instant, weak signal from each x-, y-component for self calibration purpose. The self calibration test is performed by transmitting a weak LF signal for an instant every an hour from the transmitter T_X , T_Y respectively, and receiving this signal from the receivers R_X , R_Y to obtain preassigned field strength. This test indicates if the receivers of the system are working properly and allows us to obtain reliable measurements.

We apply the receiving system to measure the field intensity and phase of the standard frequency and time signals (SFTS) JJY of LF 40 kHz and 60 kHz during the summer expedition of the 55th Japanese Antarctic Research Expedition (JARE), from November 2013 to April 2014. Figure 1 shows temporal evolution of the field intensities JJY 40 kHz (light blue dots) and 60 kHz (brown dots) as well as the self-calibrating radio signals. Our receiving system detects both the LF JJY radio signals even offshore Syowa Station, Antarctic, about 14,000 km away from those transmitting stations. Also the field intensities of the self calibration test show about a consistent preassigned value, assuring the measurements.

Keywords: low frequency (LF) radio waves, call sign JJY of 40 kHz and 60 kHz, standard frequency and time signals (SFTS), self calibration, Japanese Antarctic Research Expedition (JARE), Japanese Antarctic Research Icebreaker Shirase



電離圏観測ロケットのウェイク周辺においてプラズマ波動を励起する電子の速度分布の検討 Velocity distribution of electrons generating plasma waves around the wake of an ionospheric sounding rocket

遠藤 研^{1*}; 熊本 篤志¹; 加藤 雄人¹
ENDO, Ken^{1*}; KUMAMOTO, Atsushi¹; KATOH, Yuto¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

¹Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

プラズマ中を超音速で運動する物体の後方にはウェイクと呼ばれるプラズマの希薄な領域が形成される。ウェイクは観測ロケットや人工衛星など宇宙機の後方に生じる他、太陽風プラズマと天体の相互作用によっても作られることが知られている。人工衛星や月のウェイク近傍ではこれまでプラズマ波動が観測されているが、観測ロケットに関しては、そのウェイク近傍でプラズマ波動が励起することを指摘する研究は多くない。しかしながら、1998年、2012年に鹿児島で行われたロケット実験の波動観測の結果は、ロケットのウェイク近傍でも波動励起現象が起きていることを示唆している。ロケットのウェイク近傍におけるプラズマ波動の励起過程を解明することは、ロケット観測で取得される波動データのより正確な解釈だけでなく、プラズマ流と非磁化物体の相互作用に起因する普遍的な物理素過程の理解のためにも重要である。

これまでの解析により、2012年のS-520-26ロケット実験で観測された3種類のプラズマ波動は、その周波数から、静電的電子サイクロトロン高調波(ESCH)及びUHRモード波動、ホイッスラーモード波動である可能性が高く、それぞれある特徴的なスピン位相角依存性をもつことが明らかになっている。これらの結果は、プラズマ波動がロケット周囲に空間非一様に励起・成長していることを示唆している。電離圏の電子の速度分布にビーム成分や温度異方性を与えた分布を仮定し波動の分散関係を数値的に求めたところ、UHRモード波動、ESCH波動の他、静電的ホイッスラーモード波動の波数、周波数領域で波が成長する解が得られている。このことから、仮定した速度分布と等価的な速度分布がウェイク近傍に存在していたと考えられるが、実際にどのような速度分布関数がどのような空間分布で存在しうるかは今後検証するべき課題である。

Singh et al. (1987)は、ブラソフ-ポアソンコードを用いて一次元の真空中に両側からプラズマが流れ込む現象を模擬することで、物体のごく近傍のウェイクでは二流体不安定型の速度分布関数が得られることを示した。しかし、同論文で議論に取り上げられているのはウェイク軸上の速度分布関数のみであり、それ以外の領域での分布関数については特に言及されていない。また、速度空間の次元については拡散方向一次元のみ議論にとどめられており、電子の異方性に関しては指摘されていない。

そこで我々は、ウェイク近傍における速度分布関数の空間分布について考察するため、Singh et al. (1987)の方法を僅かに改変した、空間一次元(磁場方向)、速度空間二次元(磁場方向とそれに垂直な方向)の静電ブラソフシミュレーションを検討している。具体的には、一次元空間に設けた真空領域に電子、イオンが拡散していく状況を考え、シミュレーションの時間発展はウェイクの軸方向の空間変化として解釈する。電子・イオンが拡散する磁力線の方に長さ10mの1次元空間をとり1024 gridに分割して計算を行う。

本発表では、S-520-26ロケット実験の観測結果をもとに、ウェイク近傍のプラズマ波動の周波数帯域および空間分布を明らかにし、励起に寄与する電子の速度分布に関して議論を行う。併せて、プラズマ波動を励起する速度分布をもつ電子がウェイク近傍にどのように空間分布するかを明らかにするために開発を進めているシミュレーションコードについて紹介し、その計算初期結果について報告する。

キーワード: 電離圏, 観測ロケット, ウェイク, プラズマ波動, ブラソフシミュレーション

Keywords: ionosphere, sounding rocket, wake, plasma wave, Vlasov simulation

超高層大気組成・速度分布測定のための中性大気分析器の開発：質量分析部の性能評価試験

Atmospheric Neutral Analyzer for mass-resolved velocity distribution measurements: Verification of mass analyzer

下山 学^{1*}; 林 鮎子¹; 伊藤 史宏¹; 平原 聖文¹

SHIMOYAMA, Manabu^{1*}; HAYASHI, Ayuko¹; ITO, Fumihiko¹; HIRAHARA, Masafumi¹

¹名古屋大学太陽地球環境研究所

¹STEL, Nagoya University

In order to understand the temporal and spatial variability of the ionosphere-thermosphere system, simultaneous measurements of the composition and density of the neutral atmosphere and the velocity distribution of individual species are essential. However, most conventional types of instruments for neutral atmosphere lack the simultaneous capability of measuring neutral atmospheric velocity and resolving neutral mass.

We have designed the Atmospheric Neutral Analyzer (ANA) instrument to measure the detailed, mass-resolved 2-dimensional velocity distribution of neutral species, from which the corresponding density, mass composition, bulk velocity and temperature were derived. In this presentation, we will report the results from laboratory experiments for the performance verification on the prototype of mass analyzer along with the detailed and overall design determined by numerical simulation.

キーワード: 超高層中性大気, 速度分布関数, 質量分析

Keywords: neutral upper atmosphere, velocity distribution function, mass analysis

昼間条件下と月明条件下で観測されたリチウム共鳴散乱光の観測と中性風速解析 Observation of resonance scattering light of Lithium vapor under daytime and moonlight condition and neutral wind analysis

木原 大城^{1*}; 柿並 義宏¹; 山本 真行¹; 渡部 重十²; Hard Lucas³; Larsen Miguel³; 山本 衛⁴; 羽生 宏人⁵; 阿部 琢美⁵
KIHARA, Daiki^{1*}; KAKINAMI, Yoshihiro¹; YAMAMOTO, Masa-yuki¹; WATANABE, Shigetou²; HARD, Lucas³; LARSEN,
Miguel³; YAMAMOTO, Mamoru⁴; HABU, Hiroto⁵; ABE, Takumi⁵

¹ 高知工科大学, ² 北海道大学, ³ クレムソン大学, ⁴ 京都大学, ⁵ 宇宙科学研究所
¹Kochi Univ. of Tech., ²Hokkaido Univ., ³Clemson Univ., ⁴Kyoto Univ., ⁵ISAS/JAXA

1. はじめに

下部熱圏中性大気風の測定を目的として、2007年9月2日の夕方に熱圏大気中に観測ロケットによりリチウムを放出し太陽光による共鳴散乱光を観測して高度110 km~400 kmにおける熱圏中性大気中性風が測定された (Yamamoto et al., 2008)。2012年1月12日には明け方条件下でリチウム共鳴散乱光を観測し、高度127 km~76 kmにおける熱圏中性大気風の測定に成功した。しかし、2011年に実施した米国 NASA Wallops 実験場での昼間下部熱圏リチウム共鳴散乱光は観測できず、放出の不具合と厳しい S/N が原因と推定されると、これまでの実験により取得されたデータから昼間条件下と月明条件下におけるリチウム共鳴散乱光による風速測定を目指し、背景光とリチウム雲の S/N 推定を JAXA の積分球を用いて行うことで、航空機観測により両条件でのリチウム雲観測の可能性が確認された。

2013年7月4日、リチウム共鳴散乱光を用いて、昼間下部熱圏中性風高度プロファイルの観測を行うロケット実験を Wallops 実験場で行った。リチウム放出用ロケットを Wallops から南東方向に打上げ、打上げ後65秒から45秒間(高度約90~123 km)にわたりリチウムを放出した。本実験では高知工科大学と Clemson 大学の観測チームが地上および NASA 航空機からリチウム雲の観測を試みた。

2013年7月20日、リチウム共鳴散乱光を用いて、深夜の月明条件(月齢12)にて下部熱圏中性風高度プロファイルの観測を行うロケット実験を内之浦宇宙空間観測所で行った。23:57:00 JST に S-520-27 号ロケットを南東方向に打上げ、打上げ後497秒から20秒間(高度約120~80 km)にわたりリチウムを放出した。本実験では、高知工科大学と北海道大学、Clemson 大学の観測チームが地上と JAXA 航空機からリチウム雲の観測を試みた。

2. 観測

日中条件下でのリチウム雲の観測は、Wallops 実験場敷地内の1地点に観測点を設け、航空機 NASA-8 は地上観測地点から南東に約300 km、高度約10 km の地点から北北東に飛行しつつ太陽を背にする条件でリチウム雲を観測した。リチウム雲撮影用光学機器には、S/N 向上のために帯域2 nm のバンドパスフィルタ(中心波長671 nm)を装着した一眼レフカメラ(Canon EOS Kiss X4, Nikon D90)を航空機に3台、地上観測地点に2台と、帯域12 nm フィルタ付動画撮影用カメラ(Watec)を航空機と地上観測地点に1台ずつ設置し観測した。

月明条件下でのリチウム雲の観測は、JAXA 航空機「飛翔」と地上3地点(内之浦、種子島、室戸)に帯域2 nm、12 nm のバンドパスフィルタを装着した一眼レフカメラ、Watec および天文用冷却 EM-CCD カメラ(BITRAN BQ-87EM)を設置し観測を試みた。

3. 結果

日中条件下でのリチウム共鳴散乱光の観測は、航空機から約25分間の観測に成功した。放出直後はロケットの軌道に沿ったリチウム雲が形成されていたが、その後は強い熱圏風の高度シアーによりリチウム雲が複雑な形状に広がっていく様子を観測することに成功した。地上での観測は、ロケット打上げ前よりカメラ視野内が雲に覆われたため、リチウム雲を観測することはできなかった。そのため背景光に対し、昼間にどの程度の S/N でリチウム雲を観測できるかは推定しきれない。

月明条件下でのリチウム共鳴散乱光の観測は、航空機と地上2地点で約90秒間の観測に成功した。放出したリチウムが早く拡散したことから、その後のリチウム雲を確認することはできなかった。

4. まとめ

2013年7月に打ち上げられた観測ロケットから放出されたリチウムを航空機および地上から観測し、昼間条件下と月明条件下での下部熱圏リチウム共鳴散乱光の観測に成功した。本実験でリチウム共鳴散乱光の観測に成功したことにより時間帯を問わず下部熱圏でのリチウム共鳴散乱光が観測可能であることが確認できた。本発表では、観測された昼間条件下と月明条件下での下部熱圏リチウム共鳴散乱光の発光強度および S/N の計測結果と下部熱圏中性大気風の初期解析結果およびその問題点について発表する。

PEM36-P15

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 28 日 18:15-19:30

参考文献:

Yamamoto, M.-Y. et al., Thermospheric neutral wind measurement by three rocket-released Lithium clouds: WIND campaign, 37th COSPAR Sci. Assembly, C02-0012-08, p.3528, Montreal, 2008.

キーワード: 観測ロケット, 熱圏, 中性風, リチウム放出装置, 航空機観測

Keywords: sounding rocket, thermosphere, neutral wind, Lithium Ejection Systems, airborne observation

小型ファブリ・ペロー干渉計を用いた熱圏の温度推定手法の改良と得られた温度の精度評価
Improvement of the method for estimating thermospheric temperature using small FPIs and evaluation of their temperatures

中村 義弘^{1*}; 塩川 和夫¹; 大塚 雄一¹; 大山 伸一郎¹; 野澤 悟徳¹
NAKAMURA, Yoshihiro^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; OTSUKA, Yuichi¹; OYAMA, Shin-ichiro¹; NOZAWA, Satonori¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

ファブリ・ペロー干渉計は、630.0nmの波長を持つ地球の酸素大気光を地上から観測することで、熱圏における中性風の風速と温度を計測することができる装置である。名古屋大学太陽地球環境研究所では、超高層大気イメージングシステムの一部として、5台のFPIを所有している。そのうちの2つのFPI (FP00,FP01)は、直径116mmのエタロンを用いており、2000年に日本 (FP00)、2009年にノルウェーのトロンソ (FP01)にそれぞれ導入した。また、その他のFPIは、70mmの小型エタロンを使用しており、2010年から2011年に、タイ (FP02)、インドネシア (FP03)、オーストラリア (FP04)に導入した。これらの3つの小型FPIは、高感度で干渉フリンジを得るために、1024×1024ピクセルで4段ペルチェクーラーを用いた冷却CCDカメラを用いている。しかし、これらの新しく導入された小型FPIを用いた観測から、妥当な温度を導出することができていなかった。そこで本研究では、小型FPIにおける温度導出手法を改良するとともに、得られた温度の精度を評価し、さらに、これまで得られている2年～3年分のデータに対して統計解析を行うことを目的とする。

FPIは、光の入射部のミラーを回転させることで、南北東西の空とレーザーをそれぞれ観測している。しかし、南北東西の撮影から得られるそれぞれの干渉フリンジ画像に対して中心を決定したところ、それらの中心は、南北と東西の方角とレーザーのそれぞれでわずかに異なることがわかった。これは、FPIの上部にある光を入射するミラー部が重いために、光学系がゆがんでいることが原因であると考えた。そこで、旧来は、南北東西それぞれの方角から得られた干渉フリンジ画像を一括した一晩平均の画像から中心決定を行っていたが、本研究では、南北東西それぞれの干渉フリンジ画像からそれぞれの中心を決定することにした。以上の改良の後、温度導出を試みたところ、妥当と思われる温度を得ることができた。本発表では、輝度と温度の標準偏差の関係を明らかにして、温度導出の精度について紹介する。また、FPIのエタロン間隔の温度変化が、熱圏の温度、風速の導出精度にどの程度の影響を及ぼすのかについても今後、実験をして検討していく予定である。

キーワード: ファブリ・ペロー干渉計, 熱圏温度

Keywords: Fabry Perot Interferometers, thermospheric temperature

パラツンカ上空における 630nm 大気光イメージャと HF レーダーを用いた MSTID の統計解析
Statistical characteristics of MSTIDs observed by 630-nm airglow imager and HF-radar echoes at Paratunka, Russia

箕浦 武^{1*}; 鈴木 臣¹; 塩川 和夫¹; 大塚 雄一¹; 西谷 望¹; 細川 敬祐²
MINOURA, Takeshi^{1*}; SUZUKI, Shin¹; SHIOKAWA, Kazuo¹; OTSUKA, Yuichi¹; NISHITANI, Nozomu¹; HOSOKAWA, Keisuke²

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² 電気通信大学大学院情報理工学研究科
¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Department of Communication Engineering and Informatics, University of Electro-Communications

Medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs), which typically have a horizontal scale of 100-500 km and a period of ~1 h, are frequently observed in the F region ionosphere at middle latitudes. To date, quite a few observations of MSTIDs have been carried out especially in the middle latitudes; they predominantly had a northwest-southeast, (northeast-southwest) frontal structure and propagated southwestward (northeastward) in the northern (southern) hemisphere, however their generation and propagation mechanisms are not clear yet. Suzuki et al. [2009] investigated two dimensional characteristics of a nighttime MSTID using the SuperDARN Hokkaido HF radar at Rikubetsu, (43.5 N, 143.6 E), Japan, and an OI 630-nm airglow imager located at Paratunka (53.0 N, 158.2 E), Russia, within the radar field of view (FOV). The Doppler velocities of MSTID echoes observed by the SuperDARN radar showed systematic polarity changes which were consistent with airglow intensity variations. The electric field estimated from the airglow and SuperDARN observations, however, seems to be improbable and the E-F coupling processes would be important to explain the inconsistency. We investigated statistical characteristics of nighttime MSTIDs. Based on the coordinated airglow and SuperDARN measurements from 2011 to 2013, we investigated the relation between the MSTID amplitudes in the 630-nm airglow intensity and the Doppler velocities of the FAI echoes associated with the MSTID pattern. This study may give an observational insight into the E-F coupling quantitatively.

In this presentation, we will report the statistics of the relation of the FAI echoes and airglow signatures of the observed MSTIDs (5 events), which showed spatially conjugation in the radar FOV.

キーワード: 大気光イメージャー, 北海道 SuperDARN レーダー, 中規模伝搬性電離圏擾乱
Keywords: airglow imager, Hokkaido SuperDARN radar, MSTID

HFDを用いた地震に伴う電離圏擾乱の検出 Detection of ionospheric disturbances caused by the earthquake using HFD

高星 和人^{1*}; 中田 裕之¹; 鷹野 敏明¹; 富澤 一郎²

TAKABOSHI, Kazuto^{1*}; NAKATA, Hiroyuki¹; TAKANO, Toshiaki¹; TOMIZAWA, Ichiro²

¹ 千葉大学大学院工学研究科, ² 電気通信大学宇宙・電磁環境研究センター

¹Graduate school of Engineering, Chiba University, ²Center for Space Science and Radio Engineering, Univ. Electro-Comm

これまでの研究より、大規模な地震の発生後に電離圏において擾乱が起こることが多く報告されている。これは、地面の変動や津波により生じた音波や大気重力波が上空に伝搬したためと考えられる。電気通信大学が行っている短波ドップラー (HFD) 観測は、受信周波数のドップラーシフトより電離圏速度を直接求めることができるため、地震による擾乱を観測する手法として適していると考えられる。HFD 観測では、5006 kHz、8006 kHz の電波が送信され、各受信点においてこれらの電波を受信することで電離圏下部の擾乱観測を行っている。今回は 5006 kHz の受信結果を用いて解析を行った。HFD 観測データの存在する 2003 年以降の M6 以上の地震 55 事例について、地震による電離圏擾乱の検出を行った。変動の検出はすべて目視で行い、震源からの距離より予想される変動発生までの時間を考慮した上で、地震発生後に受信周波数が急激な落ち込みや上昇が現れたものを変動検出例とした。

結果として、全 55 事例中 14 事例において変動が検出され、その中で最も規模の小さいものは M6.4 であった。M6.4 以上の地震でも変動が検出されなかった事例も存在するが、その原因の一つとして変動の埋もれがある。夜間および日の出、日の入り時は電離圏が不安定となるため、受信周波数が荒れ、地震による変動との判別が困難となることが多くあった。また、発生した地震の震源付近に観測点が存在せず、変動が検出されない例もみられた。これらを考慮すると、電離圏の安定している時間帯に観測点付近で発生した地震ならば、今回変動が検出された最小規模の M6.4 よりも小さな地震でも変動の検出が期待される。

また、検出された事例について、断層のずれの向きと HFD データでの変動との対応に着目した。日本で発生する地震のほとんどは、逆断層型地震である。逆断層型地震では上盤がずり上がる方向に動くため、これによって大気中に励起される音波の第一波の向きは上方であると考えられる。実際に、変動が検出された例の多くは、電離圏が初めに上向きに速度を持っていることを示していた。さらに、上盤がずり下がる正断層型では変動の向きが逆向きとなるか検証を行った。正断層型地震である 2011 年の 4 月 11 日に発生した福島県浜通り地震について、三つの観測点 (飯館、菅平、木曾) のデータを用いて変動の向きを確認した。その結果、菅平観測点では電離圏速度が最初に下向きになった後に上向きになるというデータが得られた。しかし、他の二点では電離圏速度は上向きになった後に下向き、もしくは上向きのみ、というデータが得られた。従って、電離圏の変動は、逆断層、正断層によって単純に分類されるわけではなく、観測点直下付近の地震計を用いてのより詳細な解析が必要であると考えられる。

キーワード: 電離圏, HFD, 地震, 音波, 大気重力波, 断層

Keywords: ionosphere, HFD, earthquake, acoustic wave, atmospheric gravity wave, fault

Observations of seismo-traveling ionospheric disturbance during the 2011 Tohoku earthquake using HF Doppler
Observations of seismo-traveling ionospheric disturbance during the 2011 Tohoku earthquake using HF Doppler

CHOU, Min-yang^{1*} ; TSAI, Ho-fang¹ ; LIU, Jann-yenq²
CHOU, Min-yang^{1*} ; TSAI, Ho-fang¹ ; LIU, Jann-yenq²

¹Department of Earth Science, National Cheng-Kung University, Taiwan, ²Institute of Space Science, National Central University, Taiwan

¹Department of Earth Science, National Cheng-Kung University, Taiwan, ²Institute of Space Science, National Central University, Taiwan

This paper reports seismo-traveling ionospheric disturbances (STIDs) induced by the 11 March 2011 M9.0 Tohoku-oki earthquake and following pan-Pacific tsunami by two networks of HF (high-frequency) Doppler sounding systems in Japan and Taiwan. The Hilbert-Huang Transform (HHT) is applied to analyze Doppler frequency shifts (DFSs) detecting STIDs, while the time delay, circle, ray-tracing, and beam-forming methods are used to compute the propagation of the detected STIDs. Both STIDs induced by the Rayleigh waves and tsunami of the Tohoku-oki earthquake are detected and discussed.

キーワード: STIDs, Ionosphere, earthquake, tsunami
Keywords: STIDs, Ionosphere, earthquake, tsunami

数値シミュレーションにより導出した地震発生後の中性大気波動のスペクトル分布 Spectrum of the neutral atmospheric waves derived from a numerical simulation of an earthquake

清水 友貴^{1*}; 中田 裕之¹; 鷹野 敏明¹; 松村 充²

SHIMIZU, Yuki^{1*}; NAKATA, Hiroyuki¹; TAKANO, Toshiaki¹; MATSUMURA, Mitsuru²

¹ 千葉大学大学院, ² 電気通信大学附属宇宙・電磁環境研究センター

¹Grad. School of Eng. , Chiba Univ., ²Center for Space Science and Radio Engineering, University of Electro-Communications

In this simulation, two dimensional model is used. The atmospheric perturbation is created by a vertical velocity assuming an upward motion of the sea surface or ground surface. Calculating the temporal variations of neutral density, we derived their spectra.

As a result, it is shown that behavior of atmospheric waves is different for the frequency. For a notable example, variations around 1 mHz propagate to high altitudes 450 km ~500 km and long distance 800 km. On the other hand, variations around 10 mHz propagate almost the same distance in lower altitude of 300 km or less. In addition, variation at 4 mHz are located above the epicenter at 350 km. This causes the variation of GPS-TEC at 4 mHz associated with earthquakes that have ever been reported.

キーワード: 電離圏, 地震, 音波, 重力波

Keywords: ionosphere, earthquake, acoustic wave, gravity wave

Ionospheric effects on the F region during the Sunrise for the annular solar eclipse over Taiwan on 21 May 2012
Ionospheric effects on the F region during the Sunrise for the annular solar eclipse over Taiwan on 21 May 2012

CHUO, Yu-jung^{1*}
CHUO, Yu-jung^{1*}

¹Department of Information Technology, Ling Tung University

¹Department of Information Technology, Ling Tung University

On 21 May (20:56, Universal Time; UT, on 20 May), 2012, an annular solar eclipse occurred, beginning at sunrise over southeast China and moving through Japan, sweeping across the northern Pacific Ocean, and completing its passage over the western United States at sunset on 20 May (02:49 UT, 21 May), 2012. We investigated the eclipse area in Taiwan, using an ionosonde and global positioning system (GPS) satellites measurements. The measurements of foF2, hmF2, bottomside scale height around the peak height (Hm), and slab thickness (B0) were collected at the ionosonde station at Chung-Li Observatory. In addition, we calculated the total electron content (TEC) to study the differences inside and outside the eclipse area, using 3 receivers located at Marzhu (denoted as MATZ), Hsinchu (TNML), and Henchun (HENC). The results showed that the foF2 values gradually decreased when the annularity began and reached a minimum level of approximately 2.0 MHz at 06:30 LT. The hmF2 immediately decreased and then increased during the annular eclipse period. The TEC variations also appeared to deplete in the path of the eclipse and opposite to the outside passing area. Further, the rate of change of the TEC values (dTEC/dt measured for 15 min) was examined to study the wave-like fluctuations. The scale height near the F2 layer peak height (Hm) also decreased and then increased during the eclipse period. To address the effects of the annular eclipse in the topside and bottomside ionosphere, this study provides a discussion of the variations between the topside and bottomside ionospheric parameters during the eclipse period.

キーワード: ionospheric physics, ionospheric disturbances, solar radiation effects

Keywords: ionospheric physics, ionospheric disturbances, solar radiation effects

GPS-TEC観測による中緯度スポラディックEの水平面形状 Horizontal shapes of mid-latitude sporadic-E observed with GPS-TEC

前田 隼^{1*}; 日置 幸介¹
MAEDA, Jun^{1*}; HEKI, Kosuke¹

¹ 北海道大学大学院理学院
¹ Graduate school of Science, Hokkaido University.

The horizontal shapes of sporadic-E (Es) have remained uncovered due to the lack of effective observation methods. We use a dense array of Global Positioning System (GPS) receivers in Japan to map horizontal shapes of mid-latitude sporadic-E layers and explore their diversity. The spatial and temporal resolutions of the GPS array are ~25 km (in horizontal) and 30 s, respectively, which is ideal for studying the horizontal shape and movement of sporadic-E. Sporadic-E can be identified as positive anomalies of total electron content (TEC) along the line of sight between a satellite and a ground-based GPS station.

The results of GPS-TEC observation, i.e., mapping of positive TEC anomaly caused by mid-latitude sporadic E are presented in this presentation with a special emphasis on latitudinal and temporal variations of horizontal shapes of Es-layers. We analyzed ~100 Es events in 2010-2013 to examine the latitudinal dependence of Es frontal structures with three study areas at different latitudes near ionosondes, namely Sarobetsu (geographical latitude: 45.16 N), Kokubunji (35.71 N) and Yamagwa (31.20 N).

As a result, strong Es shares the large-scale frontal structure as a common shape regardless of the occurrence latitude and time (e.g., morning, afternoon, and the evening). The horizontal structures of large-scale fronts are typically elongated in east-west (E-W) with the length and width of ~300 km and ~30 km, respectively. However, lengths vary from 30 to 300 km by occasion. The alignment of frontal structures prefers E-W, ENE-WSW and NE-SW alignment with some exception of NW-SE and NNW-SSE aligned structures.

We will also discuss the possible mechanisms for formation, development, and movement of mid-latitude sporadic-E based on the results of our observations and proposed theories.

キーワード: スポラディック E, GPS, TEC
Keywords: Sporadic-E, GPS, TEC

2周波ソフトウェア受信機を用いたGPS-TEC観測 GPS-TEC observation using two-frequency software receiver

芦原 佑樹^{1*}; 小松 和暉¹
ASHIHARA, Yuki^{1*}; KOMATSU, Kazuki¹

¹ 奈良工業高等専門学校 電気工学科

¹Dept. of Electrical Engineering, Nara National College of Technology

全地球測位システム (Global Positioning System, GPS) は、複数の GPS 衛星から送信される電波を地上受信し、それらの位相差から高精度な測位を行うシステムである。GPS 衛星の搬送波には、L1(1575.42MHz)と L2 (1227.60MHz) の2つの周波数がある。電離圏プラズマ中における電波の屈折率は電子密度に依存する。また、プラズマは分散性媒質であるため、L1 波と L2 波の屈折率は異なるものとなる。そのため、両波間には伝搬遅延時間差 (位相差) が発生する。

GPS-TEC (GPS Total Electron Contents) は、L1 波と L2 波の位相差から GPS 電波伝搬経路上の全電子数を求める手法である。電離層電子密度観測の非常に有用な観測手法であるが、必要となる2周波対応 GPS 受信機は非常に高価である。そのため、国内では、国土地理院の GEONET データを用いた観測例がほとんどである。

情報通信分野では、近年のコンピュータの高性能化を背景として、ベースバンド信号をソフトウェア処理によって復調するソフトウェア受信機が普及している。本研究では、ソフトウェア GPS 受信機を構築し、2周波受信を行う。そして、GPS-TEC 観測結果について評価する予定である。

キーワード: 電離圏, GPS-TEC, ソフトウェア受信機
Keywords: ionosphere, GPS-TEC, software receiver

GPS+QZSS+BeiDou による TEC 観測 Total electron content observation by using GPS, QZSS and BeiDou

衣笠 菜月^{1*}; 高橋 富士信¹
KINUGASA, Natsuki^{1*}; TAKAHASHI, Fujinobu¹

¹ 横浜国立大学
¹Yokohama National University

TEC (total electron content) 観測手法はいくつか存在するが、GPS (global positioning system) などの GNSS (global navigation satellite system) を利用する方法がある。GNSS は地球上のどこからでも利用可能なシステムであるのに対し、特定の地域をカバーする RNSS (regional navigation satellite system) が近年日本や中国で開発されてきている。我々は RNSS を利用した観測に取り組んでいる。

RNSS による TEC 観測の特徴として、1 衛星当たりの連続追尾時間が長いことから、安定的な観測が行える点が挙げられる。また、GNSS と比較して軌道高度が高いことから、より広範囲のプラズマ圏領域の議論が可能になる。一方、RNSS 単独での観測の欠点としては、衛星-受信機の視線ベクトル方向が一定となるため、電離圏の水平方向の電子密度分布を得にくいことがある。この問題は、GNSS の観測値と組み合わせるマルチ GNSS 利用により、解決すると考えられる。

マルチ GNSS の搬送波位相測定値の 2 周波遅延差から TEC を算出する場合、周波数間バイアスが発生するため、これを推定・除去しなければならない。バイアス推定には電離圏内の電子密度分布をモデル化するため、モデル化についての研究報告を行う。また、横浜国立大学内で測定した GPS と QZSS、中国 BeiDou の観測値を使用した、マルチ GNSS-TEC 観測例を示し、議論を行う。

キーワード: 電離層全電子数, 準天頂衛星, BeiDou, GPS, 電離圏, プラズマ圏
Keywords: TEC, QZSS, BeiDou, GPS, ionosphere, plasmasphere

ニューラルネットワークを用いた日本上空における電離圏全電子数のモデル開発 Total Electron Content prediction model over Japan using an artificial neural network

西岡 未知^{1*}; 津川 卓也¹; 丸山 隆¹; 石井 守¹

NISHIOKA, Michi^{1*}; TSUGAWA, Takuya¹; MARUYAMA, Takashi¹; ISHII, Mamoru¹

¹ (独) 情報通信研究機構

¹National Institute of Information and Communications Technology

Forecasting Total Electron Content (TEC) is important for Space Weather; for predicting propagation delay of the radio waves in the ionosphere. Although several empirical and theoretical models have been developed, no model is available for forecasting TEC over Japan. Our purpose is to accomplish an operational TEC model over Japan using an artificial neural network (ANN) technique which is developed by Maruyama [2007]. In our model, absolute TEC values for each day from 27°N to 45°N in latitude and 127°E to 145°E in longitude were projected on a two-dimension TEC map, that is, a local-time and latitudinal map. Then the time-latitudinal variation was fitted by using the surface harmonic function. The coefficients of the expansions were modeled by using a neural network technique. For the learning process, we used absolute TEC value from 1997 to 2013. The input parameters are proxies of the season, the solar activity, and the geomagnetic activity. Thus, daily two-dimensional TEC maps can be obtained for any day when the input parameters are provided. We used input parameters which are available in real-time by some institutes and achieved one-day TEC prediction over Japan.

キーワード: Ionosphere, Total Electron Content, Operational model, artificial neural network

Keywords: Ionosphere, Total Electron Content, Operational model, artificial neural network

日本における50年以上の長期観測データを用いた電離圏嵐統計解析 Statistical Analyses of Ionospheric Storms Over 50 Years In Japan

中村 真帆^{1*}; 鴨川 仁¹
NAKAMURA, Maho^{1*}; KAMOGAWA, Masashi¹

¹ 東京学芸大学物理学科

¹Dpt. of Phys., Tokyo Gakugei Univ.

Statistical analyses of the ionospheric storms over Japan are carried out based on the long-term observations over 50 years in Japan. While there are many types of ionospheric variations such as ionospheric storms, plasma bubbles, TIDs and so on, ionospheric storms are most large fluctuations of electron density in the ionosphere. In general, the increase of the electron density is termed positive storm and the decrease of it is termed negative storm [1]. The positive storms cause satellite-positioning errors due to the delay of radio propagation and negative storms cause HF radio communication outages due to lowering the maximum usable frequency. Because these two types of ionospheric storms shows different characteristics on the duration, scale, and the seasonal dependences, we analyzed ionospheric storm occurrences using critical frequency of the F2 layer; foF2 obtained from ionograms over 4 observation sites (Wakkanai, Kokubunji, Yamagawa, and Okinawa) operated by National Institute of Information and Communications Technology, Japan (NICT) [2]. We extracted ionospheric storms based on the differences between the daily observation values and the one-month median in Japan for more than 50 years. Extracted storms of each station will be analyzed by the occurrences, duration, seasonal dependence and geomagnetic variations.

References

- [1] G. W. Prokss, Ionospheric F-region storms, Vol. 2 of Hand book of Atmospheric Electro- dynamics, CRC Press, 1995.
- [2] World Data Center for Ionosphere, <http://wdc.nict.go.jp/>.

キーワード: 電離圏嵐, foF2, 衛星測位

Keywords: ionospheric storms, critical frequency F2 layer, satellite navigation

「ひので」/XRT を用いた Speckle の統計解析 Statistical analysis of the Speckle applying the "Hinode" / XRT

山田 正矩^{1*}; 野澤 恵¹; 清水 敏文²
YAMADA, Masanori^{1*}; NOZAWA, Satoshi¹; SHIMIZU, Toshifumi²

¹茨城大学大学院理工学研究科, ²ISAS (JAXA 宇宙科学研究所)

¹Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, ²Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency (ISAS/JAXA)

人工衛星の撮像画像には様々な理由で、対象以外のものが撮影されることがある。例えば、傷跡に似た軌跡や、小さな斑点、場合によっては吹雪のように見える。これらはスパイクや、スノーストームといった呼び方があるが、本研究では Speckle と呼ぶ。Speckle の一因として、フレアやコロナ質量放出 (CME) によって生成され 10 keV - 数 10 GeV にまで加速された太陽高エネルギー粒子 (SEP) が検出器に衝突したものが考えられている。SEP に限らず高エネルギー粒子は宇宙天気大きな影響を与える。特に GeV オーダーまで加速された SEP は地磁気に跳ね返されずに、地球大気まで到達する。そのため磁気圏内の低軌道衛星でも衛星障害を起こす可能性があり、安全とは言い難い。従って、SEP がどこまで流入してくるか、その動向を知ることが重要になる。

そこで、本研究では低軌道衛星である「ひので」搭載の X 線望遠鏡 (XRT) 画像データを用いて画像解析を行い、Speckle を検出した。解析期間は 2012 年 1 月から 1 年間で行った。解析結果より、3 月 7 - 8 日において、Speckle の顕著な増加と周期的な変動が見られた。3 月 7 日 00:02 UT に X 5.4 のフレアが発生しており、その影響を受けていると考えられる。Speckle の検出数はフレアの発生前と比較して 3 - 4 倍に増加する時間帯が存在した。また、変動周期は軌道周期に同期していた。さらに衛星軌道情報から増加が高緯度領域上空付近で観測されていることから、高緯度領域への SEP の流入を示唆している。高緯度領域は磁気緯度の高い地域でもあり、SEP 以外の荷電粒子の衝突の可能性が考えられ、地球磁気活動との相関も推測可能である。

本研究はこの詳細な結果を報告すると同時に解析期間を増やした場合についても、Speckle の増減と軌道情報や太陽活動の影響を考察する。

キーワード: 宇宙天気, SEP, フレア, CME, 「ひので」/X 線望遠鏡 (XRT)
Keywords: Space Weather, SEP, Flare, CME, Hinode/X-Ray Telescope(XRT)

ISS-IMAP 観測におけるプラズマバブル発生頻度の季節-経度依存性 Seasonal-longitudinal dependence of the occurrence of equatorial plasma bubbles observed by ISS-IMAP

高橋 明^{1*}; 中田 裕之¹; 鷹野 敏明¹; 齊藤 昭則²
TAKAHASHI, Akira^{1*}; NAKATA, Hiroyuki¹; TAKANO, Toshiaki¹; SAITO, Akinori²

¹ 千葉大学 大学院, ² 京都大学 大学院
¹Chiba University, ²Kyoto University

プラズマバブル (以下、EPB) とは、赤道域電離圏において局所的に電子密度の低い領域が発生する現象で、EPB 内部に含まれる電子密度不規則構造は通信電波にシンチレーションを引き起こす。現在 GNSS の航空航法への応用研究等が進められており、その障害の一つである EPB の発生機構や形態について更なる解明が求められている。

本研究では、国際宇宙ステーション「きぼう」での大気光撮像ミッション ISS-IMAP の観測データを用いて、EPB 発生頻度の季節-経度分布を求めた。EPB は波長 630 nm の大気光画像において筋状の低発光領域として観測される。これを目視によって検出し、EPB 発生イベントの抽出を行った。その結果、2012 年 9 月から 2013 年 8 月の 1 年間で 181 イベントを抽出した。発生頻度分布を求める際、領域を経度 10 度ごとに分割し、各領域における観測時間の合計に対する EPB の観測回数として算出した。EPB は低緯度から中緯度にかけて観測されるため、IMAP 観測位置の緯度が 30 度の範囲内であるときの合計時間を求めている。

上記の過程を経て EPB 発生頻度の季節-経度分布を得た。春季、秋季にはほぼ全経度において EPB が観測されており、アフリカ-アメリカ東海岸地域において非常に高い発生頻度を示した。これらは、DMSP 衛星により EPB の分布を導出した Burke et al.[2004] と同様の結果である。一方、本研究で夏期について太平洋-アメリカ東海岸地域において非常に高い発生頻度を示した。これは、Burke et al. とは明らかに異なる傾向である。Burke et al. では DMSP 衛星の密度観測データより EPB を検出しているが、DMSP 衛星は高度 800 km に位置しており、ISS-IMAP により観測される高度 (250 km) に比べかなり高高度である。したがって ISS-IMAP では高高度まで発達しないような EPB を検出したことによりこのような違いが生じたのではないかと考えられる。

この結果を踏まえて、EPB の成長を促すパラメータ (東向き電場、電子密度勾配、中性粒子-イオンの衝突周波数、etc.) の季節-経度分布を個別に解析した。本発表にて、その結果について報告する。

キーワード: 赤道域電離圏, プラズマバブル, 大気光, ISS-IMAP
Keywords: Equatorial ionosphere, Plasma bubble, airglow, ISS-IMAP

Pc5 が関与した脈動オーロラの変調 A coherent modulation of pulsating aurora at Pc5 frequency

坂翁介^{1*}; 林幹治²; クリムシュキン ドミトリ³; マガー パベル³
SAKA, Osuke^{1*}; HAYASHI, Kanji²; KLIMUSHKIN, Dmitri³; MAGER, Pavel³

¹ オフィス ジオフィジク, ² 東京大学, ³ ロシア科学アカデミー
¹Office Geophysik, ²U. Tokyo, ³Russian Academy of Sciences

Ground and satellite magnetometer observations and all-sky video images revealed that the Pc5 pulsations that occurred in 17 January 1994 showed a wide distribution in longitude from Alaska, USA (0 MLT) to the Hudson bay, Canada (11 MLT) and in latitudes from 62N (L=4.5) to 70N (L=8.5).

Auroras in all-sky image were composed of field line resonance (FLR) in higher latitudes in 67-70N and pulsating aurora (PsA) in lower latitudes in 62-67N.

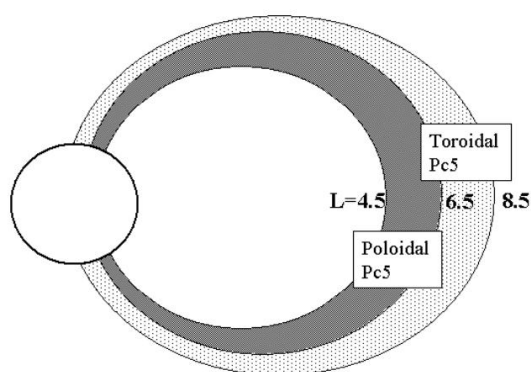
It is found that the PsA, FLR, and field magnitude at the geosynchronous altitudes were all oscillated coherently at Pc5 periodicities.

We conclude that the coherent modulation of FLR and PsA are attributable to toroidally and poloidally polarized Pc5 pulsations, respectively, generated by the polarization splitting of the Alfvén spectrum by the finite plasma pressures.(1), (2).

References

1. Klimushkin, D.Yu., Mager, P.N., Glassmeier, K.-H., 2004. Ann.Geophys.
2. Saka, O., Hayashi, K., Klimushkin, D.Yu, Mager, P.N., 2014. JASTP.

キーワード: Pc5 脈動, 脈動オーロラ, ポロイダルモード
Keywords: Pc5 pulsations, pulsating aurora, poloidal mode



脈動オーロラの発生条件：低温電子と電場の役割 Generation of pulsating aurora: Role of cold electron and electric field

佐藤 夏雄^{1*}; 門倉 昭¹; 田中 良昌¹; 西山 尚典¹

SATO, Natsuo^{1*}; KADOKURA, Akira¹; TANAKA, Yoshimasa¹; NISHIYAMA, Takanori¹

¹ 国立極地研究所

¹National Institute of Polar Research

脈動オーロラはオーロラサブストームの回復期に必ず出現する普遍的な現象である。この脈動オーロラの基本的特性である 10 秒前後の準周期的変調、パッチ状やバンド状などの形状、定在型や伝播などの動き、などの発生機構は未だに解明されていない。これらの特性を解明する上で、衛星-地上同時観測は重要である。これまでの THEMIS 衛星と地上全天カメラ網で同時に観測された脈動オーロラの粒子・電磁場・波動などの特性比較から、次の事が明らかになってきた。

1) 全ての脈動オーロライベントは 5 keV 以上の高エネルギー電子フラックスが増加する時に起こっている、2) 20eV 以下の低温電子フラックスと電場の準周期的変動が脈動オーロラの準周期的な変調に対応している、3) これらの低温電子フラックスと電場の準周期的変動が低周波電磁コーラス波動 (lower-band electromagnetic chorus wave) と静電的な電子サイクロトロンハーモニック波動 (electrostatic Electron Cyclotron Harmonic wave: ECH wave) の準周期的な変動と一対一の良い対応を示す場合がある、4) 全ての脈動オーロラがコーラス波動や ECH 波動の出現に対応しているわけではない。

本講演では、強い脈動オーロラが起こっている領域と起こっていない領域の境界が極めてはっきりした現象の領域を THEMIS 衛星が通過したイベントに注目した。これら領域内外でどのような特性の変化を THEMIS 衛星が観測したかを調べた。その結果、強い脈動オーロラが発生している領域内では数 mV/m の強い静電場が存在し、それが 20 秒前後の周期で変調していた。300Hz 以下の低周波数 ULF-ELF 帯静電波動も観測され、その強度変調が静電場の準周期的変調と良い一致を示した。さらに、20eV 以下の低温電子フラックスも同様な準周期的変調を示していた。なお、ULF-ELF 帯波動の磁場成分は極めて弱く、かつ、lower-band コーラス波動も観測されなかった。そして、衛星が脈動オーロラ領域から抜けて出て暗い領域に入ると、それまで活発であった静電場、ULF-ELF 帯の静電波動、低温電子フラックス、などの準周期的変調はピタリ止まった。興味深いことに、10keV 以上の高エネルギー電子フラックスは脈動オーロラが起こっていない領域に入ってもその量は減少していなかった。一方、顕著な低温電子フラックス量の減少と電子温度の上昇が観測された。このイベント例から、低温電子フラックスや電場などが脈動オーロラの発生にどのように寄与しているかを考察する。

キーワード: オーロラ, 脈動オーロラ, コーラス波動, 磁気圏, 電離圏, 極域

Keywords: aurora, pulsating aurora, chorus wave, magnetosphere, ionosphere, polar region

カナダ・アサバスカで同時に観測された VLF/ELF 波動とパルセーティングオーロラ の高時間分解能相関解析 High-resolution correlation analysis between VLF/ELF chorus waves and pulsating au- rora observed at Athabasca, Canada

砂川 尚貴^{1*}; 塩川 和夫¹; 三好 由純¹; 片岡 龍峰²; 尾崎 光紀³; 澤井 薫³; IAN Schofield⁴; MARTIN Connors⁴
SUNAGAWA, Naoki^{1*}; SHIOKAWA, Kazuo¹; MIYOSHI, Yoshizumi¹; KATAOKA, Ryuho²; OZAKI, Mitsunori³; SAWAI,
Kaoru³; IAN, Schofield⁴; MARTIN, Connors⁴

¹ 太陽地球環境研究所, ² 国立極地研究所, ³ 金沢大学, ⁴ アサバスカ大学

¹Solar-Terrestrial Environment, ²National Institute of Polar Research, ³Kanazawa University, ⁴Athabasca University

私たちは、カナダ・アサバスカ観測点（磁気緯度 61.2 度、L=4.4）で、ループアンテナを用いて 100kHz サンプルの VLF/ELF 波動観測を 2012 年 9 月 25 日から行っている。2013 年 10 月からの冬期には狭視野の EMCCD カメラを設置して同時定常観測を行い、オーロラと VLF/ELF 波動の関係を調べている。本研究では、2013 年 2 月 7 日に観測されたパルセーティングオーロラとコーラス波動の間に見られた相関関係について調べた。このパルセーティングオーロラの強度変化と 1.5-2.5 kHz のコーラス波動の強度変化のパワースペクトルを比較し、両者は 0.1-0.15 Hz の同じ脈動周期があることが分かった。これらの間の相互相関解析から、オーロラ粒子とコーラス波動の磁気圏赤道面から地上までの到達時間差を見積もった結果、2つのパターンの時間差が数十秒スケールで切り替わっていることを見出した。1つ目のパターンは、波動よりも電子の方が 2 秒遅く電離圏に到達していることを示しており、これは南向きに伝搬した電子が南側半球で反射した場合の理論値と一致する。2つ目のパターンは、波動よりも電子の方が 4.5 秒早く電離圏に到達していることを示しており、これは南向きに伝搬した波動が南側半球で反射した場合の理論値と一致する。これらの結果は、高エネルギー電子とコーラス波動の相互作用が数十秒スケールで切り替わっていたことを初めて示すものである。

キーワード: パルセーティングオーロラ, コーラス波動, 波動粒子相互作用, 地上観測

Keywords: pulsating aurora, chorus waves, Wave-particle interactions, ground-based observation

ディフューズオーロラに伴う相対論的電子降り込み Relativistic electron precipitations in association with diffuse aurora

栗田 怜^{1*}; 門倉 昭²; 三好 由純³; 佐藤 由佳²; 三澤 浩昭¹; 森岡 昭³
KURITA, Satoshi^{1*}; KADOKURA, Akira²; MIYOSHI, Yoshizumi³; SATO, Yuka²; MISAWA, Hiroaki¹; MORIOKA, Akira³

¹ 東北大学大学院理学研究科, ² 国立極地研究所, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Tohoku Univ., ²National Institute for Polar Research, ³STEL, Nagoya Univ.

It has been widely thought that diffuse auroras are generated by electron precipitations in the energy range from a few keV to tens keV. Recent simulation results based on the quasi-linear theory showed that the scattering by whistler-mode waves plays an important role in the production of precipitating electrons responsible for diffuse auroras. A test particle simulation on electron-whistler interactions shows that relativistic electrons can be scattered into the loss cone simultaneously with the electrons in the energy range from a few keV to tens keV. Thus, it is expected that relativistic electrons precipitate into the atmosphere in association with diffuse auroras if whistler-mode waves contribute to generation of diffuse auroras. To examine this hypothesis, we investigated conjugate observations of SAMPEX and the all sky camera at Syowa Station on the dawn side, where diffuse auroras are frequently observed. In this study, we show a case study that relativistic electron (>1 MeV) precipitations observed by SAMPEX are associated with the diffuse aurora observed at Syowa Station. The SAMPEX observation shows that the enhancement of precipitating relativistic electrons are well correlated with that of precipitating >150 keV electrons, indicating that electrons in the energy range from a few keV to 1 MeV precipitate into the atmosphere simultaneously. It is observational evidence that whistler mode waves contribute to generation of diffuse auroras.

キーワード: ディフューズオーロラ, ホイッスラーモード波動, 波動粒子相互作用, 相対論的電子, 放射線帯
Keywords: diffuse aurora, whistler mode wave, relativistic electron, radiation belts, wave-particle interaction

プラズマ圏の生成 Refilling of Plasmasphere

渡部 重十^{1*}
WATANABE, Shigeto^{1*}

¹ 北海道大学大学院理学研究院
¹Hokkaido University

Satellite observations have revealed that ions are heated in the ionospheric polar region and are flowing to the magnetosphere. The fluxes of H⁺, He⁺, and O⁺ are $\sim 10^{11}$ ions m⁻² s⁻¹, $\sim 10^{11}$ ions m⁻² s⁻¹, $\sim 10^{10}$ ions m⁻² s⁻¹, $\sim 10^{10}$ ions m⁻² s⁻¹ during the solar maximum and $\sim 10^{10}$ ions m⁻² s⁻¹, $\sim 10^9$ ions m⁻² s⁻¹, $\sim 10^9$ ions m⁻² s⁻¹ near the solar minimum condition, respectively. The large amount of ions, including heavy ions such as O⁺, contributes the refilling of plasmasphere and inner magnetosphere. The ions are formed often as conics / transversely accelerated ion in the topside polar ionosphere. To understand the refilling process, the refilling time scale and the effects to the structure and dynamics of plasmasphere and inner magnetosphere, we have developed a three dimensional model of Atmosphere ? Plasmasphere including Electrodynamics (APE model). The model calculates densities, velocities and temperatures for electron, O²⁺, N²⁺, NO⁺, O⁺, He⁺ and H⁺ at altitudes from 90 km to 10 Re and for N₂, O₂, O, He and H in the thermosphere, and electric fields in the ionosphere, plasmasphere and inner magnetosphere. We calculate also parallel and perpendicular components of ion and electron temperatures to include the effect of perpendicular heating of ion in the polar ionosphere. The results show clearly the importance of ion heating in the polar region for the structure of plasmasphere, the refilling and the response to the magnetic disturbance.

あけぼので観測された $M/Q=2$ イオンサイクロトロンホイッスラの解析 $M/Q=2$ Ion Cyclotron Whistlers Observed by Akebono

松田 昇也^{1*}; 笠原 禎也¹; 後藤 由貴¹
MATSUDA, Shoya^{1*}; KASAHARA, Yoshiya¹; GOTO, Yoshitaka¹

¹ 金沢大学

¹Kanazawa University

雷放電ホイッスラは地上付近で発生する雷放電に伴って励起される VLF 波動であり、電離層を突き抜けて地球磁気圏内を伝搬するものがあけぼの衛星などの観測によって報告されている。多くの衛星観測による結果から、雷放電ホイッスラは数十 kHz 以下のホイッスラモード (右回り偏波) の波動であることが知られている。一方で、複数のイオンが存在するプラズマ中では、 H^+ のサイクロトロン周波数以下でイオンモード (左回り偏波) のプラズマ波動が伝搬可能である。雷放電ホイッスラの低周波成分は、ときに H^+ のサイクロトロン周波数をも下回って伝搬するが、その際にイオンモードのクロスオーバー周波数付近で波動の一部がモード遷移を伴い、左回り偏波のイオンサイクロトロンホイッスラが励起されることがある [1]。イオンモードのクロスオーバー周波数は、プラズマ中のイオン組成によって変動することが知られており、イオンサイクロトロンホイッスラの伝搬の様子を解析することで、伝搬経路上のイオン組成を推定することが可能であると考えられる。

Watanabe et al.[2] は ISIS-2 による観測から、高度 1,360 km 付近に $M/Q=2$ イオンの存在を示唆するイオンサイクロトロンホイッスラを発見した。彼らはそのイオンを、電離層から供給された D^+ と推測し、deuteron whistler と名付けた。

本研究では、あけぼの衛星の VLF 波動観測装置によって観測された ELF 帯の電磁界波形を詳細解析し、観測史上最も高い、高度 4,500km 付近で観測された " $M/Q=2$ イオンサイクロトロンホイッスラ" を報告する。これらは観測点付近に He^{++} や D^+ といった $M/Q=2$ イオンが存在することで、 H^+ モードと He^+ モードの二つのイオンモードの間に、新たに $M/Q=2$ イオンモードが生じたことを示唆するものである。

ELF/VLF 帯のプラズマ波動とプラズマ粒子との相互作用の解明は、2015 年冬に打ち上げが予定されている次期地球内部磁気圏観測衛星 ERG[3] でもサイエンス目標に掲げられており、近年非常に注目されている。また、プラズマ圏内のイオン組成を知ることは、ray tracing などの高度なシミュレーションを行うための事前情報としても非常に重要である。本講演では、 $M/Q=2$ イオンサイクロトロンホイッスラを含む多くの観測例から、あけぼの衛星の軌道がカバーする広域のイオン組成比を導く取り組みについても紹介する。

[1]Gurnett, D. A., S. D. Shawhan, N. M. Brice, and R. L. Smith (1965), Ion cyclotron whistlers, *J. Geophys. Res.*, 70(7), 1665-1688, doi:10.1029/JZ070i007p01665.

[2]Watanabe, S., T. Ondoh (1975), Deuteron whistler and trans-equatorial propagation of the ion cyclotron whistler, *Planet. Space Sci.*, vol. 24, 359-364.

[3]Miyoshi, Y., Ono, T., Takashima, T., Asamura, K., Hirahara, M., Kasaba, Y., Matsuoka, A., Kojima, H., Shiokawa, K., Seki, K., Fujimoto, M., Nagatsuma, T., Cheng, C.Z., Kazama, Y., Kasahara, S., Mitani, T., Matsumoto, H., Higashio, N., Kumatani, A., Yagitani, S., Kasahara, Y., Ishisaka, K., Blomberg, L., Fujimoto, A., Katoh, Y., Ebihara, Y., Omura, Y., Nose, M., Hori, T., Miyashita, Y., Tanaka, Y.-M. and Segawa, T. (2013) The Energization and Radiation in Geospace (ERG) Project, in *Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere* (eds D. Summers, I. R. Mann, D. N. Baker and M. Schulz), American Geophysical Union, Washington, D. C.. doi: 10.1029/2012GM001304

キーワード: イオンサイクロトロンホイッスラ, $M/Q=2$ イオン, EMIC 波動, あけぼの衛星

Keywords: ion cyclotron whistler, $M/Q=2$ ion, EMIC wave, Akebono satellite

THEMIS 衛星で観測された EMIC トリガード放射におけるサブパケット構造 Sub-packet structures in the EMIC triggered emission observed by the THEMIS probes

中村 紗都子^{1*}; 大村 善治²; 小路 真史³; 能勢 正仁⁴
NAKAMURA, Satoko^{1*}; OMURA, Yoshiharu²; SHOJI, Masafumi³; NOSE, Masahito⁴

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻 地球物理学分野, ² 京都大学生存圏研究所, ³ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ⁴ 京都大学大学院理学研究科

¹Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, ²Reserach Institute for Sustainable Humansphere, Kyoto University, ³Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ⁴Graduate School of Science, Kyoto University

We analyse Electromagnetic Ion Cyclotron (EMIC) triggered emission by the data from the THEMIS probes. These phenomena have recently received much attention because of the possibility of their strong interaction with energetic particles in the inner magnetosphere in spite of their scarceness in observations[1,2,3]. For 1400-1445 UT on 9 September 2010, THEMIS A, D and E observed strong EMIC waves with rising tone emissions. The probes were located near the dayside magnetopause at $8 R_E$ of the radial distance from the Earth, 13 MLT, and a few degrees of the geomagnetic latitude. During this time interval, the geomagnetic field was very distorted by the variation in the solar wind. We assume these emissions were excited around minimum-B pockets in accordance with the magnetospheric compression. It is found the rising tone emissions comprise of some smaller rising tones, which are called "sub-packet structures"[4]. We compare these observed sub-packet structures with the nonlinear wave growth theory developed by Omura et al. [5]. The observed relationship between the amplitudes and frequencies of the emissions are well explained by the theory, and it is also found that the threshold and optimum amplitudes for the nonlinear growth agree well with the observed dynamic spectra.

[1]Pickett, J. S., et al. (2010), Cluster observations of EMIC triggered emissions in association with Pc1 waves near Earth's plasmapause, *Geophys. Res. Lett.*, 37 (9), doi: 10.1029/2010GL042648.

[2]Shoji, M., and Y. Omura (2012), Precipitation of highly energetic protons by helium branch electromagnetic ion cyclotron triggered emissions, *J. Geophys. Res.*, 117 (A12), doi:10.1029/2012JA017933

[3]Omura, Y., and Q. Zhao (2012), Nonlinear pitch angle scattering of relativistic electrons by EMIC waves in the inner magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 117 (A8), doi:10.1029/2012JA017943.

[4]Shoji, M., and Y. Omura (2013), Triggering process of electromagnetic ion cyclotron rising tone emissions in the inner magnetosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 5553-5561, doi:10.1002/jgra.50523.

[5]Omura, Y., J. Pickett, B. Grison, O. Santolik, I. Dandouras, M. Engebretson, P. M. E. Decreau, and A. Masson (2010), Theory and observation of electromagnetic ion cyclotron triggered emissions in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 115 (A7), doi:10.1029/2010JA015300.

Statistical analysis of ionospheric Pi2 pulsations observed at mid and low latitude by the SuperDARN Hokkaido radar
Statistical analysis of ionospheric Pi2 pulsations observed at mid and low latitude by the SuperDARN Hokkaido radar

TERAMOTO, Mariko^{1*} ; NISHITANI, Nozomu²
TERAMOTO, Mariko^{1*} ; NISHITANI, Nozomu²

¹JAXA, ISAS, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

¹JAXA, ISAS, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

Ultra-low-frequency waves with the periods of 40-150 s are categorized as Pi2 pulsations, which occur over a wide range of latitude in the night side at substorm onsets. To identify the generation mechanism of Pi2 pulsations, a number of studies using different devices such as ground-based magnetometers and satellites have been carried out. These study provide spatial properties of Pi2 pulsations on the ground and in the inner magnetosphere and suggested that high- and mid-latitude Pi2 pulsations are associated with Alfvén waves in the auroral region, while the cavity mode resonance established in the plasmasphere by the fast mode waves has been proposed as a possible Pi2 source at mid and low latitudes.

The interaction of Pi2 pulsations with the ionosphere creates current systems that modify the amplitude and spatial scale size of the waves. In order to construct a coherent view of Pi2 signals measured by ground-based magnetometers, radars and satellites, the effect of the ionosphere needs to be understood.

In present study, statistical studies of Pi2 pulsations in the ionosphere were performed with the SuperDARN Hokkaido radar at Rikubetsu (AACGM magnetic coordinates: 36.5°, 214.7°). The radar can observe the Doppler velocity of ionospheric plasma due to the electric field of Pi2 pulsations in the mid- and low-latitude ionosphere. We investigated the spatial characteristics of the similarity, amplitude ratio, and cross phase between Pi2 pulsations observed by the radar and a ground magnetometer Memambetsu (MMB) which is located close to the radar site. We will present the results and discuss the interaction of Pi2 pulsations with the ionosphere.

サブストーム発生時における磁気圏近尾部 P i 型磁気波動 Pi pulsations in the near-earth magnetotail at substorm onset

櫻井 亨^{1*}; 門倉 昭²; 田中 良昌²; 佐藤 夏雄²
SAKURAI, Tohru^{1*}; KADOKURA, Akira²; TANAKA, Yoshimasa²; SATO, Natsuo²

¹ 東海大学, ² 国立極地研究所

¹Tokai University, ²National Institute of Polar Research

The THEMIS satellite observations showed that Pi 1 and Pi 2 period range oscillations of the magnetic and electric fields play an important role at a substorm onset in the near-Earth magnetotail. They associated energetic particle accelerations toward the inner magnetosphere. The energetic particle accelerations were observed with very similar oscillation signatures to the Pi 1 and Pi 2 period range oscillations observed in the magnetic and electric fields.. This observation suggests that the Pi 1 and Pi 2 period range oscillations might play an important role for contribution to the auroral particle accelerations at substorm onset in the near-Earth magnetotail . The examination has been done on a substorm event observed on 28 February, 2009 at a THEMIS GBO station, Kuujuaq (KUJ) (Mag. Lat.=66.89 N, Mag. Lon.=13.23 E, Mag. Midnight =4.15 UT, L-value = 6.4) in the west coast at the high latitude of the North America Continent. This substorm event was simultaneously observed in the near-Earth magnetotail by the three THEMIS satellites, THEMIS-A, -E, and ?D located in the midnight region at ~8 Re, ~8 Re and ~11 Re, respectively. The data examined in this study are the magnetic field, all-sky images (ASI) and keograms (ASK) obtained at KUJ and the satellite observations of the magnetic field, electric field, and the electron and ion energy spectra in the ESA pair, and peer data. The results show very interesting facts of the Pi 1 and Pi 2 period range oscillations in the magnetic field and auroral activities observed on the ground and their conjunctions of the magnetic, electric fields, and the associated accelerated particles in the near-Earth magnetotail. The implication of this work provides the importance of the Pi 1 and Pi 2 period range oscillations for controlling the substorm onset plasma processes in the near-Earth magnetotail.

キーワード: 磁気圏物理, サブストーム, P i 型波動
Keywords: Magnetospheric Physics, Substorm, Pi pulsations

サブストームオンセット過程

Substorm onset process: Ignition of auroral acceleration and related substorm phases

森岡 昭^{1*}; 三好 由純²; 笠羽 康正³; 佐藤 夏雄⁴; 門倉 昭⁴; 三澤 浩昭¹; 宮下 幸長²

MORIOKA, Akira^{1*}; MIYOSHI, Yoshizumi²; KASABA, Yasumasa³; SATO, Natsuo⁴; KADOKURA, Akira⁴; MISAWA, Hiroaki¹; MIYASHITA, Yukinaga²

¹ 東北大学理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 東北大学理学研究科, ⁴ 国立極地研究所

¹PPARC, Tohoku University, ²STEL, Nagoya University, ³Dep. of Gephys. Tohoku University, ⁴NIPR

The substorm onset process was studied on the basis of the vertical evolution of auroral acceleration regions derived from auroral kilometric radiation (AKR) spectra and Pi pulsations on the ground. The field-aligned auroral acceleration at substorm onset demonstrated two distinct phases. Low-altitude acceleration ($h \sim 3000$ -5000 km), which accompanied auroral initial brightening, pre-breakup Pi2, and direct current of ultra-low frequency (DC-ULF) pulsation, was first activated and played an important role (pre-condition) in the subsequent substorm expansion-phase onset. Pre-breakup Pi 2 is suggestive of the ballooning-mode wave generation, and negative decrease in DC-ULF suggests increasing field-aligned current (FAC). We called this stage the substorm initial phase. A few minutes after this initial phase onset, high-altitude acceleration, which accompanied auroral breakup and poleward expansion with breakup Pi 1 and Pi 2 pulsations, suddenly broke out in an altitude range from 8000-16000 km. Thus, substorm expansion onset originated in the magnetosphere-ionosphere (M-I) coupling region, i.e., substorm ignition in the M-I coupling region. It is suggested that current disruption and subsequent violent energy release from the tail region take place after this ignition. Statistical investigations revealed that about 65% of earthward flow bursts observed in the plasma sheet were accompanied by enhanced low-altitude AKR, suggesting that flow braking of bursts causes FAC and resulting low-altitude field-aligned acceleration in the M-I coupling region. On the basis of these observations, we propose a substorm onset scenario in which FAC that originated from the braking of plasma flow bursts first enhances low-altitude acceleration (substorm initial phase onset), and then the increasing FAC induces current-driven instability in the M-I coupling region, which leads to high-altitude acceleration and resulting substorm expansion-phase onset.

キーワード: サブストーム, オーロラ, 加速域, サブストーム開始

Keywords: substorm, aurora, acceleration region, substorm onset

磁気圏対流駆動機構-バルクフローの役割 drivers of the magnetospheric convection

藤田 茂^{1*}; 田中 高史²
FUJITA, Shigeru^{1*}; TANAKA, Takashi²

¹ 気象大学校, ² 九州大学
¹Meteorological College, ²Kyushu University

We present here the role of the plasma bulk flow in generation of the magnetosphere-ionosphere convection. Traditionally, the magnetospheric convection is studied with the perpendicular flow because this flow is equivalent with the speed of migration of the magnetic field. For example, the perpendicular force balance equations are utilized in discussion of the dynamo generation ($E \cdot J < 0$) in the cusp-mantle region [Tanaka, 1995]. However, since the plasma kinetic energy flux and the internal energy flux are transported along the plasma bulk flow, it is evident that the plasma bulk flow should be considered in generation of the magnetospheric convection. In

addition, the global MHD simulation reveals that the plasmas are accelerated into the cusp from the magnetosheath along the magnetic field. Thus, the plasma bulk flow transports energy into the magnetosphere.

At first, we discuss the dynamo in the cusp-mantle region based on the full set of physical principles (mass conservation, momentum conservation, and energy conservation). As a result, the load in the lower-latitude side of the cusp is invoked by plasma compression due to sudden deceleration of the field-aligned flow from the magnetosheath. The adiabatic assumption invokes pressure enhancement associated with plasma compression. Thus, energy should be supplied to compensate increase in the plasma pressure. As the kinetic energy is much smaller than the electromagnetic energy in the magnetosphere, the electromagnetic energy is converted to the thermal energy. Therefore, the load appears in the lower-latitude side of the cusp. On the other hand, in the cusp-mantle region, plasmas are squeezed with the field-aligned flow toward the lobe region. This yields plasma rarefaction, which eventually invokes energy conversion from the thermal energy to the electromagnetic energy. Thus, the dynamo appears. This process is also explained in terms of the slow mode expansion fan in the cusp-mantle region.

Next, we define an unique magnetospheric energy convection in the dayside magnetosphere. It is noted that the Poynting flux activated in the cusp-mantle region is transported across the dayside magnetosphere to the dayside magnetopause. The electromagnetic energy is totally deposited here. The deposited electromagnetic energy is converted into the thermal energy in the magnetopause. Then we need a mechanism of transporting this thermal energy elsewhere. The MHD simulation shows the thermal energy and the high-speed solar-wind kinetic energy are transported into the cusp from the magnetosheath. This flow goes to the mantle region. Then, the thermal energy transported from the magnetosheath via the cusp is partially converted into the electromagnetic energy in the cusp-mantle region. Finally, the loop of energy convection is completed.

The magnetospheric energy convection is unique because the energy convection and the mass convection show quite different behavior. On the other hand, in the normal fluid like the atmosphere, the energy convection is related to the mass convection in the atmospheric global circulation (convection).

キーワード: 磁気圏対流, MHD シミュレーション, バルクフロー, エネルギー変換, 磁気圏エネルギー対流, カस्पダイナモ
Keywords: magnetospheric convection, MHD simulation, bulk flow, energy conversion, magnetospheric energy convection, cusp dynamo

THEMIS 観測と MHD シミュレーションを用いた近地球プラズマシートにおけるプラズマ圧力の急激な増加に関する研究
Sudden pressure enhancement and tailward retreat in the near-Earth plasma sheet: THEMIS observation and MHD simulation

YAO YAO^{1*}; 海老原 祐輔¹; 田中 高史²
YAO, Yao^{1*}; EBIHARA, Yusuke¹; TANAKA, Takashi²

¹ 京大生生存圏研究所, ² 九州大学宙空環境研究センター

¹Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, ²SERC, Kyushu University

Plasma pressure enhancement is one of the drastic substorm-associated phenomena in the inner magnetosphere. In a substorm occurred on 1 March 2008, four of THEMIS (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms) probes were almost aligned along the sun-Earth line, which was suitable for investigating spatial-temporal evolution of the near-Earth plasma sheet in a substorm. They observed a sudden increase in the plasma pressure at the inner probe (at ~ 7.2 Re), followed by the outer probes (at ~ 7.5 , ~ 8.3 , and ~ 10.4 Re), that is the high pressure region propagates tailward. Hereinafter, we call this sudden pressure enhancement (SPE). We compared the observations with simulation results of a global magnetohydrodynamics (MHD) simulation, and found a fairly good agreement between them in terms of the followings. (1) Tailward propagation of the SPE can be seen only at off-equator after the substorm onset. In the equatorial plane, an earthward propagation of the SPE precedes the tailward propagation. (2) Observations from the three inner probes show that the SPE consists of two enhancements. The first one is attributed to the convergence of bulk flow energy flux, namely flow braking. The latter one is due to the convergence of the thermal energy flux and subsequent inflation of the plasma sheet. (3) Plasma flow turned from the tailward-and-toward-the-equatorial-plane to earthward-and-away-from-the-equatorial plane near the onset from the simulation results. We discuss the spatial-temporal evolution of the plasma flow and the magnetic field during the substorm.

キーワード: サブストーム, THEMIS 衛星観測, グローバル MHD シミュレーション, プラズマ圧力の急激な増加
Keywords: substorm, THEMIS observation, Global MHD simulation, Sudden pressure enhancement

強い北向き IMF 時, 変化する IMF B_y によって発生するシータオーロラ Evolution of theta aurora during strong positive IMF B_z and varying IMF B_y condition

小原 隆博^{1*}
OBARA, Takahiro^{1*}

¹ 東北大学 惑星プラズマ・大気研究センター
¹PPARC, Tohoku University

Formation of the theta aurora, which appears under the condition of northward IMF and greater IMF magnitude, is investigated from the analysis of the numerical MHD simulation. The theta aurora is caused by the transient convection after a sign change of IMF B_y . This transient convection must include a replacement of lobe field lines from old IMF orienting fields, a rotation of plasma sheet to opposite inclination, and a reformation of ionospheric convection cells. In the midst of these reconfigurations, old and new convection system must coexist in the magnetosphere-ionosphere system. In this stage, the polar cap and tail lobes are continuously encroached by the new open field lines connected to the new IMF. Whereas magnetic field lines accumulated in new lobes tend to rotate the outer plasma sheet in the opposite direction, the old merging cell convection still continues to generate closed field lines that must return to dayside against the new lobe formation. As time progresses, the growth of new lobes results in the blocking of the return path toward dayside of closed field lines generated in the old merging cell to form the kink structure in the plasma sheet. Losing their return path, these closed field lines generated from old lobes accumulated on the night side. The theta aurora appears at the foot point of these accumulated closed field lines. In the presentation, we will demonstrate some observational results brought by satellites and ground based instruments, which support above mentioned hypothesis for theta aurora formation.

キーワード: 惑星間空間磁場, 北向き IMF, 変動する IMF B_y , シータオーロラ, シミュレーション, 観測
Keywords: IMF, Strong northward IMF, Varying IMF B_y , Theta aurora, Simulation, Observation

Substorm Onset: Correlation between Ground and Space Observations Substorm Onset: Correlation between Ground and Space Observations

CHENG, Chio^{1*} ; CHANG, T. F.²
CHENG, Chio^{1*} ; CHANG, T. F.²

¹Plasma and Space Science Center, National Cheng Kung University, ²Institute of Space and Plasma Sciences, National Cheng Kung University

¹Plasma and Space Science Center, National Cheng Kung University, ²Institute of Space and Plasma Sciences, National Cheng Kung University

The observations of substorm onset phenomena in the magnetosphere and ionosphere are examined to study their correlation and to understand the substorm onset mechanism. In particular, we examine the Pi2 wave structure, propagation, frequency and growth rate in the magnetosphere observed by the THEMIS satellites in the near-Earth plasma sheet and the structure and propagation of the substorm auroral onset arcs. We show the correlation between the substorm onset wave-like arcs and the Pi2 pulsations in terms of wave structure, propagation, and the exponential growth of arc intensity and Pi2 wave amplitude. In particular, the azimuthal mode numbers of the Pi2 waves and the wave-like arc structure are estimated to be ~ 100 -200. The correlation between the ground and space phenomena strongly supports the kinetic ballooning instability (KBI) as the cause of substorms. KBI is the most natural mechanism for explaining the unstable Pi2 waves in the strong cross-tail current region and the KBI parallel electric field can accelerate electrons along the magnetic field lines into the ionosphere to produce the substorm onset wave-like arcs.

キーワード: substorm, magnetospheric dynamics, THEMIS observation
Keywords: substorm, magnetospheric dynamics, THEMIS observation

THEMIS 観測データに基づくサブストームトリガー機構の解明 Investigation of substorm triggering mechanism based on THEMIS data

町田 忍^{1*}; 宮下 幸長¹; 家田 章正¹; Angelopoulos Vassilis²; McFadden James P.³

MACHIDA, Shinobu^{1*}; MIYASHITA, Yukinaga¹; IEDA, Akimasa¹; ANGELOPOULOS, Vassilis²; MCFADDEN, James P.³

¹名古屋大学太陽地球環境研究所, ²IGPP/EPSS カリフォルニア大学ロサンゼルス校, ³SSL, カリフォルニア大学バークレー校

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²IGPP/EPSS, UCLA, ³SSL, UC Berkeley

本研究では、THEMIS 衛星の 2007 年 11 月から 2009 年 4 月の期間のデータに対して、THEMIS/ASI の地上オーロラ観測から (UCLA 西村幸敏博士が) 求めたサブストームオンセットの発生時刻を時間原点として行った時間重畳法解析の結果を報告する。今回は、オーロラブレークアップの前後それぞれ 100 秒の限られた範囲に時間を限定して、サブストームに伴う $-7.5 > X(\text{Re}) > -23$ の範囲の磁気圏尾部の変化を詳細に調べた。本解析によって、オンセットの 60 秒前に $X \sim -14 \text{ Re}$ で地球向きのプラズマ流が発生し、それが地球向きに移動して $t = 0$ で磁場双極子化が $X = -10 \text{ Re}$ 付近で開始し、それと同時に、 $X = -20 \text{ Re}$ 付近で磁気リコネクションが開始することを確認した。この変動は、われわれの提唱している Catapult Current Sheet Relaxation model の妥当性を裏付けている。

興味深いことに、朝夕向きのプラズマ流速の絶対値 $|V_y|$ が $-20 < t(\text{sec}) < 20$ の時間帯に、プラズマシートおよびプラズマシート境界層で減少する傾向が見られた。今回この現象について個々のイベントを調べたところ、オンセットを挟んで主として夕向き ($V_y > 0$) であったコンベクションに伴う流れが、朝向きの流れ ($V_y < 0$) に変化する際に、短時間その値をゼロとすることに対応していることが判明した。これらは、地球向きの流れが、地球の双極子磁場の影響で偏向あるいは反射されることに関係しており、よく知られているオンセット以降に $X = -10 \text{ Re}$ の近傍において尾部向きのプラズマ流が生成されることと同一の原因をもつ現象であることがわかった。

キーワード: サブストーム, 磁気圏尾部, 磁気リコネクション, 磁場双極子化, テミス衛星

Keywords: substorm, magnetotail, magnetic reconnection, dipolarization, THEMIS probes

磁気圏のグローバルMHDシミュレーションと3次元可視化 Global MHD simulations of magnetosphere and 3-dimensional visualization

荻野 竜樹^{1*}

OGINO, Tatsuki^{1*}

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

最近のIT技術の進歩から、高精度のグローバルMHDシミュレーションと大規模データ解析を行うことが可能になった。特にVRML(Virtual Reality Modeling Language)を用いたボリュームレンダリング法で、空間微分量を用いてシミュレーションの3次元可視化を行い磁気圏ダイナミクスを新しい視点から再構築できる様になった。MHD方程式の基礎物理量に於いて、ベクトル量の回転と発散をとり、磁力線に対して平行成分と垂直成分に分解する。それらの各基礎物理量を3次元可視化し、地球磁気圏のどの領域で値が大きいのか、なぜ大きいのか、MHDモードの分離とその寄与は何かを具体的に明らかにすることができた。

MHD方程式の基礎物理量の空間微分量に注目して平行渦度が平行電流を生成することを確認し、垂直渦度と圧縮性が垂直電流を生成していること、及び、垂直電流と圧縮性と垂直電流の比によってFMS(Fast magnetosonic mode)とSMS(Slow magnetosonic mode)が分離できることを新たに導き出した。空間微分量を3次元可視化・解析することで、電流生成に支配的な物理量とその領域を特定した。地球遠方のプラズマシートに流れる電流生成源は垂直渦度であり、その他の領域の電流生成源は垂直渦度と圧縮性の双方である。また、FMSとSMSのモード分離に成功し、その寄与を明らかにした。地球近傍のプラズマシート内ではFMSが支配的であり、地球から離れるにつれてSMSが支配的となってゆく。リコネクション領域では特にFMSが顕著に励起されている。

キーワード: MHDシミュレーション, 電流生成機構, 渦度と圧縮性, MHDモードの役割, 磁気リコネクション, 磁気圏ダイナミクス

Keywords: global MHD simulation, current generation mechanism, vorticity and compressibility, roles of MHD modes, magnetic reconnection, magnetospheric dynamics

二点観測を用いた地球磁気圏界面三次元フラックスロープ構造の再現 Two-spacecraft reconstruction of a three-dimensional magnetic flux rope at the Earth's magnetopause

長谷川 洋^{1*}; Sonnerup Bengt²; Eriksson Stefan³; 中村 琢磨⁴
HASEGAWA, Hiroshi^{1*}; SONNERUP, Bengt²; ERIKSSON, Stefan³; NAKAMURA, Takuma⁴

¹JAXA 宇宙科学研究所, ²ダートマス大学, ³コロラド大学, ⁴ロスアラモス国立研究所

¹Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, ²Dartmouth College, ³University of Colorado, ⁴Los Alamos National Laboratory

We present first results of a data analysis method, developed by Sonnerup and Hasegawa [2011], for reconstructing three-dimensional (3-D), magnetohydrostatic structures from data taken as two closely spaced satellites traverse the structures. The method is applied to a flux transfer event (FTE), which was encountered on 27 June 2007 by at least three (TH-C, TH-D, and TH-E) of the five THEMIS probes and was situated between two oppositely directed reconnection jets near the subsolar magnetopause under a southward interplanetary magnetic field condition. The recovered 3-D field indicates that a magnetic flux rope with a diameter of about 3000 km was embedded in the magnetopause. The FTE flux rope obviously had a significantly 3-D structure, because the 3-D field reconstructed from the data from TH-C and TH-D (separated by 390 km) better predicts magnetic field variations actually measured along the TH-E path than does the 2-D Grad-Shafranov reconstruction [Hau and Sonnerup, 1999] using the data from TH-C (which was closer to TH-E than TH-D and was at about 1000 km from TH-E). Such a 3-D nature suggests that reconnected field lines from the two reconnection sites may have been entangled in a complicated way through their interaction with each other. The generation process of the observed 3-D flux rope is discussed on the basis of the reconstruction results and anisotropy of observed electron pitch-angle distributions.

Reference:

Hau, L.-N., and B. U. O. Sonnerup (1999), Two-dimensional coherent structures in the magnetopause: Recovery of static equilibria from single-spacecraft data, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 104, 6899-6917.

Sonnerup, B. U. O., and H. Hasegawa (2011), Reconstruction of steady, three-dimensional, magnetohydrostatic field and plasma structures in space: Theory and benchmarking, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 116, A09230, doi:10.1029/2011JA016675.

キーワード: 磁気圏界面, 磁気フラックスロープ, 磁気リコネクション, 磁気静水圧平衡, 編隊観測

Keywords: magnetopause, magnetic flux rope, magnetic reconnection, magnetohydrostatic equilibrium, formation-flying observations

Pi2に伴う、渦状のオーロラ、オーロラサージ、および渦状の電離層電流：西向き伝播の場合
Auroral vortex, auroral surge, and vortical current in the ionosphere associated with the Pi2 pulsations

坂 翁介^{1*}; 林 幹治²
SAKA, Osuke^{1*}; HAYASHI, Kanji²

¹ オフィス ジオフィジク, ² 東京大学
¹Office Geophysik, ²U. Tokyo

The auroral breakup event occurred at 0500UT 27 January 1986 in central Canada is studied using all-sky video image from two optical stations (GWR and SHM) and magnetometer data from three ground stations including the optical stations.

The spatiotemporal motion of the ionospheric vortical current explained the ground magnetometer data in the auroral zone. During the activation of the current vortex, auroras composed of the shear layers rotating clockwise and the auroral surge propagating westward were observed.

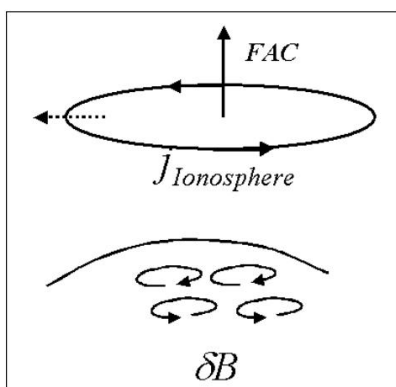
It is found that the auroral surge first appeared at the onset latitudes propagated poleward passing through the auroral vortex and became the poleward boundary aurora-surge (PBAS)(1).

References

1. Saka, O., K. Hayashi, D. Koga (2012), JASTP.

キーワード: オーロラ活動, Pi2 脈動, 電離層渦電流

Keywords: Aurora dynamics, Pi2 pulsation, Ionospheric current vortex



定常沿磁力線電流の駆動機構：プラズマ対流を用いた一般理論 Generation mechanism of steady-state field-aligned currents: A general theory in terms of plasma convection

渡辺 正和^{1*}

WATANABE, Masakazu^{1*}

¹九州大学国際宇宙天気科学・教育センター, ²九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

¹International Center for Space Weather Science and Education, Kyushu University, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

磁気圏-電離圏結合系において、沿磁力線電流はエネルギー・運動量を運ぶという重要な役割を担っている。近年のグローバル電磁流体 (MHD) シミュレーションによれば、大規模沿磁力線電流を駆動する力はほとんどすべての場合圧力勾配であって [Tanaka, 2003, 2007]、慣性力が効くのは sudden commencement (SC) における preliminary impulse (PI) [Fujita et al., 2003] のようなごく特殊な場合のみである。このように、圧力勾配が駆動する定常沿磁力線電流には普遍性があり、磁気圏の力学的性質の本質を表している。しかし、沿磁力線電流生成過程におけるプラズマ対流の役割については、一般には理解されているとは言えない。例えば、プラズマ対流は圧力勾配駆動の沿磁力線電流と無関係であるという誤った認識が一般的である。実際にはプラズマ対流はエネルギー変換において不可欠の役割を果たしている。本研究は、プラズマ対流の果たす役割に重点を置き、沿磁力線電流生成機構の一般理論を展開する。沿磁力線電流は以下の2過程が空間的に隣接して起こることで生成・維持される。(1) Slow mode 擾乱によりプラズマの熱エネルギーを電磁エネルギーに変換する「ダイナモ」過程。定常電流系を維持するためには、磁気圏ダイナモが必要で、これを作っているのが発散する ($\text{div}(\mathbf{v}) > 0$) slow mode 擾乱のプラズマ対流である。波面法線は $-\text{grad}(\mathbf{B})$ 方向を向いており、法線方向の対流速度 (「法線」成分) は slow mode の位相速度となる。Slow mode は沿磁力線電流を伴わない。(2) 磁力線に垂直な電流が沿磁力線電流に転換する過程。これは slow mode 擾乱が Alfvén mode 擾乱に変換することで起こる。圧力勾配が波面法線と磁力線双方に垂直な成分 (「接線」成分) を持つことにより、磁気張力が生じ Alfvén mode が励起する。これに伴い法線方向の対流速度は Alfvén mode の位相速度となる。Alfvén mode は接線方向の流れを持ち、プラズマの運動は回転性に変わる。

References

- Fujita et al. (2003), J. Geophys. Res., 108(A12), 1416, doi:10.1029/2002JA009407.
Tanaka (2003), J. Geophys. Res., 108(A8), 1315, doi:10.1029/2002JA009668.
Tanaka (2007), Space Sci. Rev., 133, 1, doi:10.1007/s11214-007-9168-4.

キーワード: 沿磁力線電流, ダイナモ, 対流

Keywords: field-aligned current, dynamo, convection

近尾部プラズマシートでの尾部向きプラズマ流の多点解析：THEMIS 衛星観測 Multi-spacecraft analysis of tailward plasma flows in the near-Earth plasma sheet : THEMIS observations

岡本 駿一^{1*}; 高田 拓²
OKAMOTO, Shunichi^{1*}; TAKADA, Taku²

¹ 高知工業高等専門学校電気情報工学科, ² 高知工業高等専門学校

¹Kochi National of College of Technology Department of Electrical Engineering and Information Science, ²Kochi National of College of Technology

オーロラ活動に伴って地球近傍の夜側磁気圏プラズマシートでは、磁場が急激に双極子化する。そこでは、地球向きの流れが支配的だが、尾部向き流れも少なからず存在する。尾部向き流れが観測される原因として地球向き流れの跳ね返り、プラズマ流の渦などが指摘されているが、一地点の衛星観測では定量的な議論まで至っていない。本研究では、THEMIS 衛星が磁場双極子化領域で尾部向き流れを観測したイベントを抽出し、尾部向き流れ前に発生している流れの特徴からイベントを分類した。分類した結果を統計的に解析し、多点観測に基づいて尾部向き流れの空間構造を推定した。結果として、地球向き流れの跳ね返りや渦構造の部分観測で説明できるイベントの割合など示した。

キーワード: 磁場双極子化, 尾部向き流れ

Keywords: Dipolarization, Tailward flow

JAXA 準天頂衛星と MAGDAS 地上観測点による沿磁力線電流の同時観測 Simultaneous observation of a field-aligned current by the JAXA QZS satellite and a MAGDAS ground observatory

竹内 勇人¹; 河野 英昭^{2*}; 東尾 奈々³; 松本 晴久³; Baishev Dmitry G.⁴; 魚住 禎司²; 阿部 修司²; 湯元 清文²; 吉川 顕正²; MAGDAS/CPMN group²
TAKEUCHI, Yuuto¹; KAWANO, Hideaki^{2*}; HIGASHIO, Nana³; MATSUMOTO, Haruhisa³; BAISHEV, Dmitry G.⁴; UOZUMI, Teiji²; ABE, Shuji²; YUMOTO, Kiyohumi²; YOSHIKAWA, Akimasa²; MAGDAS/CPMN, Group²

¹九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, ²九州大学国際宇宙天気科学・教育センター, ³宇宙航空研究開発機構, ⁴Yu.G.Shafer Inst. of Cosmophysical Research and Aeronomy, Siberian Branch, Russian Academy of Sci.
¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, ²International Center for Space Weather Science and Education, Kyushu University, ³Japan Aerospace Exploration Agency, ⁴Yu.G.Shafer Inst. of Cosmophysical Research and Aeronomy, Siberian Branch, Russian Academy of Sci.

In this paper we conduct a QZS-MAGDAS conjunction study of a field-aligned current (FAC). QZS (Quasi-Zenith Satellite) is operated by JAXA, and MAGDAS is the ground magnetometer network mainly operated by ICSWSE (International Center for Space Weather Science and Education), Kyushu Univ.

There have been only limited number of papers on satellite-ground conjunction studies of FACs, because satellites usually passes overhead at a ground observatory in a short time.

On the other hand, the footprint of QZS stays near one ground point in Siberia, Russia, because the orbit of QZS is close to that of geosynchronous satellites on the Japanese meridian. Moreover, a few Siberian MAGDAS observatories exist near the QZS footprint.

Another advantage of QZS is that, unlike geosynchronous satellites, QZS has 41deg inclination and 0.1deg eccentricity which enable QZS to stay for a long time at northern high latitudes in the magnetosphere; this high-latitude feature increases the detectability of FACs, because the FAC magnitude is in general smaller near the equator, i.e., the FAC source region in the magnetosphere. Thus, the pair of QZS and Siberian MAGDAS is expected to have more chances of simultaneously observing the same FAC than past satellite-ground pairs.

We have been searching for events in which, when QZS and a Siberian MAGDAS observatory were located near the same field line (calculated by the Tsyganenko 96 model), QZS and MAGDAS simultaneously observed transient magnetic field perturbations.

In this paper we present such an event observed by QZS and a Siberian MAGDAS observatory CHD (Chokurdakh). We have found that the transient magnetic perturbations of this event can be interpreted to have been generated by the motion of a local current circuit consisting of line FACs and an ionospheric current. More details will be presented at the meeting.

磁気圏グローバル MHD シミュレーションによる静止軌道粒子環境数値データと LANL 衛星粒子データの比較 Comparison between particle environment around GEO from global MHD simulation and that from LANL satellite

長妻 努^{1*}; 山本 和憲¹; 久保田 康文¹; 田中 高史¹
NAGATSUMA, Tsutomu^{1*}; YAMAMOTO, Kazunori¹; KUBOTA, Yasubumi¹; TANAKA, Takashi¹

¹ 情報通信研究機構

¹National Institute of Information and Communications Technology

サブストームインジェクションはオーロラブレークアップ等と同様、磁気圏サブストームの典型的な現象の一つであり、これを研究することはサブストームの物理を理解する上で重要である。同時に、サブストームインジェクションは静止軌道の粒子環境を急激に変化させることから、人工衛星の表面帯電等のリスク要因にもつながる。我々は、過去に蓄積した膨大な磁気圏グローバル MHD シミュレーションの計算結果と、LANL 衛星の粒子データを比較することで、シミュレーションの計算結果の評価を試みると共に、シミュレーションの計算結果を用いてサブストームインジェクションによる静止軌道の粒子フラックス増大の推定を試みる。同様の研究としては、過去に中村 [2009] などの試みがある。本研究を通じて、将来的には静止軌道のプラズマ環境変動を予測し、ひいては衛星帯電リスクの予測につなげていきたいと考えている。発表では、シミュレーションと観測の比較を行った結果について紹介する。

参考文献:

中村雅夫、磁気圏シミュレーションによる静止軌道プラズマ環境変動の予測、情報通信研究機構季報, Vol.55, 81-86, 2009.

キーワード: 宇宙天気予報, 磁気圏, サブストーム, モデリング, グローバル MHD シミュレーション, 静止軌道

Keywords: Space Weather Forecast, Magnetosphere, Substorm, Modeling, Global MHD simulation, Geosynchronous orbit

磁気圏静穏時における磁気圏尾部から注入される粒子の軌道とエネルギー分散 Energy dispersion and trajectory of particles injected from the magnetotail in magnetospheric quiet conditions

山内 里子^{1*}; 長井 嗣信²
YAMAUCHI, Satoko^{1*}; NAGAI, Tsugunobu²

¹ 東京工業大学, ² 東京工業大学
¹Tokyo Institute of Technology, ²Tokyo Insutitute of Technology

2007 年ごろから磁気圏静穏時に地球半径の 10 倍程度の朝側から昼側にかけての領域で、数 keV - 数十 keV の荷電粒子のフラックスが増加するインジェクションが人工衛星 Geotail や THEMIS で観測されている。このインジェクションは、電子とイオンの両方でみられる場合と電子のみ見られる場合がある。また、これまでにサブストームが起こっているときに静止軌道で観測されてきたインジェクションとは違い、磁気圏では大きな磁場の変動はなく静穏な状態のときに観測されている。観測された荷電粒子のフラックスは方位角方向に等方的であり、粒子がどのようにドリフトしてきたかは明らかではない。このインジェクションはエネルギー分散を伴っており、粒子のエネルギーごとのフラックスの時間変化を見ると、エネルギーが高い粒子の方がエネルギーが低い粒子よりも早くフラックスが増加し始めていることがわかる。エネルギーによってフラックスの増加に時間差が生じるのは、荷電粒子のドリフト速度がエネルギーによって異なるためであると考えられる。これまでに、我々は磁気圏の赤道面において、磁場をダイポール磁場、電場を朝側から夕方側に向かうような対流電場と地球中心に向かう कोरोテーション電場を足し合わせた電場として荷電粒子のドリフト速度に与え、荷電粒子の軌道を計算した。その結果、対流電場が大きいほど時間差が短く、小さいほど時間差が長くなることがわかった。また、軌道計算の結果では、電子は尾部方向から来て朝側を周る軌道をとる。これは、Geotail と THEMIS の同時多点観測からも磁気圏の夜側ほど早くインジェクションが観測されていること、また、Geotail で観測されたエネルギーによるフラックス増加開始の時間差が昼側ほど長くなることと一致する。逆に、イオンは尾部方向から来て夕方側を周る軌道をとるという計算結果を得た。赤道平面では、電子とイオンが逆向きに地球の周りをドリフトするため、荷電粒子が磁気圏尾部のある領域から同時に注入され、朝側の領域に到達する場合、イオンは電子よりも長い距離をドリフトしてくるので時間がかかる。これは、Geotail によって朝側の領域で電子のインジェクションが観測された数分～数十分後にイオンのインジェクションが観測されていることと一致している。これらのことから、電子は磁気圏の朝側の領域を夜側から昼側の方向へドリフトし、イオンは逆に夕方側の領域を夜側から昼側の方向へドリフトすることがわかった。しかし、ダイポール磁場で与えられる範囲では、観測されるようなエネルギー分散を説明することはできなかった。地球磁気圏は太陽風によって引き伸ばされているため、地球半径の 10 倍よりも尾部の領域では、磁力線が引き伸ばされ、ダイポール磁場とは異なった磁場の形状をしている。観測された荷電粒子は、この尾部の領域から注入されてきたと予測できる。我々は、これらの注入されてきた粒子の軌道とエネルギー分散がどのような特徴を持つのかより詳しく調べるため、荷電粒子の軌道計算をするにあたって、より現実的な磁気圏の磁場のモデルを与えるために、磁気圏における経験的な磁場モデルである Tsyganenko モデルを用いた。磁気圏静穏時において数 keV-数十 keV の粒子がどのような軌道をとるのか、また、尾部のある領域から注入された荷電粒子が、内部磁気圏に到達するまでにどのようなエネルギー分散を持つのか、これらの観測結果と軌道計算を組み合わせ考察する。

キーワード: 磁気圏, 粒子のインジェクション, エネルギー分散, Tsyganenko, 軌道計算, 磁気静穏時
Keywords: magnetosphere, particle injection, energy dispersive, Tsyganenko, quiet condition, trajectory

2-1/2 次元粒子シミュレーションで得られた Dipolarization Front の時間発展及びダイポール領域との相互作用 Time development of the Dipolarization Front and its interactions with the dipole-field region obtained by 2-1/2 dimensi

内野 宏俊^{1*}; 町田 忍²
UCHINO, Hiroto^{1*}; MACHIDA, Shinobu²

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻 地球物理学教室, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所
¹Earth and Planetary Sciences Graduate School of Science, Kyoto University, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

地球磁気圏尾部における磁気リコネクションによって発生する、 B_z の増大 (北向き磁場成分) を伴う地球向きの Bursty Bulk Flow は Dipolarization Front (DF) と呼ばれる。サブストーム発生機構の 1 つである Near Earth Neutral Line モデルの描像では、DF がダイポール領域を圧縮し、かつ自身がダイポール領域と尾部電流層領域の境界付近で Flux Pileup を起こすことで、磁気圏夜側の広い範囲で B_z が増大する (Dipolarization) と考えられている。DF の物理的構造に関する人工衛星観測は数多く存在するものの、プラズマ粒子シミュレーションを用いて DF がダイポール領域付近まで到達した場合について調べた研究は行われていない。

そこで本研究では、地球磁気ダイポールに似た形状の磁場配位と、電流層により引き伸ばされた磁場配位をつなげた初期条件において、空間 2 次元の粒子シミュレーションを行った。そのような電流層の中で磁気リコネクションを発生させ、それにより生じた B_z を伴う地球向きのプラズマ流がダイポール領域付近に到達するまでの時間発展を調べた。

その結果、本シミュレーションでは、ダイポール領域と B_z が Pileup した領域の中間に、 B_z がほとんど上昇しない領域が形成された。これは、(1) 地球向きのプラズマ流が電流層中のプラズマをダイポール領域と電流層境界付近に蓄積させ、(2) 蓄積したプラズマの圧力によってプラズマ流自身が減速を受け、(3) 境界付近から比較的尾部側に B_z が Pileup したためと考えられる。この結果は、DF が磁気圏夜側で広域に B_z を増大させるという、一般的に考えられている DF の効果とは異なるものである。今回の場合、空間を 2 次元に設定したために、ダイポール領域と電流層境界に蓄積したプラズマが Y 方向 (東西方向) に抜けることができなくなり、そのような B_z が上昇しない領域が形成されたと推測される。その他にも、本発表では DF 周辺の粒子速度分布や密度分布などについて、先行研究の観測結果と比較を行いながら考察を行う。

キーワード: サブストーム, ダイポラリゼーションフロント, ダイポラリゼーション
Keywords: Substorm, Dipolarization Front, Dipolarization

小型ダイポール磁場とプラズマ流の相互作用に関する 3次元粒子シミュレーション 3D Full kinetic simulations of plasma flow interaction with meso- and micro-scale magnetic dipoles

臼井 英之^{1*}; 芦田 康将²; 篠原 育³; 中村 雅夫⁴; 山川 宏²; 三宅 洋平¹

USUI, Hideyuki^{1*}; ASHIDA, Yasumasa²; SHINOHARA, Iku³; NAKAMURA, Masao⁴; YAMAKAWA, Hiroshi²; MIYAKE, Yohei¹

¹ 神戸大学大学院システム情報学研究所, ² 京都大学生存圏研究所, ³ 宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所, ⁴ 大阪府立大学

¹Graduate school of system engineering, Kobe University, ²Research Institute for Sustainable Humanosphere, ³Japan Aerospace Exploration Agency/Institute of Space and Astronautical Science, ⁴Osaka Prefecture University

Plasma flow response to a magnetic dipole and the resulting formation of a magnetosphere depends on the intensity of the magnetic moment of the dipole. In this study, we examined plasma flow interactions with a magnetic dipole which is much smaller than the Earth's intrinsic magnetic dipole by performing three-dimensional full Particle-In-Cell simulations. The size of a magnetic dipole immersed in a plasma flow is characterized by distance L from its center at which the equilibrium is satisfied between the pressure of the magnetic field of the dipole and that of the plasma flow. In the Earth's magnetosphere, L implies the magnetopause location. We particularly focused on meso- and micro-scale magnetic dipoles in which L is comparable to and smaller than the gyroradius of ions in the flow. In the meso-scale case, ions kinetics should be dominantly considered while electrons whose gyroradius is sufficiently small can be treated as fluid. In the micro-scale, however, electrons as well as ions should be treated particles because L becomes small and the electron kinetics cannot be ignored either. Our interest is in the formation of current layer at the magnetosphere boundary in the both scales. Corresponding to the formation of a magnetosphere, the boundary current also depends on the size of the magnetosphere.

In the meso-scale case, the boundary current is dominated by the electron diamagnetic current at the large density gradient found at the distance of L . This signature is similar to the case of the Earth's magnetosphere. In the micro-scale case, however, the trajectories of ions and electrons gyration play an important role to determine the boundary current. Since the ion's gyroradius is larger than L , charge separation between ions and electrons occurs in the upstream region. As particles approach to the inner dipole, the electron gyroradius becomes small and electron drift motion becomes dominant. It is also confirmed that static electric field caused by the charge separation affect the plasma dynamics and the resulting current flow.

キーワード: 磁気ダイポール, メソスケール, プラズマ応答, 境界電流層, プラズマ粒子シミュレーション

Keywords: Magnetic dipole, Meso-scale, Plasma response, Boundary current layer, Plasma particle simulation

MESSENGER 探査機を用いた水星磁気圏プラズマシートの厚さ見積もり：惑星間空間磁場に対する応答
Estimation of the plasma sheet thickness in the Mercury's magnetosphere from the MESSENGER observations: IMF dependence

森元 裕也^{1*}; 高田 拓²
MORIMOTO, Yuya^{1*}; TAKADA, Taku²

¹ 高知工業高等専門学校電気情報工学科, ² 高知工業高等専門学校

¹Kochi National College of Technology Department of Electrical Engineering and Information Science, ²Kochi National College of Technology

今までに水星磁気圏に到達した探査機は、1974年から2年間探査を行ったNASAのMariner10と2011年に水星周回軌道に投入されたNASAのMESSENGERの2機のみである。Mariner10のスイングバイの観測データより、水星磁気圏の存在が示されたが、磁気圏内部の定量的な理解はされていない。本研究では、MESSENGERの磁場データを用いて、惑星間磁場(IMF)に対応した水星磁気圏プラズマシートの厚みとプラズマシート内の磁場変動を調べた。また、プラズマシート観測前後のIMFを用いて、プラズマシート観測時のIMFを推定した。この結果、IMFが北向きの場合は、厚さが0.12-0.19RM(水星半径)、IMFが南向きの場合は、厚さが0.02-0.08RMで、IMF南向きでプラズマシートが薄くなることが分かった。さらにIMFが南向き、北向きに問わず、プラズマシート内では、プラズマ流に伴って見られる磁場の突発的な変化が確認された。得られた結果に基づいて、水星磁気圏でのサブストーム現象について議論を行う。

キーワード: メッセンジャー, 水星磁気圏, プラズマシート, プラズマ流, サブストーム
Keywords: MESSENGER, Mercury's Magnetosphere, plasma sheet, plasma flow, substorm

Problems of DC Probe Measurement onBoard Mini/Microsatellite Problems of DC Probe Measurement onBoard Mini/Microsatellite

OYAMA, Koichiro^{1*}

OYAMA, Koichiro^{1*}

¹Plasma and Space Science Center, National Cheng Kung University, Taiwan, ²International Center for Space Weather Study and Education

¹Plasma and Space Science Center, National Cheng Kung University, Taiwan, ²International Center for Space Weather Study and Education

DC Langmuir probe is one of the key instruments to study ionosphere by satellite. It needs a counter electrode whose conductive surface area is at least 1000 times larger than that of surface area of the electrode. This requirement is usually fulfilled for large satellites which have been launched so far for ionosphere study. Now we are jumping into an era to use tiny satellites. Then we will encounter serious problems for DC Langmuir probe measurements. Conductive surface area of the satellite becomes much less than 1000 times, or even equal to the surface area of electrode. As a result, measurement of electron density becomes unreliable, because potential of the electrode with respect to the satellite (counter electrode) cannot reach ambient plasma potential where electron density is calculated. For the worst case, DC Langmuir probe is in double probe region, where the maximum current is controlled by ion current. An electronics needs to measure low current. although to measure the low current is not impossible with low frequency response. Another more serious problem is contamination of electrode as well satellite surface. To avoid the effect of contamination, probe bias of DC Langmuir probe need to be swept with about 10 Hz. These two factors make it possible to use DC Langmuir probe, because to measure low current with high frequency is not possible. We review problems which raises for the ionosphere measurement by small satellite, and propose one solution to avoid these problems to accomplish accurate measurements. The data which have been used here are the contribution of three students, G. S. Jiang, W. H. Chen, and Y. W. Hsu, Plasma and Space Science Center, National Cheng Kung University, Taiwan.

キーワード: microsatellite, Dc Langmuir probe, surface area, contamination

Keywords: microsatellite, Dc Langmuir probe, surface area, contamination

Canadian Instrument Participation in Japanese Space Science Mission: A Retrospective Look Canadian Instrument Participation in Japanese Space Science Mission: A Retrospective Look

YAU, Andrew^{1*}
YAU, Andrew^{1*}

¹University of Calgary
¹University of Calgary

Canada has participated in a number of Japanese space science satellite and sounding rocket missions by contributing scientific instruments and participating in related science investigations since the 1980s, including the Akebono (EXOS-D) and Nozomi (Planet-B) satellite and the SS520-2, S520-23, and S520-26 sounding rocket missions. We review the experience of this participation, including the resulting scientific benefits and the lessons learned.

キーワード: space instrument, space plasma, satellite
Keywords: space instrument, space plasma, satellite

ASICを用いた小型プラズマ波動受信器の開発 Development of Miniaturized Plasma Wave Receiver using ASIC

頭師 孝拓^{1*}; 萩行 憲輔¹; 大西 啓介¹; 小嶋 浩嗣¹; 山川 宏¹
ZUSHI, Takahiro^{1*}; HANGYO, Kensuke¹; ONISHI, Keisuke¹; KOJIMA, Hirotsugu¹; YAMAKAWA, Hiroshi¹

¹ 京都大学 生存圏研究所

¹ Research Institute for Sustainable for Humansphere

Plasma waves are an important physical phenomenon for understanding the electromagnetic environments in space. The plasma wave receiver is roughly divided into two types: a waveform receiver and a spectrum analyzer. Spectrum analyzer provides the frequency spectrums with low noises and high frequency resolution. On the other hand, waveform receiver provides the waveform. Though the waveform has more noise than the spectrum provided by the spectrum analyzer, only the waveform has phase information of a plasma wave. Thus it play a complementary role. However, these plasma wave receivers occupy a large amount of space because of its analog circuits, so a late scientific satellite has only a kind of plasma wave receiver. We have developed miniaturized waveform capture (WFC), a kind of waveform receiver, and sweep frequency analyzer (SFA), a kind of spectrum analyzer, using ASIC (Application Specific Integrated Circuit). We realized 6ch WFC in a chip of 5 mm x 5 mm. We execute experiment expose this chip to radiation. We find that though radiation influence WFC component, especially switched capacitor filter, our WFC fit for the space radiation environment. The SFA has fine frequency resolution, but its time resolution is poor. We propose a new kind of SFA combined with FFT. It has an improved time resolution without losing time resolution. We have developed analog circuits in the new SFA using ASIC technology. Furthermore, we propose the multipoint plasma wave observation system that consisted of some sensor probes using these miniaturized plasma wave receiver. We plan the sounding rocket experiment for performance test of this sensor probe.

太陽系探査を目指す広視野 X線撮像分光装置の開発 Development of a wide-field X-ray imaging spectrometer for solar system exploration

江副 祐一郎^{1*}
EZOE, Yuichiro^{1*}

¹ 首都大学東京 理工・物理
¹Tokyo Metropolitan University

We present our development of a wide-field X-ray imaging spectrometer for solar system exploration. In the past decade or so, various types of X-ray emission have been discovered in the solar system (Bhardwaj et al., 2007, Planet. Space, Sci., Ezoe et al., 2011, Adv. Space, Res.). These X-rays are often associated with energetic particles in planetary magnetosphere and neutrals in planetary atmosphere and cometary coma. Therefore, X-ray observations of solar system objects will lead to better understanding of solar system environments and astrophysical phenomena.

For this purpose, we are developing a wide-field X-ray imaging spectrometer for future exploration missions such as GEO-X (Ezoe et al. 2014, Space Sci. Symposium) and JMO (Sasaki et al. 2011, EPSC-DPS). This instrument is composed of an ultra light-weight X-ray telescope and a low-power radiation-hard semiconductor pixel sensor. The telescope covers a wide field of view of ~4 deg in diameter in 0.3–2 keV with the angular resolution of <5 arcmin. It uses sidewalls of etched holes through thin 4-inch silicon wafers for X-ray mirrors (Ezoe et al., 2010, Mircosys. Tehc.). The detector covers a wide area of ~20 x 20 mm² with a ~300 x 300 μm² pixel. It is an active pixel sensor developed by MPE and PNsens (Strueder et al., 2010, SPIE). Compared to X-ray CCDs, this type is more radiation hard and allows higher frame time less than 1 ms. This instrument can satisfy stringent resource constraints in the exploration missions. The mass, size, and power are estimated to be ~10 kg, ~30 cm cubic, and ~10 W, respectively. Multiple units of this instrument are considered for GEO-X to achieve a wider field of view, while one unit will meet science requirements of JMO. In this presentation, we will describe design, fabrication, and performance of the instrument components and future prospects.

キーワード: X線, 撮像分光, 地球磁気圏, 木星, 火星

Keywords: X-ray, imaging spectroscopy, Earth's magnetosphere, Jupiter, Mars

ENA Imaging On board the DESTINY Mission ENA Imaging On board the DESTINY Mission

BRANDT, Pontus^{1*} ; MITCHELL, Donald¹ ; WESTLAKE, Joseph¹ ; KEIKA, Kunihiro²
BRANDT, Pontus^{1*} ; MITCHELL, Donald¹ ; WESTLAKE, Joseph¹ ; KEIKA, Kunihiro²

¹The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
¹The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, ²Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

Energetic Neutral Atom (ENA) imaging is a technique that enables remote imaging of space plasma and neutral clouds. Several current space-borne missions including Cassini, IMAGE, TWINS, Chandrayaan-1, IBEX, and several future missions such as JUICE make use of ENA imaging to investigate magnetospheric plasma acceleration and evolution; structure and acceleration mechanisms in the boundary between the heliosphere and the interstellar medium; and surface and atmosphere interactions (terrestrial upper atmosphere, terrestrial moon, the Galilean moons, and Titan).

Demonstration and Experiment for Space Technology and INterplanetary voYage (DESTINY; See Kawakatsu et al., this conference) is an innovative technology demonstration mission that is being proposed to JAXA with a low-thrust increase of the apogee of an equatorial orbit, followed by a lunar swing-by, and finally an insertion in to a halo orbit around the Sun-Earth L2 point. This trajectory provides a historical opportunity to perform ENA imaging of the two following compelling targets.

- **The terrestrial magnetosphere:** the equatorial vantage point will offer the first compound view of how ions flow out from the polar ionospheres, , plasma stagnation at the sub-solar magnetopause, ion energization in the plasmashet out to about $20 R_E$ and the subsequent heating and earthward transport that forms the terrestrial ring current.

- **The boundary between the heliosphere and the interstellar medium:** the NASA/IBEX and Cassini missions have revealed a global pattern and possibly dynamics that are believed to originate from ions charge exchanging in the heliosheath. A multitude of compelling science questions have arisen from the combined analysis of these two data sets that have demonstrated that ENA imaging is perhaps the only tool capable of remotely probing the global structure and acceleration processes in this important region.

The key to observing these targets in a new light that goes beyond previous missions is the ability to image with high angular and energy resolution, with a wide field of view (FOV) that can image large portions of the regions simultaneously. In this presentation we discuss a concept of an ENA camera to perform imaging from DESTINY. The ENA camera design is capable of imaging ENAs in the $\leq 1\text{keV} - 100\text{keV}$ range with an angular resolution down to 2 degrees and an energy resolution down to 20%. The current design has a FOV of 120x90 degrees, which dramatically increases the duty cycle over single-telescope detectors on spinning platforms.

A compact, broad-beam, low-energy, LED-based, UV photoelectron source for the calibration of plasma analysers.

A compact, broad-beam, low-energy, LED-based, UV photoelectron source for the calibration of plasma analysers.

Bedington Robert^{1*}; 斎藤 義文¹
BEDINGTON, Robert^{1*}; SAITO, Yoshifumi¹

¹Solar System Science Division, Institute of Space and Astronautical Science, JAXA

¹Solar System Science Division, Institute of Space and Astronautical Science, JAXA

Electrostatic electron analyser instruments are used to make in-situ measurements of space plasmas and are typically designed to detect electrons with energies from a few eV to a few tens of keV. To make optimal use of such instruments, a complete calibration is performed in a laboratory vacuum chamber before flight. An electron source and a moveable stage are used so that the instrument response can be characterised at every relevant electron energy and beam direction. For an ideal calibration, the source should be a uniform, collimated electron beam of controllable energy and flux, which is sufficiently broad in diameter to cover the entrance aperture of the electron analyser instrument being tested.

Various sources are used for such purposes, including radioactive beta-emitters and thermionic emission guns — although the former have fixed flux and are broad-band in energy, and the latter are expensive and produce only a narrow beam with limited energy ranges and limited dynamical control. To produce a broad, uniform, highly-controllable, long-lifetime, monoenergetic beam, UV photoelectron sources are generally preferable. These consist of a UV light source which illuminates a photocathode causing it to release photoelectrons. These electrons, which are released with negligible kinetic energy, are accelerated toward a high transmission grid by an electric field. The source can thus be as wide as the grid and the photocathode, as spatially uniform as the light that falls on the photocathode, and as collimated and monoenergetic as the photocathode and grid are flat and parallel (and thus the E field uniform). The electron flux can be adjusted by adjusting the UV lamp intensity, and the electron energy can be varied by adjusting the strength of the grid-photocathode E-field.

Traditionally the UV photons are created using gas discharge lamps (e.g. mercury, xenon, deuterium), however these typically have poor dynamical control, can create large amounts of background light and are bulky and inefficient. In recent years however, advances in solid-state technologies have enabled increasingly powerful, efficient and affordable LEDs of various UV wavelengths. Accordingly this has enabled compact, low-power, UV-stimulated electron sources that can have intensities that vary between 10 to 10^{-9} electrons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

To meet the requirements for calibrating the electron analysers for the SCOPE (cross Scale COupling in Plasma universE) mission, a 9cm beam diameter, UV photoelectron source of this nature has been built and is being tested. Weighing approximately 1.5kg (excluding power supplies) and consisting of rugged, low cost components it can be mounted inside the vacuum chamber with great flexibility, including on a motorised translation stage.

The SCOPE mission requires several FESA (Fast Electron energy Spectrum Analyser) instruments for 10eV to 30keV electrons and several EISA (Electron Ion Spectrum Analyser) instruments for 10eV to 20keV electrons and ions. The first duty of the new electron source is the testing of prototype developments for the EISA instrument: namely measuring the electron transmission properties of carbon foil and assessing the secondary electron emission performance of candidate dynode materials

キーワード: Electron energy analyzer, Plasma spectrometer, Particle source, Ultra-violet photoelectron, Calibration, UV LED
Keywords: Electron energy analyzer, Plasma spectrometer, Particle source, Ultra-violet photoelectron, Calibration, UV LED

高コントラスト装置を用いた太陽系外惑星キャラクターゼーション Characterization of Exoplanets with High Contrast Instruments

河原 創^{1*}
KAWAHARA, Hajime^{1*}

¹ 東京大学地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

ケプラー衛星や地上 RV 探査によりハビタブルゾーン内の小型系外惑星が多数見つかってきた。この分野における一つの目標として、このような惑星の特徴をいかに知るかということがある。本発表では、我々の 30m 望遠鏡やその他の望遠鏡搭載を目指した装置開発へのアプローチを概説する。これらの装置では、地上から晩期星周りのハビタブルゾーン内惑星の直接撮像を狙っている。地上直接撮像観測においては酸素 1.27 ミクロン線によるバイオマーカー探査が有効であることを示す (Kawahara+12)。またこのような直接撮像装置に必要な極限補償光学とコロナグラフの組み合わせが、他の系外惑星キャラクターゼーション、特に、クローズイン惑星における大気分子種の検出にも有効であることも紹介したい。

キーワード: 系外惑星, 地球型惑星, 直接撮像, バイオマーカー

Keywords: exoplanets, terrestrial planets, direct imaging, biomarker

ジオコロナ撮像装置 LAICA の開発 Development of geocoronal Hydrogen Lyman Alpha Imaging CAmera (LAICA)

佐藤 允基^{1*}; 亀田 真吾¹; 吉川 一朗²; 田口 真¹; 船瀬 龍²; 川勝 康弘³
SATO, Masaki^{1*}; KAMEDA, Shingo¹; YOSHIKAWA, Ichiro²; TAGUCHI, Makoto¹; FUNASE, Ryu²; KAWAKATSU, Yasuhiro³

¹立教大学, ²東京大学, ³宇宙航空研究開発機構
¹Rikkyo University, ²University of Tokyo, ³JAXA

地球大気圏の最も外側で大気が無衝突となる、密度が希薄な領域のことを外気圏と呼ぶ。外気圏における主な構成原子は水素とヘリウムであるが、これらの原子は特定の太陽紫外放射を選択的に散乱しており、地球全体を包む紫外グローを形成することからジオコロナと呼ばれている。その中でも水素ライマン α 線 (121.567nm) が最も明るく、これまでに様々な観測が行われてきた。

ジオコロナを構成する原子の軌道は、弾道軌道、地球を周回する軌道、地球重力圏を脱出する軌道の3種類ある。特に高高度では地球重力圏を脱出する軌道を持つ原子が支配的となり、過去の観測では高度約 $20R_E$ にまで及ぶジオコロナが確認されている。ジオコロナの空間分布の特徴として、外気圏水素が反太陽方向に引き伸ばされ、密度が太陽方向よりも高くなるようなジオテイルと呼ばれる構造や、昼夜、南北、朝夕の非対称性などが知られている。最近では、 $3\sim 8R_E$ までの範囲に存在する水素原子数が磁気嵐に伴って6~17%程度増加するという現象が確認されたが、その原因は未解明である。

過去の計画では地球周回衛星からの観測が主で、ジオコロナの広がりに対して低高度 ($\sim 8R_E$) の観測が多く行われてきた。一方、高高度のジオコロナ分布を捉えるためには地球から十分離れ、ジオコロナの外から観測を行う必要があるが、観測例は極めて少なく、Mariner 5、Apollo 16、のぞみの3例だけである。その中でも2次元イメージャを搭載し、撮像を行ったのは Apollo 16 だけであるが、観測視野は $10R_E$ 程度までとなっている。

そこで本研究では地球を脱出して惑星間空間を航行するような軌道に乗る、超小型深宇宙探査機 PROCYON に搭載予定のジオコロナ撮像装置 LAICA の開発を行っている。月軌道以遠に達する探査機からであれば、地球周回衛星よりも広い観測視野 ($25R_E$ 以上) でジオコロナの全球分布を捉えることが可能となる。目標としては、打ち上げ後1~2週間で観測を行い、広範囲のジオコロナ分布を撮像する。また、打ち上げ後10日から3か月程度の期間で、地球周回衛星に比べて高い時間分解能 (1時間程度) での観測を行い、高高度のジオコロナ分布の変動を捉える。現在は試作機の製作を進め、振動・衝撃試験などを実施している。フライトモデルも2014年5月には完成予定である。本発表では装置の開発状況について報告する。

キーワード: ジオコロナ, ライマン α 線, 外気圏, 地球大気
Keywords: geocorona, Lyman alpha line, exosphere, earth's atmosphere

Effects of finite electrode area ratio on Langmuir probe measurement Effects of finite electrode area ratio on Langmuir probe measurement

CHEN, Wen-hao^{1*}; JIANG, Guo-hsiang¹; HSU, Yu-wei¹; FANG, Hui-kuan³; OYAMA, Koichiro²; CHENG, Chio²
CHEN, Wen-hao^{1*}; JIANG, Guo-hsiang¹; HSU, Yu-wei¹; FANG, Hui-kuan³; OYAMA, Koichiro²; CHENG, Chio²

¹Institute of Space and Plasma Sciences, National Cheng Kung University, ²Plasma and Space Science Center, National Cheng Kung University, ³Department of Physics, National Cheng Kung University

¹Institute of Space and Plasma Sciences, National Cheng Kung University, ²Plasma and Space Science Center, National Cheng Kung University, ³Department of Physics, National Cheng Kung University

Langmuir probe(LP) is a widely used instrument for measuring electron density and temperature on satellites and rockets. Recently pico- and nano- satellites have become more popular, when the surface area of satellite is similar to the probe, the effects on LP measurement due to limited satellite surface area need to be considered, and these effects may cause LP measurement inaccurate. We have investigated the effect of satellite surface area, satellite and probe contamination and LP sweeping frequency in laboratory. Also we have found that the satellite and probe voltage will decrease when a large quantity of electrons are attracted by probe voltage and the contamination effect of satellite surface becomes major.

In summary, a solution to these problems is suggested.

キーワード: Langmuir probe, finite electrode area ratio, electrode surface contamination, pico/nano-satellite, electron temperature, electron density

Keywords: Langmuir probe, finite electrode area ratio, electrode surface contamination, pico/nano-satellite, electron temperature, electron density

Development of Electron Temperature and Density Probe (TeNeP) for Nano- and Micro-satellites -II Development of Electron Temperature and Density Probe (TeNeP) for Nano- and Micro-satellites -II

JIANG, Guo-siang^{1*}; CHEN, Wen-hao¹; HSU, Yu-wei¹; OYAMA, Koichiro²; CHENG, Chio²
JIANG, Guo-siang^{1*}; CHEN, Wen-hao¹; HSU, Yu-wei¹; OYAMA, Koichiro²; CHENG, Chio²

¹Institute of Space and Plasma Sciences, National Cheng Kung University, ²Plasma and Space Science Center, National Cheng Kung University

¹Institute of Space and Plasma Sciences, National Cheng Kung University, ²Plasma and Space Science Center, National Cheng Kung University

The nano/micro-satellite becomes popular for the study of near earth environment. To measure the electron temperature (T_e) and electron density (N_e) in the ionosphere, we have developed the Electron Temperature and Density Probe (TeNeP). The TeNeP measures T_e and N_e based on principles of electron temperature probe (ETP) and planar impedance probe (IP). By combining systems of ETP and IP, T_e and N_e can be measured by one single probe. The TeNeP system has advantages not only as being small, light weighted and low power consumption that fulfills the needs of instruments onboard nano/micro-satellites. It also overcomes problems associated with electrode surface contamination and satellite/probe surface area ratio for DC Langmuir probes.

キーワード: Electron Temperature and Density Probe, nano/micro-satellite, Electron Temperature, Electron Density, electrode surface contamination, satellite/probe area ratio

Keywords: Electron Temperature and Density Probe, nano/micro-satellite, Electron Temperature, Electron Density, electrode surface contamination, satellite/probe area ratio

ロケット実験用プラズマ波動計測小型プローブシステムの開発 Development of the small probe system to measure plasma wave for the sounding rocket experiment

大西 啓介^{1*}; 頭師 孝拓¹; 小嶋 浩嗣¹; 山川 宏¹
ONISHI, Keisuke^{1*}; ZUSHI, Takahiro¹; KOJIMA, Hirotsugu¹; YAMAKAWA, Hiroshi¹

¹ 京都大学生存圏研究所

¹ Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Plasma filling the space is very rarefied. Ions and electrons in space plasma don't exchange their kinetic energy through their collision but through plasma waves. Hence observing plasma wave is essential for measuring space electromagnetic environment. We propose the multipoint plasma wave observation system that consisted of some sensor probes.

The present paper shows the achievements in designing the small sensor probe system which is dedicated to the sounding rocket experiment. The experiment is performance test of the small sensor probe which measures the standard wave in outer space. The necessary components for the small sensor probe are Li-Ion battery, wireless LAN device, plasma wave receiver, A/D converter, and CPU. All of them should be installed in the cubic body with an edge of 10 cm. Therefore, we chose one-chip microcomputers as wireless LAN device, A/D converter, and CPU. The wave receiver is miniaturized by designing the analog ASIC (Application Specific Integrated Circuit).

The wave receiver has the function of observing electromagnetic waves in the frequency up to 100 kHz and we want to take three-axis data at the same time. So, we should design A/D converter which has three simultaneous sampling and sampling frequency over 200 kHz to fulfill the sampling theorem.

We also designed other necessary systems, such as attitude sensor and wireless communication system with the sounding rocket.

キーワード: 宇宙プラズマ, プラズマ波動, 小型センサープローブ, 観測ロケット
Keywords: Space plasma, Plasama wave, Small sensor probe, Sounding rocket

Plasma properties of the space plasma operation chamber at NCKU in Taiwan Plasma properties of the space plasma operation chamber at NCKU in Taiwan

FANG, Hui-kuan^{1*}; HSU, Yu-wei²; CHEN, Wen-hao²; JIANG, Guo-hsiang²; OYAMA, Koichiro³; CHENG, Chio³
FANG, Hui-kuan^{1*}; HSU, Yu-wei²; CHEN, Wen-hao²; JIANG, Guo-hsiang²; OYAMA, Koichiro³; CHENG, Chio³

¹Department of Physics, National Cheng Kung University, ²Institute of Space and Plasma Sciences, National Cheng Kung University, ³Plasma and Space Science Center, National Cheng Kung University

¹Department of Physics, National Cheng Kung University, ²Institute of Space and Plasma Sciences, National Cheng Kung University, ³Plasma and Space Science Center, National Cheng Kung University

The space plasma operation chamber (SPOC), a research facility designed to calibrate and test satellite/rocket-borne instruments and study space plasma processes, is constructed at NCKU in 2009. It is a cylindrical chamber of 2m in diameter and 3m in length. Plasma is produced by two back-diffusion type sources installed at the center of both chamber sides. The sources produce ions of controllable drifting energy from a few ten to several hundred eV and density up to 10^6 cm^{-3} . These ions are neutralized by thermal electrons emitted from Nickel cathodes, and collide with neutral molecules in the chamber of pressure $\sim 2.2 \times 10^{-4}$ Torr, and a plasma environment with ion temperature $\sim 300\text{K}$ and electron temperature $\sim 1000\text{-}3000\text{K}$ is formed in the chamber. This paper presents measurement results of a retarding potential analyzer (RPA), an electron temperature and density probe (TeNeP) and a Langmuir probe installed on the 2-axis moving system in SPOC. The thermal and beam component ion energy distributions at different distances from the ion source and the electron temperature/density spatial distributions in the SPOC will be presented. The collision process of ions with neutral molecules will also be discussed.

キーワード: Plasma properties, space plasma operation chamber, back-diffusion plasma source, retarding potential analyzer, electron temperature and density probe, Langmuir probe

Keywords: Plasma properties, space plasma operation chamber, back-diffusion plasma source, retarding potential analyzer, electron temperature and density probe, Langmuir probe

探査機搭載用粒子分析器開発に向けた較正システムの構築 Construction of a calibration system for developing space-borne particle analyzers

伊藤 史宏^{1*}; 平原 聖文¹; 下山 学¹; 林 鮎子¹; 石黒 恵介¹; 小木 曾 舜¹
ITO, Fumihiko^{1*}; HIRAHARA, Masafumi¹; SHIMOYAMA, Manabu¹; HAYASHI, Ayuko¹; ISHIGURO, Keisuke¹; KOGISO, Shun¹

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所

¹ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University

地球惑星電磁気圏における物理現象の理解を深める上で、中性大気の変動およびプラズマの運動と両者の相互作用を考へることは極めて重要であり、探査機を用いた詳細な観測が必要とされている。そこで我々は、惑星大気を対象とする新規技術を用いた探査機搭載用粒子分析器の開発を行っている。開発の進行に伴い分析器の較正装置が必要とされる。

我々が開発を行っている粒子分析器の較正は、宇宙空間を模擬したチェンバー内に分析器を置き、特性の明確なイオンビームを照射し、それに対する分析器の応答を調査することにより行われる。我々は、すでに10keVから150keVまでのエネルギー範囲のイオンビームを照射する装置(ビームライン)の構築および整備を行っている。しかし開発中の分析器は惑星大気の観測を行うことを想定したものであり、較正には数十eVの超熱的イオンビームを照射する必要がある。具体的には10eV/chargeから10keV/chargeまでのエネルギー範囲において、 H^+ 、 He^+ 、 O^+ 、 N^+ 、 Ar^+ といった単原子イオンビームに加え、 N_2^+ 、 O_2^+ 、 CO_2^+ のような分子イオンビームを照射することが可能なビームラインが必要とされる。そこで我々は10keV/charge~150keV/chargeのビームラインに加え、新たに10eV/charge~10keV/chargeの超熱的エネルギービームラインの構築、整備を進めてきた。最終的にはそれぞれを統合制御する較正システムを構築する予定だが、まずは後者の構築、整備を行った。

超熱的エネルギービームラインは主に6つの部位(イオン源、電磁石型質量分析器、ビーム径拡張器、主加速器、真空チェンバー、真空用ターンテーブル)から構成されている。ガスボンベからイオン源に導入された中性ガスは、フィラメントから放出された熱電子によってイオン化される。発生したイオンは初期加速され、電磁石型質量分析器によってイオン種が弁別される。イオンはビーム径拡張器において垂直方向の電場の二次元ラスタ走査によってその径が拡大され、さらに加減速を経て平行化される。平行化されたイオンビームは所定のエネルギーまで加減速され、真空チェンバーに導入される。一方、較正する分析器は真空チェンバー内のターンテーブルの上に置かれ、ターンテーブルの方位角、仰角を制御することで分析器へのビームの入射角度を変化させることができる。また、具体的に以下のパラメータを制御することでビーム特性を変化させることができる。(1)熱電子フラックスと初期加速電圧、(2)電離粒子の初期加速、(3)電磁石型質量分析器の磁場強度、(4)ビーム径拡張用ラスタ走査・平行化電場、(5)主加減速電場、(6)ターンテーブルの方位角と仰角。分析器の較正を効率よく行うため、我々は1つのプログラム上で一元管理および遠隔操作できる制御システムの構築も進めている。機器のインターフェースとしてRS-232、USB、無線LANを用いて遠隔制御を行う。プログラミング言語はLabVIEWを使用する。また、複数のビームライン・真空装置での真空度を多点・同時監視し、異常時には警告メールの自動配信を行う真空度監視・警告システムを導入した。

超熱的エネルギービームラインにおいてターンテーブルシステム以外の較正システムは構築されており、十分に拡大、平行化された所定のエネルギーのイオンビームが真空チェンバーに導入可能なことが確認されている。実際にビーム強度を取得する2次元MCP計測系を整備し、生成したビーム強度の測定を行った。本発表では、構築したビームラインの概要と生成したビーム強度の測定結果について報告する。

キーワード: 較正システム, イオンビームライン, 超熱的イオンビーム, 粒子分析器, 磁石型質量分析器, 遠隔制御

Keywords: calibration system, ion beam line, suprathermal ion beam, particles analyzer, magnetic ion mass spectrometer, remote control

ERG衛星に搭載する中間エネルギー粒子分析器EMの検証 Verification of engineering models of medium energy particle analysers for ERG

笠原 慧^{1*}; 浅村 和史¹; 三谷 烈史¹; 高島 健¹; 平原 聖文²; 下山 学²; 横田 勝一郎¹

KASAHARA, Satoshi^{1*}; ASAMURA, Kazushi¹; MITANI, Takefumi¹; TAKASHIMA, Takeshi¹; HIRAHARA, Masafumi²; SHIMOYAMA, Manabu²; YOKOTA, Shoichiro¹

¹ 宇宙科学研究所, ² 名古屋大学

¹ISAS, ²Nagoya University

ERG (Exploration of energization and Radiation in Geospace) is a geospace exploration spacecraft, which is planned to be launched in FY2015. The mission goal is to understand the radiation belt dynamics especially during space storms. The key of this mission is the observations of electrons and ions in medium-energy range (10-200 keV), since these particles excite various electromagnetic waves (e.g., EMIC waves, magnetosonic waves, and whistler waves), which are believed to play significant roles in the relativistic electron acceleration and loss. Engineering models (EMs) of medium energy electron analyser and ion mass spectrometer have been developed and their performances and tolerances are tested. We report the results of these verification tests on EMs.

キーワード: ジオスペース探査衛星 ERG, 中間エネルギーイオン, 中間エネルギー電子

Keywords: Geospace exploration spacecraft ERG, medium energy ion, medium energy electron

CASSIOPE 衛星搭載中性粒子質量速度測定器 (NMS) の初期運用結果 The results in the initial operation of the Neutral Mass and Velocity Spectrometer (NMS) onboard the CASSIOPE satellite

栗原 純一^{1*}; 早川 基²; 栗原 宜子²

KURIHARA, Junichi^{1*}; HAYAKAWA, Hajime²; KOIZUMI-KURIHARA, Yoshiko²

¹ 北海道大学 大学院理学研究院, ² 独立行政法人宇宙航空研究開発機構

¹ Graduate School of Science, Hokkaido University, ² The Institute of Space and Astronautical Science/Japan Aerospace Exploration Agency

2013年9月29日に打ち上げられた CASSIOPE 衛星に搭載された Enhanced Polar Outflow Probe (e-POP) ミッション機器の一つである中性粒子質量速度測定器 (Neutral Mass and Velocity Spectrometer; NMS) の初期運用結果について報告する。e-POP ミッションの科学目的は極域電離圏からのプラズマの流失過程および超高層大気からの中性大気の流失過程とその相互作用を探索することが目的であり、NMS は非熱的な速度分布を持つ中性粒子の頻度分布に対する定量的な把握に寄与することが期待されている。そのため、NMS は既存の衛星搭載中性粒子質量分析計とは異なる新しい原理を元に開発された。NMS は衛星進行方向に入射開口部を持ち、衛星に対する相対速度 (7-8 km/s) で入射する中性粒子に対して、熱陰極型電子銃から射出される電子ビームによる電離を行う電離部、電離された中性粒子に対して垂直方向に印加する電場で加速して飛行時間型 (Time of Flight; TOF) 質量分析を行うと同時に Microchannel Plate (MCP) とレジスティブアノードによる二次元位置検出を行う検出部、およびデータ処理部によって構成される。ある質量をもつ粒子に対して、粒子の検出位置から衛星に対する相対速度がわかり、その位置の分布から衛星速度を差し引くことで本来の速度分布が得られる。

衛星の初期運用段階において、NMS の機器としての状態に異常は見られないものの、電子銃を作動させない場合でも想定より数桁以上多い荷電粒子が検出されるという問題が明らかになった。この原因は入射してきた中性粒子が装置内面に衝突することで電離されるためと現時点では推測している。この場合に中性粒子の速度分布測定に及ぼす影響と定常運用後のデータ解析結果について考察する。

キーワード: 中性粒子質量分析計, 大気流出, 非熱的速度分布

Keywords: neutral mass spectrometer, atmospheric escape, non-thermal velocity distribution

木星オーロラ観測用赤外カメラ搭載 InSb イメージセンサ駆動システムの開発と評価 Development and evaluation of the drive system of InSb imager mounted on infrared cameras for Jovian aurora

野口 恵理子^{1*}; 小谷 光司²; 坂野井 健¹; 鍵谷 将人¹; 市川 隆³
NOGUCHI, Eriko^{1*}; KOTANI, Koji²; SAKANOI, Takeshi¹; KAGITANI, Masato¹; ICHIKAWA, Takashi³

¹ 東北大・理・地球物理学専攻, ² 東北大・工・電子工学専攻, ³ 東北大・理・天文学専攻

¹Geophys., Graduate School of Science, Tohoku Univ., ²Electronics, Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., ³Astronomy, Graduate School of Science, Tohoku Univ.

東北大学では、2014 年にハワイ・ハレアカラ山頂に設置される 60cm 望遠鏡のための赤外観測装置の開発を行っている。本研究は、木星赤外オーロラ用赤外カメラと赤外エシエル分光器に共通に用いられる Focal plane array(FPA) 用の駆動システムを開発し、その詳細な評価・分析結果を用いて、観測対象毎に異なる FPA の最適動作条件を決定する手法を確立し、各観測対象の観測実現性を示すことを目的とする。

先行研究より、観測対象の時空間変動を明らかにする為には、H3+オーロラは撮像時間 15s で S/N=15 以上、H2 オーロラでは撮像時間 1200s で S/N=5 以上、赤道域温度場については撮像時間 7200s で S/N=5 以上が必要であることを示した。この要求 S/N および撮像時間制限に基づいて、観測対象のシグナル成分、地球大気発光成分、望遠鏡からの熱輻射を考慮し、FPA に要求されるノイズ指標、具体的にはリードノイズおよびリーク電流の上限値を明らかにした。

次に、本研究で採用している赤外 FPA である Raytheon の CRC463 の駆動原理に基づき、本駆動システムでの適切なバイアス電圧範囲が、 $V_{det}=-3.0V$ 以下、 $V_{ddc}=-4.0V$ 以上であることを明らかにした。この条件下で、バイアス $V_{det}-V_{ddc}=0.6V$ において Full Well(FW) が 0.02V から 0.4V に拡大し、ハロゲンランプの撮像に成功した。更に、次のような改良を行った。①赤外カメラの熱パスの伝導性を増大させることで、FPA 近傍温度は 45K から 20K にまで下がり、リーク電流は 17,145e/s から 200e/s、リードノイズは $453e_{rms}$ から $320e_{rms}$ まで低減した。②CRC463 特有の不具合を検証し、フレーム単位の新規制御方法を開発したことで、リードノイズは更に $200e_{rms}$ まで低減した。これに基づき、FPA 制御回路系のクロック制御シーケンスの最適化を行った。本駆動システムの詳細な性能評価を行うことが可能となった。③FPA 駆動回路系の改良として、各ボードの出力電位のノイズを低減し、最終的にリードノイズを $90e_{rms}$ まで低減した。

以上の改良により、Photon Transfer Curve の手法を用いて、FPA の性能パラメータを詳細に評価することが可能となった。その結果、バイアス 0.6V の場合では、Fixed Pattern Noise の性能指標である Dark Signal Nonuniformity が 3.8 %、Photoresponse Nonuniformity が 1.6 %、リーク電流 200e/s、Full Well 133,000e、システムゲイン 10.9e/DN であることが明らかになった。FPA 動作評価では、量子効率測定を行い、Raytheon が提示している値と同等の 0.85 の値を確認した。又、 $2.3 \mu m$ 、400K の Noise Equivalent Difference Temperature を評価したところ、最大 45mK であり、第 3 世代 FPA と比較しても十分な性能を発揮できていることが明らかになった。なお、本研究で採用している FPA は NASA の IRTF と同種のものであり、駆動系を含む撮像システムの性能を比較すると、リーク電流以外は IRTF の駆動システムに匹敵する性能であることが示された。

さらに、FW、リーク電流、システムゲインについて、それらのバイアス依存性を詳細に評価した。その評価結果を用い、観測対象毎の信号成分強度、雑音成分強度、最大撮像時間制限などを考慮し、観測対象毎に異なる最大 S/N を実現可能な最適バイアス設定を決定する手法を確立した。それにより、以下のことが明らかになった。本赤外 FPA 駆動システムにおいて、バイアス 0.5V で、H3+を露光時間 15s でイメージング観測した場合の最大 S/N は 30 である。バイアス 0.4V で、H2 を撮像時間 1200s で分光観測した場合の最大 S/N 値は、ビニング処理した場合、最大 S/N 値 3.14 を達成するが、要求 S/N を下回る。この場合、リーク電流を 81e/s 以下に低減する必要がある。温度場分光観測の場合、バイアス 0.4V で 28 回加算を行うと、撮像時間 7200s で最大 S/N=52.7 であるが、バイアス 0.9V でリーク電流を 100e/s 以下に低減すれば、1 回の撮像で S/N=40 以上達成できる。

要するに本研究は、惑星観測のための東北大望遠鏡に組み合わされる赤外観測装置に搭載される FPA の駆動システムを開発・改良し、その性能を詳細に評価し、その結果を用いて観測対象毎に最適バイアスを導出する考え方を示したものである。なお、現時点でのリーク電流は FPA 本来のスペックと比較しても 2 桁程度大きく、この低減が今後の課題である。

キーワード: 赤外イメージセンサ駆動システム, 東北大学望遠鏡, 惑星長期観測, NASA 赤外望遠鏡

Keywords: Focal plane array drive system, IR telescope of Tohoku Univ., long-term observation for planet, NASA IRTF

深宇宙探査技術実験機 DESTINY による理学観測のための搭載機器の検討 A study for candidate scientific instruments for DESTINY

岩田 隆浩^{1*}; 川勝 康弘¹
IWATA, Takahiro^{1*}; KAWAKATSU, Yasuhiro¹

¹JAXA 宇宙科学研究所

¹Institute of Space and Astronautical Science, JAXA

深宇宙探査技術実験機 DESTINY (Demonstration and Experiment of Space Technology for Interplanetary Voyage) は、JAXA が開発したイプシロンロケットでの打上げを目指す小型衛星計画である。その目的は、イプシロンロケットと小型衛星による深宇宙探査を実現するため、打上げから太陽-地球系ラグランジュ点 2 (L2 点) のハロー軌道に至る軌道投入・軌道制御技術や、信頼性を向上させた大型イオンエンジン、薄膜軽量太陽電池パネルなど、様々な新規技術を実証することにある。その一方で、設計・開発の進捗の中で、質量等のリソースに余剰が生じた場合には、10kg 程度までの理学観測機器を追加で搭載できる可能性があり、様々な候補機器が検討されている。

L2 ハロー遷移軌道の飛行中は、地球磁気圏のテール側のプラズマシート領域を、様々な距離・位置から観測することができ、プラズマ、高エネルギー粒子、磁場等の観測が候補機器として挙げられる。L2 点では、安定した軌道により長期間の観測が可能であることから、JAXA の次世代赤外線天文衛星 SPICA をはじめ、多くのスペース天文衛星の設置候補地点となっている。このため、この空間領域のダスト、電磁的環境、背景放射を知ること、重力的・熱的安定性を事前実証することは、これら将来ミッションのための貴重なデータとなる。L2 点ハロー軌道およびその周辺の領域は、太陽系探査の場としても有用である。例えば地球近接小天体 (NEO) とダストとの対応を観測することにより、流星群や小惑星とその母天体との関係を明らかにして、太陽系の始原物質やその進化ならびに輸送の様子を解明していく。また、地球磁気圏から発生する X 線や木星型惑星の紫外線・電波を観測することにより、これらの放射機構を明らかにするとともに、太陽系外惑星の大気観測にもつなげることができる。DESTINY は、これらの本格的な探査の前段の、先駆的観測と位置付けられる。

キーワード: イプシロンロケット, DESTINY, ラグランジュ点
Keywords: Epsilon Rocket, DESTINY, Lagrange point

BepiColombo 日欧共同水星探査ミッション：MMO プロジェクト最新状況報告 BepiColombo Euro-Japan Joint mission to Mercury: MMO Project Status update

早川 基^{1*}; 前島 弘則¹; ベピコロombo プロジェクトチーム¹
HAYAKAWA, Hajime^{1*}; MAEJIMA, Hironori¹; BEPICOLOMBO, Project team¹

¹ 宇宙研・宇宙機構
¹ ISAS/JAXA

紀元前から知られる水星は、「太陽に近い灼熱環境」と「軌道投入に要する多大な燃料」から周回探査は困難であり、昨年 3 月からの米国 MESSENGER による観測が初めてのものである。過去の探査から、この小さな惑星にはあり得ないと考えられていた磁場と磁気圏活動の予想外の発見をもたらしたが、その究明は未だこれからの課題となっている。「ベピ・コロombo (BepiColombo)」は、欧州宇宙機関 (以下、ESA) との国際分担・協力によりこの惑星の磁場、磁気圏、内部、表層を初めて多角的・総合的に観測しようとするプロジェクトである。固有磁場と磁気圏を持つ地球型惑星は地球と水星だけで、初の水星の詳細探査＝「初の惑星磁場・磁気圏の詳細比較」は、「惑星の磁場・磁気圏の普遍性と特異性」の知見に大きな飛躍をもたらす。また、磁場の存在と関係すると見られる巨大な中心核など水星の特異な内部・表層の全球観測は、太陽系形成、特に「地球型惑星の起源と進化」の解明に貢献する。

本計画は、観測目標に最適化された 2 つの周回探査機、すなわち表面・内部の観測に最適化された「水星表面探査機 (MPO)」(3 軸制御、低高度極軌道)、磁場・磁気圏の観測に最適化された「水星磁気圏探査機 (MMO)」(スピン制御、楕円極軌道) から構成される。ISAS / JAXA は、日本の得意分野である磁場・磁気圏の観測を主目標とする MMO 探査機の開発と水星周回軌道における運用を担当し、ESA が残りの全て、すなわち、打ち上げから惑星間空間の巡航、水星周回軌道への投入、MPO の開発と運用を担当する。

両探査機に搭載する数々の科学観測装置は、2004 年の搭載機器選定以降開発は着々と進行し、日本側の詳細設計審査は平成 23 年 11 月に終了した。JAXA の開発する MMO は本年 1 月に電気・機械インターフェース試験が終了し、一昨年 9 月末から総合試験が開始された。現在は振動・衝撃試験が終了し、今夏の熱真空試験を持って単体の総合試験は終了となる。来年早々に ESA/ESTEC へと輸送され ESA 側開発モジュールと組合わせた総合試験を経た後射場である仏領ギアナへ輸送され、2016 年夏期に打ち上げの予定である。一方 MMO 電気モデルはドイツへ輸送され一昨年 10 月から電気モデル試験に参加した。今後来年に予定されている第 2 回電気モデル試験に参加する予定である。

水星到着後の観測は、選ばれた装置開発チームに留まらず、広く日欧研究者で構成する「BepiColombo 科学ワーキングチーム」(年 1 回程度開催) で立案・実施される。本講演では、これら科学観測に関連した状況及び、日本側が製作を担当する MMO について最新状況を報告する。

キーワード: 水星, 惑星探査, 国際協力

Keywords: Mercury, Planetary Exploration, International Collaboration

水星探査機 BepiColombo MMO の磁気対策結果 Magnetic Cleanliness of BepiColombo MMO

松岡 彩子^{1*}; 中澤 暁²
MATSUOKA, Ayako^{1*}; NAKAZAWA, Satoru²

¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ² 宇宙航空研究開発機構 月惑星探査プログラムグループ
¹ISAS/JAXA, ²JSPEC/JAXA

水星は、地球型惑星では地球の他に唯一双極子的な惑星規模の磁場を持つ惑星である。しかし、その表面における磁場は、地球の約 100 分の 1 と小さい。このため、太陽風の変動の影響が磁気圏の深部にまで直接的に影響し、磁気圏が短い時間スケールで大きく変動することが予想されていた。2011 年に水星の周回軌道に入った米国の MESSENGER によって、水星の磁場の観測が進められている。しかし、前述のとおり太陽風の変動による磁場変化が大きいこと、MESSENGER の低高度軌道が水星の北半球に偏っていることから、水星の固有磁場の精密な同定には至っていない。2016 年打ち上げ、2024 年 1 月水星到着予定の水星探査機 BepiColombo は、JAXA によって開発・製造された磁気圏探査機 MMO が、ESA によって開発・製造された惑星表面探査機 MPO と共に水星の磁場環境を観測し、水星の周辺の磁場を偏ることなく測定すること、複数点における観測で太陽風の変動の影響を分離することにより、水星の固有磁場を精度良く決めることを主目標の一つとしている。精密な磁場観測のためには、高精度の磁力計を搭載することはもちろん、衛星自体の出す磁場ノイズを低減することが重要である。このため、MMO の設計・製作において、磁場ノイズを出す機器へ対策を施し、適切な管理を行うことに多くの労力が割かれた。本講演では、MMO における磁場ノイズ低減の内容と、システム EMC 試験における評価結果を報告する。

キーワード: 水星, 磁場

Keywords: Mercury, magnetic field

高速回転する薄い球殻内の熱対流により引き起こされる表層の帯状流 Surface zonal flows induced by thermal convection in rapidly rotating thin spherical shells

佐々木 洋平^{1*}; 竹広 真一²; 石岡 圭一³; 中島 健介⁴; 林 祥介⁵

SASAKI, Youhei^{1*}; TAKEHIRO, Shin-ichi²; ISHIOKA, Keiichi³; NAKAJIMA, Kensuke⁴; HAYASHI, Yoshi-yuki⁵

¹ 京都大学大学院理学研究科数学教室, ² 京都大学数理解析研究所, ³ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ⁴ 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, ⁵ 神戸大学理学研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Mathematics, Kyoto University, ²Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University, ³Department of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University, ⁴Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, ⁵Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University

木星と土星の表層の流れは、赤道周辺の幅の広い順行ジェットと中高緯度で交互に現われる互いに逆向きの幅の狭いジェットが特徴的である。この表層のジェットが深部領域の対流によって生成されているのか、表層の流体運動の結果なのかは未だに明らかになっていない。流体層の厚さが惑星半径に比して十分小さい「浅い」モデル、すなわち、鉛直方向の静水圧近似の仮定の下で深部からの熱流と太陽加熱によって大気運動が駆動されるモデルでは、中高緯度の交互に表われる幅の狭いジェットは再現されるものの、赤道域のジェットは必ずしも順行方向とはならない。一方で、流体層の厚さが惑星半径に匹敵する「深いモデル」、すなわち高速回転する球殻中の熱対流モデルでは、赤道域の順行するジェットは容易に生成されるものの、中高緯度の交互に表われるジェットの生成が困難である。

最近 Heimpel and Aurnou (2007) は、これまでに考えられていた深いモデルよりも薄い球殻領域内の深部対流運動を考え、レイリー数が十分大きく内球接円筒での対流が活発な場合に、赤道域の順行流と中高緯度の交互に現われる狭いジェットが共存する状態を数値的に再現した。しかしながら、彼らの研究では経度方向に8回対称性を仮定しており、全球の1/8の領域の運動しか解いていない。このような領域の制限は流れ場全体の構造に影響を与えている可能性がある。例えば、2次元乱流的なエネルギーの upward cascade が十分に作用せず、互い違いの縞状ジェットが生成されないかもしれない。また、生成される帯状流が不安定となって縞状ジェットが壊されてしまうかもしれない。そこで本研究では、計算機性能の制約から幾分遅い回転角速度と粗い解像度ながらも、薄い球殻対流の数値計算を全球で行うことで、赤道域および中高緯度領域の帯状流が形成されるか否かを吟味した。

モデルは回転する球殻中のブシネスク流体の方程式系から構成される。方程式系に現われる無次元数であるプランドル数を0.1、エクマン数を 10^{-4} 、球殻の内径外径比を0.75、修正レイリー数を0.05に固定した。境界条件は、温度固定、応力無し条件である。初期には回転系での静止状態にランダムな温度擾乱を加えた。35000回転まで時間積分したところ、運動エネルギーが飽和し統計的定常状態に達した。得られた流れ場の構造はテイラープラウドマンの定理に従い回転軸方向にほぼ一様となっている。表層の帯状流は、接円筒外側に相当する赤道域で一本の太い順行流が生成されている。接円筒内側に相当する領域では全体的に逆行流であるが、接円筒に近い低緯度域で東向きスパイク状の流れ分布が見られる。球殻中層での鉛直速度分布をみると、このスパイク状の分布の緯度帯に小スケールの対流運動が規則的に存在している。これらの対流運動が地形性ロスビー波を励起し、西向き角運動量を抜き去ることによってスパイク状の流れが形成されているのかもしれない。このような力学的機構は木星表面の北緯25度付近に見られる強く細い西風ジェットの生成機構を示唆している可能性がある。

謝辞：本研究の数値計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータ (ES2) を用いた。

参考文献：Heimpel, M., Aurnou, J. (2007) *Icarus*, 187, 540–557.

キーワード：巨大ガス惑星大気、縞状構造、赤道加速ジェット流、ロスビー波、木星、土星

Keywords: atmospheres of the gas giant planets, banded structure, equatorial prograde jet, Rossby waves, Jupiter, Saturn

金星雲層を想定した鉛直対流の数値計算 Numerical modeling of Cloud-level Convection in Venus Atmosphere

杉山 耕一郎^{1*}; 川畑 拓也²; 小高 正嗣²; 中島 健介²; 石渡 正樹³
SUGIYAMA, Ko-ichiro^{1*}; KAWABATA, Takuya²; ODAKA, Masatsugu²; NAKAJIMA, Kensuke²; ISHIWATARI, Masaki³

¹JAXA 宇宙科学研究所, ²北大理・宇宙理学, ³九大理・地球惑星科学

¹ISAS/JAXA, ²Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, ³Graduate school of Science, Kobe University

観測的な証拠により、金星の雲層では対流が生じていると長らく考えられている。しかしながら、雲層での対流構造は良く理解されているわけではない。金星雲層の対流構造を数値的に調べる研究は数例行われてきたが (Baker et al., 1998, 2000, Imamura et al., 2014), 彼らの数値実験ではモデル大気は水平鉛直 2 次元に限定されていた。そこで本研究では、先行研究である Baker et al. (1998) の設定を与えた 3 次元モデル計算を行い、統計的平衡状態における金星雲層の対流構造を調べる。

数値モデルとして、主に木星大気の雲対流の数値実験に使われてきた雲解像モデル (Sugiyama et al., 2009, 2011, 2014) を用いるが、凝結や化学反応は考慮しない。乱流拡散と放射過程は Baker et al. (1998) と同じものを我々のモデルに導入した。計算設定も Baker et al. (1998) に準じる。この設定において下部境界と上部境界は高度 40 km と 60 km に相当し、高度 48 km から 55 km の領域は中立成層である。

鉛直方向の流れ場は、狭くて強い下降流と広くて弱い上昇流によって特徴付けられる。この対流構造の定性的特徴は Baker et al. (1998) の 2 次元計算の結果においても見られる。下降流の速度は最大で 10 m/s 程度である; 計算領域全体で平均すると鉛直速度は 3 m/s 程度である。下降流は、上部境界で与えた熱フラックスによる冷却が乱流拡散によって中立層上端に及ぶことによって駆動される。計算された対流セルの水平スケールはおおよそ 20 km であり、紫外線撮像で捉えられた典型的なセル模様の大きさに比べて小さい; 観測された典型的なセルサイズは 100-200 km であり、数十 km のものも見つかっている。

キーワード: 金星大気, 対流, 数値計算

Keywords: Venus atmosphere, convection, numerical modeling

火星における対流励起重力波と上層大気への影響 Convectively-generated gravity waves on Mars and their influence on the upper atmosphere

渡邊 歩佳¹; 今村 剛^{2*}; 前島 康光³

WATANABE, Ayuka¹; IMAMURA, Takeshi^{2*}; MAEJIMA, Yasumitsu³

¹ 東京大学大学院 理学系研究科, ² 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ³ 気象庁 気象研究所

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, ²Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ³Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

火星大気において重力波は様々な手法で検出されているが、それらの励起源や伝搬特性はよくわかっていない。山岳波起源の重力波に関する理論的研究はいくつか行われているが、対流励起重力波についてはほとんど調べられていない。しかし火星では大気が希薄であるために激しい対流が生じると考えられており、短周期で伝搬速度の大きな波が励起されると思われる。そのような波は放射減衰や分子拡散などによる散逸を受けにくいいため、熱圏高度まで伝搬してエネルギーや運動量の収支に関与することが考えられる。ここでは火星において重力波が対流により励起され鉛直伝搬するプロセスについて理論的考察を行う。

まず非静力学モデル CReSS をもとに 2 次元対流モデルを構築し、対流による重力波の励起を再現した。対流を駆動する加熱源としては、地表面が太陽光により暖められることを想定した一様加熱と、局所的に分布したダストが太陽光の熱を吸収して大気を暖めることを想定した局所加熱を考えた。こうして計算された重力波は高度約 80 km 以上で飽和振幅に達し、熱圏下部における特性（振幅・水平波長）は観測結果とよく一致していた。次に、これらの実験で観察された波のパラメータをもとに、重力波の鉛直伝搬特性と散逸過程を線形解を用いて調べた。線形モデルは、水平方向と時間方向に振動解を仮定したうえで鉛直構造を行列演算によって解くものである。熱圏に到達した重力波は分子粘性により減衰し、大気加熱をもたらすが、加熱率の高度分布には 2 つの極大が見られた。一つめは振幅が最大となる高度付近で生じる顕熱フラックスの発散によるものであり、もう一つはそれより高い高度で生じる運動エネルギーの粘性散逸によるものである。これらの加熱率は紫外線によるものと比べても無視できない大きさとなった。

キーワード: 火星, 重力波, 対流

Keywords: Mars, gravity wave, convection

電磁波・音波複合計測による火星ダストデビルの観測提案 A proposal of Martian dust devil observation by combination with electromagnetic and acoustic wave measurements

山本 真行^{1*}; 高橋 幸弘²; 石坂 圭吾³; 佐藤 光輝²; 小郷原 一智⁴; 鴨川 仁⁵; 宮本 英昭⁶; 阿部 琢美⁷
YAMAMOTO, Masa-yuki^{1*}; TAKAHASHI, Yukihiro²; ISHISAKA, Keigo³; SATO, Mitsuteru²; OGOHARA, Kazunori⁴;
KAMOGAWA, Masashi⁵; MIYAMOTO, Hideaki⁶; ABE, Takumi⁷

¹ 高知工科大学, ² 北海道大学, ³ 富山県立大学, ⁴ 滋賀県立大学, ⁵ 東京学芸大学, ⁶ 東京大学総合研究博物館, ⁷ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

¹Kochi University of Technology, ²Hokkaido University, ³Toyama Prefectural University, ⁴University of Shiga Prefecture, ⁵Tokyo Gakugei University, ⁶The University Museum, The University of Tokyo, ⁷Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

Mars 2020 rover is planned to launch by NASA in 2020, as the almost same package of the Mars Science Laboratory (named Curiosity after its successful landing in August 2012). The announcement of opportunity (AO) for scientific/technology payloads to be onboard the NASA Mars 2020 rover was called for to the scientists community in world wide in September 2013. Here, we introduce our proposed instrument designed for electromagnetic (EM) and acoustic wave (AW) measurements that have never been operated on Mars.

Low-frequency EM and AW are important for monitoring atmospheric events because of their long-distant propagating characteristics more than 1000 km. Electrical discharges could be a hazard for instruments and future human activities on Mars, hence it should be treated as one of the strategic knowledge gaps (SKGs) for future missions. Our concept is that combining EM and AW measurements, precise distance information of dust storms and/or dust devils can be obtained by using two independent velocities of light (c) and sound (C_s) because discharges could be generated by electro-static processes in low-pressure dusty atmosphere and the process also generates shock waves in acoustic/infrasonic pressure wave range. Moreover, wind roaring sound, shock waves by meteors entries, and operational sounds by rover itself will be recorded as the world first "Martian sound."

Our EM and AW detection system consists of antennae, microphones, and common receiver circuits with on-board software. For E-field detection, a legacy monopole of 10 cm will be used as a vertical antenna. Two orthogonal loop antennae should be applied for B-field with direction-finding system. However, instead of pop-up devices, these 3 antennae will be compressed into a fixed 10 cm cubic antenna to be equipped on rover surface. Although a legacy receiver circuit can be used, we can minimize it into a postcard size by applying a newly-developed chip device. Analyses of EM and AW for monitoring discharges can be operated by on-board software to reduce data volume. Similar software is used in GLIMS operated on JEM-Kibo/ISS, where only the most significant events will be sent to the Earth in priority basis.

EM sensing in the Martian atmosphere is significant for the future human exploration on Mars. Although the environment on Martian surface is too severe to survive even in fair climate condition, human activities on Mars is obviously dangerous especially when it is under the storm-like condition. Thus, dust devils on Martian surface are significant for the future human exploration, especially, electrostatic discharge events could be serious hazards for astronauts as well as for Martian base facilities. However, the EM condition on the Martian surface has never been measured in detail. Hence, we consider the remote-sensing of the dust devils and discharge events from a single site on Mars with simple sensors could be a potential instrumentation.

Here, as a proposal to the NASA 2020 AO, we introduce one of the most promising remote-sensing methods for dust devils and discharge events by using a combination of EM and AW. According to its rarefied atmospheric pressure condition on Martian surface, about 1/100 of the Earth's surface, dust particles can easily be blown up by surface wind then could effectively produce charged particles by convection. Based on previous studies on the Earth, such charged particles possibly produce discharge events. Drastic changes in EM fields can be observed even at far-distant observatory, more than 1000 km away from the exact coordinates of discharges. AW also could be a remote-sensing method when there exists the atmosphere. Especially, low frequency AW less than 1 Hz can propagate for long distance more than 100 km even in the rarefied atmosphere. If we use two independent velocities of light (for EM) and sound (for AW), we can identify source coordinates of every discharge events within a few tenth km.

キーワード: 火星, 電磁波, 音波, 放電, ダストデビル, 着陸機

Keywords: Mars, electromagnetic wave, acoustic wave, discharge, dust devil, lander

ピリカ望遠鏡による金星紫外輝度の数ヶ月変動の観測 Observation of a few months temporal variability of UV brightness in Venus with Pirka telescope

今井 正亮^{1*}; 高橋 幸弘¹; 渡部 重十¹; 渡邊 誠¹

IMAI, Masataka^{1*}; TAKAHASHI, Yukihiro¹; WATANABE, Shigeto¹; WATANABE, Makoto¹

¹ 北海道大学・大学院理学院・宇宙理学専攻

¹Department of Cosmospaces, Graduate School of Science, Hokkaido University

The superrotation, which is a phenomenon that Venusian atmosphere moves westward at a velocity 60 times faster than the planetary rotation, is a unique atmospheric system of Venus. There are several theories to explain what drive the superrotation, but it is still unknown. Yamamoto and Tanaka (1997) suggested that the Kelvin wave in equator and the Rossby wave in mid-latitude, which propagating at an altitude of 70 km or higher, play an important role in the driving of the superrotation. They also suggested that the Kelvin and Rossby wave forms the Y-feature when they balanced. The Y-feature is the bright and dark pattern in UV range, and it has a planetary scale. From the Pioneer Venus spacecraft observation, it was revealed that the propagation and the distribution of UV features cause variation in several time scales [Del Genio and Rossow, 1982, 1990], but it has not been understood which dynamical processes determine these time scales. In our study, we focused on about 2-month brightness variation. That variation seems to be strongly associated with the Rossby wave because there is inverse correlation between low-latitude and mid-latitude, suggesting the existence of quasi-barotropic eddy. After the Pioneer Venus mission, there were no further observations to reveal the mechanism of the 2-month variation.

In this study, we observed the Venusian UV brightness variation as a function of latitude and time. We carried out the ground-based observations with Multi-Spectral Imager (MSI) onboard the Pirka telescope. The Pirka 1.6 m telescope, owned and operated by the graduate school of science in Hokkaido University, is primarily dedicated to the observations of solar planets. Using this system, we can monitor the planetary scale UV-features (~ 5,000 km) in Venus atmosphere over 8 hours in a day at 365 nm wavelength. In 2013, we carried out about 2 months total observations from mid-Aug. to mid-Nov.

There was a problem to estimate the absolute brightness variation because we observed Venus in the daytime and the correction of the extinction of the Earth's atmosphere had some difficulty. To investigate the brightness variation, we perform additional procedure for each image that we normalize the brightness in each latitudinal band with the mean brightness in 70°N-70°S area. Our results showed two types of UV feature. One showed the strong periodicity in both of equatorial region and mid-latitude and it also had the symmetric structure between northern and southern hemisphere. The other one did not show the strong periodicity and had the symmetric structure. We suppose that the Y-feature does not always exist and the balance of the Kelvin and Rossby wave might be lost when the periodicity and the symmetry disappear. From our observations, it seems to take more than 2 months to return from the asymmetric phase to symmetric phase. Additionally, we found that 2-month variation of brightness in each latitudinal band showed weak inverse correlation between both hemispheres like a seesaw. Such inverse correlation was not seen in the past Pioneer Venus observation. In this paper, we discuss the dynamical state of Venus during our observations and show further observation plans.

キーワード: 金星, ピリカ望遠鏡, スーパーローテーション, Y字模様

Keywords: Venus, Pirka telescope, superrotation, Y-feature

Spatiotemporal variations of brightness temperatures in the middle atmosphere of Venus revealed by Subaru/COMICS

Spatiotemporal variations of brightness temperatures in the middle atmosphere of Venus revealed by Subaru/COMICS

佐藤 隆雄^{1*}; 佐川 英夫²; 神山 徹³; 今村 剛¹; 佐藤 毅彦¹
SATO, Takao M.^{1*}; SAGAWA, Hideo²; KOUYAMA, Toru³; IMAMURA, Takeshi¹; SATOH, Takehiko¹

¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ² 情報通信研究機構, ³ 産業技術総合研究所

¹Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ²National Institute of Information and Communications Technology, ³National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

The middle atmosphere (60-100 km altitudes) of Venus plays an important role in determining its own environment. Venus is completely shrouded by a curtain of dense clouds (50-70 km) with total optical thickness of 20-40 at visible wavelengths. The upper sulfuric acid (H₂SO₄) clouds reflect ~76% of the incident solar radiation back to space (Crisp and Titov, 1997). More than 70% of the solar energy absorbed by Venus is deposited at altitudes higher than 64 km mainly due to absorption of unknown UV absorbers mixed in the upper cloud (Tomasko et al., 1980, 1985). This horizontally and vertically unusual heating in the cloud layer excites the thermal tides, which are the key process to understand the atmospheric super-rotation. In order to elucidate this mysterious atmospheric phenomenon, it is fundamental to investigate horizontal and vertical thermal structure in the middle atmosphere.

We conducted Venus observations at three mid-infrared wavelengths (8.66, 11.34, and 12.84 micron) with the Cooled Mid-Infrared Camera and Spectrometer (COMICS), mounted on the 8.2-m Subaru Telescope, during the period of October 25-29, 2007 (UT). Thermal radiations at these wavelengths (brightness temperature: 230-240 K) are most sensitive to altitudes of ~70 km. The angular diameter of Venus and the solar phase angle (Earth-Venus-Sun angle) at the observation period were ~25 arcsec and ~90 deg (i.e., both the dayside and nightside hemispheres were observed), respectively. The spatial resolution of the observed images, which was determined by astronomical seeing, was ~200 km for the sub-observer point. This was the first time that such high spatially-resolved images had been obtained at mid-infrared wavelengths (Mitsuyama et al., 2008).

From images at 8.66 micron, we obtained three important findings. First, the brightness temperatures at cloud top altitudes (~70 km) in north high-latitudes seemed to be synchronized with those in south ones during the period, which implies that the rotational speeds of them were nearly identical in both high-latitudes. Such atmospheric synchronization has not been reported by any previous mid-infrared ground-based (Diner et al., 1982; Orton et al., 1991) and spacecraft (Taylor et al., 1980; Zasova et al., 2007) observations mainly because of low spatial resolution and tilt of Venus' north pole toward the Earth, and of restricted distribution of sounding, respectively. Second, the center-to-limb curves (dayside and nightside) showed a day-night asymmetry across the morning terminator except that those on October 25 were nearly symmetric. The magnitude of this asymmetry was variable from one day to the next. Such day-night asymmetric features would result from the differences of temperature and/or cloud optical thickness. Finally, there were some streaky and patchy patterns in the whole disk after high-pass filtering. These patterns, typical amplitude of which was ~0.5 K, varied from day to day. It is worth noting that streaky patterns obtained on October 28 were similar to a well-known horizontal Y-shape structure seen in UV. The above three findings were commonly seen at the other wavelengths.

In this talk, we show the observational results and discuss what kind of atmospheric parameters are responsible for the anomalous features of planetary scale center-to-limb curves through radiative transfer calculations.

キーワード: 金星, 中層大気, 地上観測, 大気同期現象, 周辺減光曲線, 微細構造

Keywords: Venus, middle atmosphere, ground-based observation, atmospheric synchronization, center-to-limb curve, small-scale streaky and patchy patterns

簡易金星大気大循環モデル高解像度計算の運動エネルギースペクトル Energy spectra of atmospheric motions simulated by a high-resolution general circulation model of Venus

樫村 博基^{1*}; 杉本 憲彦²; 高木 征弘³; 大淵 濟⁴; 榎本 剛⁵; 高橋 芳幸⁶; 林 祥介⁶

KASHIMURA, Hiroki^{1*}; SUGIMOTO, Norihiko²; TAKAGI, Masahiro³; OHFUCHI, Wataru⁴; ENOMOTO, Takeshi⁵; TAKAHASHI, Yoshiyuki O.⁶; HAYASHI, Yoshi-yuki⁶

¹宇宙研, ²慶應大, ³京産大, ⁴海洋研究開発機構, ⁵京大防災研, ⁶惑星科学研究センター/神戸大

¹ISAS, ²Keio Univ., ³Kyoto Sangyo Univ., ⁴JAMSTEC, ⁵DPRI, Kyoto Univ., ⁶CPS/Kobe Univ.

惑星規模の高速東西風「スーパーローテーション」をはじめ、金星大気の力学はほとんど解明されていない。有効な観測データが不足している一方、大気大循環モデル(GCM; General Circulation model)によるシミュレーション研究が盛んになりつつある。しかし、自転の遅さのために解が統計的平衡状態に達するまでに長期間の時間積分が必要になり、低解像度(T21 ~ 約 $5.6^\circ \times 5.6^\circ$ 格子)の計算に止まっている。我々は、AFES (Atmospheric GCM for the Earth Simulator) の簡易金星版を開発し(Sugimoto et al. 2012)、これまでにない高解像度計算(T159 ~ 約 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 格子)を実施した。本発表では、高解像度計算で得られた運動エネルギースペクトルの特徴について報告する。

モデルは水平解像度 T159、鉛直解像度 L120 ($\Delta z =$ 約 1 km) とし、日変化を含む太陽加熱を与えた。放射冷却は水平一様なニュートン冷却で簡素化した。観測によって示唆されている低安定度層を導入した。湿潤過程は省略して、乾燥大気として計算した。計算安定のために重調和作用素 (Δ^2) で表される水平超粘性を導入し、切断波数に対する緩和時間を 0.01 日とした。鉛直渦粘性係数は $0.15 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ とした。大気上端での波の反射を防ぐため、スポンジ層を高度 80 km より上空に設置した。静的不安定を抑制するために乾燥対流調節を導入した。初期値として剛体回転の高速東西風とそれに傾度風平衡する温度場を与え、時間積分を統計的平衡状態に達するまで行った。平衡状態は観測が示唆するスーパーローテーション構造と類似していた。

鉛直渦度・水平発散のスペクトル係数から計算される単位質量単位波数当たりの水平運動エネルギー (Koshyk & Hamilton 2001) を求めた。中間的な波数 ($n = 4 \sim 45$) において、運動エネルギーは波数に対して $-5/3$ 乗則を示した。より低波数側及びより高波数側ではより大きな(両対数表示での)傾きを示した。

地球大気の航空機観測や GCM 計算のエネルギースペクトル解析 (Nastrom & Gage 1985; Takahashi et al. 2006) で見られる特徴は「低波数領域 ($n < 80$) で -3 乗則、高波数領域で $-5/3$ 乗則」である。Terasaki et al. (2011) は、前者は総観規模でロスビー波が卓越するためであり、後者はメソスケールで重力波が卓越するためだとしている。本研究で得られた簡易金星版 AFES のエネルギースペクトルは $-5/3$ 乗則の領域が地球大気の場合よりも低波数側にあり、金星では重力波が 1 万 ~ 数千 km スケールでも卓越していることを示唆している。このスケールでロスビー波が卓越しないのは、地球の場合よりも自転角速度が小さく、コリオリ項が卓越しないからであろう。また、切断波数に近くで傾きが大きくなっていくのは、水平超粘性が影響が表れているものと考えられる。

[謝辞] 本研究は地球シミュレータ利用課題『AFES を用いた地球型惑星の大気大循環シミュレーション』のもとで実施しました。

キーワード: 金星大気, 大循環モデル, 高解像度, 運動エネルギースペクトル

Keywords: Venus atmosphere, general circulation model, high-resolution, kinetic energy spectra

偏光撮像装置“HOPS”により観測された金星上層ヘイズの微物理特性 Microphysical properties of Venusian upper hazes observed with an Imaging-Polarimetry system “HOPS”

榎本 孝之^{1*}; 佐藤 毅彦²; 仲谷 善一³; 佐藤 隆雄¹; 細内 麻悠⁴; 中串 孝志⁵
ENOMOTO, Takayuki^{1*}; SATOH, Takehiko²; NAKATANI, Yoshikazu³; SATO, Takao M.¹; HOSOUCHI, Mayu⁴; NAKAKUSHI, Takashi⁵

¹ 総合研究大学院大学物理科学研究科宇宙科学専攻, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ³ 京都大学, ⁴ 東京大学, ⁵ 和歌山大学

¹SOKENDAI, ²ISAS/JAXA, ³Kyoto University, ⁴University of Tokyo, ⁵Wakayama University

可視光域における金星の非常に高い反射能は惑星全体を覆う光学的に厚い主雲層によるが、それより上層に広がる微粒子(ヘイズ)は1978年末に金星に到着したPioneer Venus Orbiter (PVO)の観測から発見された。Kawabata et al. [1980]はPVOのOrbiter Cloud Photopolarimeter (OCPP)による偏光観測データを解析し、極域の主雲層より上、高度70から90kmにかけてサブミクロンサイズのヘイズ粒子が大量に分布していることを初めて示した。ヘイズ層の光学的厚さがPVO観測期間中に減少していること[Sato et al., 1996]やSO₂存在量も同じ時間スケールでの減少傾向が見られ、両者の間に相関があることが報告されている[Esposito, 1985]。しかしPVO以降はヘイズをモニターする継続的研究は無く、SO₂存在量との相関がその生成・維持メカニズムにとって何を表すのかや、現在も同じような相関があるのかは不明である。本研究はその最新の微物理情報を提供するため、PVO以降行われていない金星上層ヘイズのモニタリング観測を地上から行うものである。

金星上層ヘイズの分布状況をモニターするために、我々は偏光撮像装置“HOPS”(Hida Optical Polarimetry System)を改修し、京都大学飛騨天文台の65cm屈折式望遠鏡に取付けて観測を行った。HOPSによる観測では偏光度を金星面上のマップとして取得することが出来るので、過去の観測などと比較するために対象とする領域に対応するピクセルの偏光度を観測後に積分して計測することが可能である。これは過去の光電測光観測に対する撮像観測の最大の利点である。HOPSは2線束タイプの光学系を採用しており、観測時間中の大気透明度の変動や、CCDピクセル間の感度ムラ、光線の分離効率の違いなどを画像処理の過程で除去することによって、変動する大気条件に対して高精度の観測が可能である。

観測は金星の太陽位相角が約39度(2013年7月), 56度(2013年8月), 58度(2012年10月), 85度(2012年8月), 129度(2012年5月)という条件の時にを行った。観測波長は438nm(B), 546nm(G), 650nm(R), 930nm(IR)で、GとIRデータはPVO/OCPPの類似波長データと直接比較することが可能である。偏光度マップの極域(緯度60度より高緯度)を積分しPVO/OCPPの報告と比較したところ、特にIRデータにおいて明瞭な差異が認められた。すなわち、偏光度が0%となる中立点位相角の位置がPVO/OCPPデータにおいては40度周辺にあるのに対し、HOPSデータでは75度周辺に移動していた。この違いはヘイズ分布が当時とは異なることを示唆するものである。

得られた偏光データの解析を行うために、Adding-Doubling法[de Haan et al., 1987, Hovenier et al., 2004]を採用し、ストークスパラメータをフルに扱う放射伝達計算コードを開発した。主雲粒子のMie散乱断面積が7 μm^2 程度であるのに対し、IR, R, G, BにおけるRayleigh散乱断面積は0.21, 0.083, 0.041, 0.0096 μm^2 程度であるので、IR, R, Gの3波長はRayleigh散乱の影響を無視して解析することが出来る。自由パラメータは上層ヘイズに関して有効半径 r_{eff} と光学的厚さ τ_h とした。ヘイズの有効分散は0.18に固定し、主雲層のパラメータはHansen and Hovenier [1974]にしたがった。またヘイズ主雲共に、一次散乱アルベドを1と仮定している。その結果として、北南極域に関してそれぞれ $r_{eff}=0.22\mu\text{m}$, $0.20\mu\text{m}$, $\tau_h=0.09, 0.05$ という値を得た。光学的厚さはPVO初期観測期間に得られた $\tau_h=0.25$ に比べて小さいが、同探査機観測期間中に見られた光学的厚さの比較的薄い時期と近い値である。Venus Expressによって観測されている同時期のSO₂存在量は減少が続いたのちの低い値を示しており[Marcq et al., 2012]、SO₂存在量との相関があるという報告とも整合的な結果である。

キーワード: 金星, ヘイズ, 偏光撮像解析, 放射伝達解析

Keywords: Venus, Hazes, Imaging-Polarimetry, Radiative transfer analysis

金星雲頂における風速の推定 — 続報 — Estimation of wind at the cloud top of Venus

池川 慎一^{1*}; 堀之内 武²
IKEGAWA, Shinichi^{1*}; TAKESHI, Horinouchi²

¹ 北海道大学大学院環境科学院, ² 北海道大学地球環境科学研究所

¹Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, ²Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

スーパーローテーションの生成メカニズムは諸説存在する。本研究ではそのうちの一つであるギラシメカニズムに着目した。そのメカニズムを検証するためには、過去の研究より細かな数千 km 程度以下のスケールの渦による運動量輸送を推定する必要がある。使用したデータは、欧州宇宙機関の金星探査機 Venus Express に搭載されている Venus Monitoring Camera (VMC) の紫外画像 (365 nm) である。データには、Charge Coupled Devices (CCD) 素子の電荷を読み出す際に生じた縦縞のランダムノイズやカメラが太陽にさらされたことで生じた数ピクセルにまたがるノイズが存在する。単純な相互相関法に基づく風速推定では、メカニズムを検証する際に要求される精度が確保されない。そこで、本研究では多数のペアを用いて風速の推定手法を改良した。これまでの研究では、風速の変動性に基づく精度評価が行われた。本研究では、相関係数の信頼区間に基づいた精度評価を行った。その際には、有効自由度もデータから算出した。少なくとも低緯度領域では数千 km 以下の空間分解能で風速が推定できる。しかし、それだけでは信頼性は明らかではない。そこで、結果の妥当性を力学的観点から調べた。その結果、期待に反して渦度と発散の大きさが同程度であることが分かった。発表では、この結果をどのように解釈すればよいかについて議論する。

キーワード: 金星, スーパーローテーション, 風速推定

Keywords: Venus, super-rotation, estimation of wind

太陽観測衛星「ひので」での2012年金星日面通過中の観測から導出された金星高々度大気中の雲粒分布の研究 Studying the Venusian atmosphere on the 2012 transit of Venus

金尾 美穂^{1*}; 中村 正人¹; 清水 敏文¹; 今村 剛¹
KANAŌ, Miho^{1*}; NAKAMURA, Masato¹; SHIMIZU, Toshifumi¹; IMAMURA, Takeshi¹

¹ 宇宙科学研究所
¹ ISAS/JAXA

太陽観測衛星「ひので」は2012年6月5日から6日に金星日面通過を観測した。可視光磁場望遠鏡は、明るい太陽面上を移動する28.9 arcsecの暗い金星ディスクを218arcsec x 109arcsecの視野内において連続的に観測した。観測は、388.3、396.8、430.5、450.4、555.0、668.4nmの波長の干渉フィルターを用いて0.3 arcsecと未だ嘗て無く高い空間分解で行われた。

撮像された明るい太陽面に対する金星ディスク画像のリムにおける太陽光強度変化から、雲上端部分に当たる75kmから100kmまでの領域において、太陽光を吸収、散乱するヘイズや大気中のSO₂、SO等の分子の垂直方向、緯度方向の分布を導出と、その全球的な運動の考察が目的である。

可視光磁場望遠鏡が、430.5nmの波長において透過率0.5(高度約90km程度)を観測した金星大気高度の緯度方向の分布は、極域よりも赤道域の方が高い。この差は朝側で6.1km、夕側で9.1kmと夕側の方が大きい。緯度40度より赤道側では、水平方向に1000km程度のスケールで変動が見られ、昼側の方が変動幅は大きい。波長388.3nm及び396.8nmで観測された透過率0.5の大気高度でも、G-bandの観測と比較して同じ緯度に変動が見られるが、変動幅は2倍から3倍程度である。これらの結果について、考察を行う。

キーワード: 惑星大気, 金星日面通過
Keywords: planetary atmosphere, the transit of Venus

SPART 望遠鏡による金星・火星中層大気のミリ波観測 Millimeter Wave Band Monitoring of Venusian and Martian Middle Atmosphere with SPART Telescope

前澤 裕之^{1*}; 池田 喜則¹; 大崎 茂樹¹; 堀内 洗介¹; 切通 僚介¹; 種倉 平晃¹; 佐川 英夫³; 西村 淳¹; 大西 利和¹; 徳丸 宗利²; 近藤 秀作²; 水野 亮²; 神澤 富雄⁴; 半田 一幸⁴; 岩下 浩幸⁴; 前川 淳⁴; 大矢 正明⁴; 久野 成夫⁴
MAEZAWA, Hiroyuki^{1*}; IKEDA, Yoshinori¹; OSAKI, Shigeki¹; HORIUCHI, Kousuke¹; KIRIDOSHI, Ryosuke¹; TANEKURA, Naruaki¹; SAGAWA, Hideo³; NISHIMURA, Atsushi¹; OHNISHI, Toshikazu¹; TOKUMARU, Munetoshi²; KONDOU, Syusaki²; MIZUNO, Akira²; KANZAWA, Tomio⁴; HANDA, Kazuyuki⁴; IWASHITA, Hiroyuki⁴; MAEKAWA, Jun⁴; OYA, Masaaki⁴; KUNO, Nario⁴

¹ 大阪府立大学大学院理学系研究科物理科学科, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 情報通信研究機構, ⁴ 国立天文台野辺山宇宙電波観測所

¹Osaka Prefecture University, ²STEL Nagoya University, ³NICT, ⁴Nobeyama Radio Observatory

我々は、地球型惑星の中層大気が中心星の活動によってどのような影響を受けるのかを調べるため、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の主鏡 10m の電波望遠鏡を改良し、金星や火星の中層大気微量分子スペクトルの監視プロジェクト SPART (Solar Planetary Atmosphere Research Telescope) を推進している。観測は 2011 年度より開始したが、2012 年度はギアやモータ、シンクロモーターのセンサー信号を AD 変換する SD コンバータユニットが故障し、2013 年度にはこれらの修復を行った。また今季からは、100GHz 帯 SIS 超伝導受信機に加えて、200GHz 帯の SIS 受信機も実装し、2 バンドでのフルリモートオペレーションを可能にした。異なる励起状態や同位体のスペクトルを抑えることで解析・物理量導出の精度向上を図ることが可能になる。さらに今季は、金星の視直径が 200GHz 帯のビームサイズ (35 arcsec.) を超える期間が続くため、SPART では On-the-Fly マッピング観測モードを導入し、金星ディスク全体の中層大気中の一酸化炭素量変動を抑えられるようにしている。現在、動作試験含め、¹²CO J=2-1: 230 GHz、¹³CO J=2-1: 220 GHz、¹²CO J=1-0: 115 GHz などのモニタリング観測を進めている。本講演では、これらの進捗について報告する。

キーワード: 惑星, 太陽活動, 電波望遠鏡, ヘテロダイン分光, 中層大気, リモートセンシング

Keywords: planet, solar activity, radio telescope, heterodyne spectroscopy, middle atmosphere, remote sensing

木星極域における成層圏のヘイズ波構造の観測
Observation of a wave structure of stratospheric haze in Jupiter's polar regions by the ground based telescope

合田 雄哉^{1*}; 高橋 幸弘¹; 渡邊 誠¹
GOUDA, Yuya^{1*}; TAKAHASHI, Yukihiro¹; WATANABE, Makoto¹

¹ 北海道大学大学院理学研究院宇宙理学専攻

¹Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

Stratospheric haze formed by aerosol particles covers both polar regions in Jupiter. It has been reported based on the imaging using a methane band filter at 889 nm that the stratospheric haze can be measured. They show bright cap structures covering polar regions and the edge of the cap shows a wave structure spreading in longitudinal direction. This structure can be seen more clearly in the Jupiter's south pole than the north pole, and wave is clear at a latitude of about 67 S [Sanchez-Lavega, 2008].

Jupiter's polar areas have been investigated by the Hubble Space Telescope (HST) from 1994 to 1999 and the Cassini ISS in 2000. This wave structure is known to exist for several years in Jupiter's both polar regions. These observations suggested that this wave structure is caused by planetary Rossby waves because this wave structure presents for a longer period and moves westward relative to the background flow. However, the origin and mechanism keeping to this wave structure, the vertical structure of the wave, change of the propagation velocity of the wave in the short time scale, and north-south asymmetry of the wave structure are unclear so far, because of lack of the observations in short time scale (monthly scale). We have carried out the monthly monitoring of Jupiter from 2011 to 2014 with the 1.6 m Pirka telescope of Hokkaido University.

In this paper, we show results of our observations of the wave structure in Jupiter's polar region. We found a north-south asymmetry of the wave structure in the polar areas. The wave structure at 67 N spread to 42 N in the northern hemisphere, however it does not so in the southern one. In addition, we found that the wave structure has varied in the vertical direction a bit between altitude of 361 mbar and 750 mbar.

Keywords: Jupiter, haze, ground-based observation, Rossby wave

NIIHAMA 赤外線カメラによる木星観測 Observing Jupiter with an infrared camera NIIHAMA

佐藤 毅彦^{1*}; 米田 瑞生²; 鍵谷 将人²; Kuhn Jeff³
SATOH, Takehiko^{1*}; YONEDA, Mizuki²; KAGITANI, Masato²; KUHN, Jeff³

¹ 宇宙航空研究開発機構, ² 東北大学, ³ ハワイ大学

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²Tohoku University, ³University of Hawaii

2013年12月、赤外線カメラ NIIHAMA (1024x1024 画素 PtSi センサー) をハレアカラ山頂の SOLAR-C 望遠鏡 (口径 45cm、軸外しグレゴリオ式反射望遠鏡) に装着し、木星観測を開始した。NIIHAMA は 6 ポジションのホイールを持ち、ダーク、J、H、K、木星 H₃⁺ オーロラ用 (3.4 ミクロン)、金星夜面用 (2.26 ミクロン) のフィルターを搭載している。最大の目標は「ひさき」等と同時に木星オーロラをとらえ、その明るさ変化を連続モニターすることである。望遠鏡の口径が小さいこと、検出器量子効率が低いことなど種々の要因があって、木星オーロラ観測は本投稿時点では成功していない。K バンドにおいて、木星による日陰に入った衛星イオの観測、あるいは 2.26 ミクロンでの金星夜面撮像などに成功している。本講演では、そのファーストライト結果および今後の改良・観測計画について報告する。

キーワード: 赤外線カメラ, 木星, オーロラ, イオ, 金星, ハレアカラ
Keywords: Infrared camera, Jupiter, aurora, Io, Venus, Haleakala

ひさき衛星とハッブル宇宙望遠鏡の協調観測で明らかになった木星の自励的オーロラ加速 Self-driven auroral acceleration process at Jupiter captured by continuous monitoring of Hisaki satellite with HST

木村 智樹^{1*}; 埜 千尋³; Badman Sarah²; 吉岡 和夫¹; 村上 豪¹; 山崎 敦¹; 土屋 史紀⁴; 藤本 正樹¹
KIMURA, Tomoki^{1*}; TAO, Chihiro³; BADMAN, Sarah²; YOSHIOKA, Kazuo¹; MURAKAMI, Go¹; YAMAZAKI, Atsushi¹
; TSUCHIYA, Fuminori⁴; FUJIMOTO, Masaki¹

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ²Lancaster University, ³IRAP, Fance, ⁴ 東北大学
¹JAXA/ISAS, ²Lancaster University, ³IRAP, Fance, ⁴Tohoku University

Two possible drivers have been proposed for planetary auroral acceleration processes: magnetosphere-solar wind interaction referred to as an 'external driver' and shear flow of magnetospheric plasma around a planet referred to as an 'internal driver'. Recent observations of Jupiter's aurora indicated significant responses of auroral intensity and morphology to the solar wind. These results are suggestive of the 'external driver' for Jupiter. On the other hand, there have not been reported dynamics of the 'internal driver' for Jupiter yet which should be essential because of Jupiter's fast rotation and internal plasma source Io. Here we firstly report dynamics of the 'internal driver' based on long-term continuous observation of extreme ultraviolet (EUV) aurora by Hisaki satellite. The long-term variations in EUV aurora are compared with solar wind extrapolated from Earth's orbit by numerical simulation. We found dramatical brightening and decay of EUV aurora during the solar wind quiet period. The brightening occurs once every a few days followed by sudden decay with a timescale less than a half of rotation (~5 hours), which is significantly faster than the solar wind daily variations. Highly-resolved auroral imaging by Hubble Space Telescope captured expansion of diffuse aurora down to latitudes of Io's footprint aurora during the brightening. These observations are indicative of hot plasma deeply injected into the inner magnetosphere around Io's orbit independently from the solar wind, followed by rapid energy dissipation through auroral emissions and possibly other radiation and/or chemical processes.

キーワード: ひさき衛星, ハッブル宇宙望遠鏡, 木星, オーロラ
Keywords: Hisaki satellite, Hubble Space Telescope, Jupiter, aurora

金星イオン速度分布関数の特徴と酸素イオン加速メカニズムの関係 Characteristics of O⁺ velocity distributions at Venus and ion acceleration mechanisms: ASPERA-4 observations

益永 圭^{1*}; 二穴 喜文²; 寺田 直樹³

MASUNAGA, Kei^{1*}; FUTAANA, Yoshifumi²; TERADA, Naoki³

¹ 名古屋大学太陽地球環境研究所, ² スウェーデン宇宙物理学研究所, ³ 東北大学大学院理学研究科

¹STEL, Nagoya Univ., ²Swedish Institute of Space Physics, ³Grad. Sch. of Sci., Tohoku Univ.

O⁺ ion velocity distributions for high energy O⁺ beams (>100 eV) around Venus are statistically studied. The study shows that O⁺ acceleration is controlled by the local convection electric field produced by the local proton and local magnetic field. In the magnetosheath, velocity distributions show a trend that perpendicular velocity component shifts from initial phase of the ring distribution to the local proton velocity. This indicates that gyro motions of the pickup ion immediately collapse after pickup and the ions are incorporated into the local proton flow. The pickup ions only escape through the +E_L hemisphere. In the dayside induced magnetosphere in the +E_L hemisphere, measurements show a scattered velocity distribution of O⁺. This velocity distribution has two ion components depending on whether their gyro radius is larger or not than the scale of the induced magnetosphere. For O⁺ ions with small gyro radius (<500 km), the O⁺ velocity distribution appears on the middle phase of the ring distribution. On the other hand for the O⁺ ions with a large gyro radius (>500 km), the O⁺ velocity distribution is similar to the one in the magnetosheath. This means that in the induced magnetosphere two types of ions are mixed up: pickup ions subject to the E × B drift and ions moving with the local proton bulk velocity. Since both ion components flow tailward, they are convected toward the nightside. In the nightside of the induced magnetosphere, velocity distribution shows initial and last phase of the ring distributions and parallel beam (3D ring distribution). This suggests that ion pickup occurs at the center of the plasma sheet. There is no evidence of an electric potential in the plasma sheet because the O⁺ parallel beam velocity is larger than the parallel velocity component of the local proton. Our result suggests that the local convection condition is rather important to discuss ion acceleration mechanisms at Venus than the solar wind condition.

キーワード: 金星, イオン流出, イオン加速, ビーナズエクスプレス, ASPERA

Keywords: Venus, ion escape, ion acceleration, Venus Express, ASPERA

太陽風侵入イベント時のマグネトシース-火星電離圏間の境界層の特徴の研究 Characteristics of boundary layer between the magnetosheath and Martian ionosphere during solar wind penetration events

松永 和成^{1*}; 関 華奈子¹; 原 拓也¹; Brain David A.²; Lundin Rickard³; 二穴 喜文⁴; Barabash Stas⁴
MATSUNAGA, Kazunari^{1*}; SEKI, Kanako¹; HARA, Takuya¹; BRAIN, David A.²; LUNDIN, Rickard³; FUTAANA,
Yoshifumi⁴; BARABASH, Stas⁴

¹ 名古屋大学 太陽地球環境研究所, ²Laboratory for Atmospheric and Space Physics (LASP), University of Colorado at Boulder, ³Space Physics Swedish Institute of Space Physics (IRF), Umea, Sweden, ⁴Space Physics Swedish Institute of Space Physics (IRF), Kiruna, Sweden

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, ²Laboratory for Atmospheric and Space Physics (LASP), University of Colorado at Boulder, ³Space Physics Swedish Institute of Space Physics (IRF), Umea, Sweden, ⁴Space Physics Swedish Institute of Space Physics (IRF), Kiruna, Sweden

Deceleration of the solar wind due to the mass loading by planetary heavy ions forms the magnetic pile-up region around unmagnetized planets such as Mars and Venus. The Martian magnetic pile-up region diverts shocked solar wind plasma around the planet at altitudes typically in excess of 800 km [e.g., Vignes et al., 2000]. Mars Global Surveyor (MGS) measurements have shown, on one hand, that shocked solar wind (magnetosheath) plasma occasionally penetrates into much lower altitudes (~400km) [e.g., Brain et al., 2005; Crider et al., 2005]. Our previous statistical study of these solar wind penetration events using MGS magnetic field and electron observations revealed that both solar wind dynamic pressure (Psw) and the orientation of the interplanetary magnetic field (IMF) control the occurrence of the events. However, MGS cannot observe the solar wind regions due to its orbital design.

In this study, we focused on the simultaneous observation of the penetration events by MGS and Mars Express (MEX). MEX possess the ion mass analyzer (IMA) and electron spectrometer (ELS), which are parts of plasma packages of ASPERA-3. MEX partly observed the solar wind region, since the orbit of MEX is elliptical orbit. We can thus obtain the solar wind density and velocity from MEX data. Among the simultaneous observation data by MEX and MGS, we identified 46 simultaneous observation events of the solar wind penetration. We divided the 46 events into the low Psw ($\leq \sim 4\text{nPa}$) and high Psw ($\geq \sim 4\text{nPa}$) events. The solar wind penetration event on January 20, 2005 is observed during the high Psw periods, while the event on February 20, 2005 is during the low Psw periods. We investigated characteristics of the boundary layers between the magnetosheath and the ionosphere. We found that the electron flux shows a gradual decrease in the boundary in the high Psw event. On the one hand, intermittent appearance of both the magnetosheath plasma and the ionosphere plasma in the boundary is during the low Psw event. The signature of the boundary layer resembles with the K-H instability signature seen in LLBL (low-latitude boundary layer) in the Earth's magnetotail [e.g., Hasegawa et al., 2006]. We also report the results of statistical analysis of 46 simultaneous observation events.

キーワード: 火星, 電離圏, 誘導磁気圏, 太陽風, 非磁化惑星

Keywords: Mars, Ionospheres, Induced magnetosphere, Solar wind, Unmagnetized planet

多流体 MHD シミュレーションに基づいた火星電離圏 CO₂⁺鉛直高度分布にイオン種間衝突がおよぼす影響の研究 Effects of ion-ion collisions on vertical distribution of CO₂⁺ in Martian ionosphere based on multi-fluid MHD simulation

小山 響平^{1*}; 関 華奈子¹; 寺田 直樹²; 寺田 香織²
KOYAMA, Kyohei^{1*}; SEKI, Kanako¹; TERADA, Naoki²; TERADA, Kaori²

¹名古屋大学 太陽地球環境研究所, ²東北大学大学院理学研究科

¹Solar-Terrestrial Environment Laboratory, NAGOYA University, ²Graduate School of Science, Tohoku University

地球型惑星における CO₂ と N₂ と地殻の組成重量比の比較から、宇宙空間への大気散逸の重要性が指摘されている [Chassefiere et al., 2006]。一方で、既存の大気散逸機構では、重い CO₂ を流出させるのは容易ではなかったと考えられてきた。ところが、Mars Express 探査機により、多量の CO₂⁺ イオンの散逸が観測され [Carlsson et al., 2006]、その散逸機構の解明が急務となっている。

CO₂⁺ の散逸を大きく左右する要素の一つに、電離圏における CO₂⁺ 密度の高度分布がある。電離圏内の化学反応は、多成分 (Multi-species) MHD などによりすでに研究されているが、多成分 MHD がイオン種毎に扱うのは密度のみで速度は全イオン種同じと近似するので、イオン流体同士の速度差は再現できず、低高度から上層への CO₂⁺ の輸送の再現性はよくなかった。イオン種毎の密度分布を正確に記述するには、各イオン種を別々の流体として取り扱う多流体 (Multi-fluid) MHD 近似が必要となる。開発の方針としては、化学反応の効果を丁寧に扱った Terada et al. [2009] による多成分コードを多流体 MHD の先行研究である Najib et al. [2011] の方程式を参考に多流体 MHD に改良した。

本研究で開発した多流体 MHD では、イオン種間 (ion-ion) 衝突の効果を含めることも可能であるため、次に、火星電離圏における CO₂⁺ 密度の高度分布に焦点をあて、その分布に ion-ion 衝突が与える影響を調べた。ion-ion 衝突の効果を知るため、多流体 MHD でイオン衝突を含めた場合 (Case 1)、イオン衝突を含めない場合 (Case 2)、および、多成分 MHD に相当する全イオン種が同じ鉛直速度を持つ場合 (Case 3) の 3 つのシミュレーションを行い、準定常状態に達した結果を比較した。高度 460km での CO₂⁺ 密度は、Case 1: 82, Case 2: 190, Case 3: 11 cm⁻³ で、従来の多成分 MHD が CO₂⁺ の高高度側へ輸送を過小評価していることが判明した。Viking による電離圏の観測結果との比較からは、適度な ion-ion 衝突を含んだ Case 1 が最もよく観測結果を再現していた。以上から、多流体 MHD は低高度からの二酸化炭素イオンの輸送をより現実的に再現可能であり、火星からの CO₂⁺ 散逸を調べるためには、適切な ion-ion 衝突の導入が重要であるとの結論を得た。本発表では、イオン流体ごとの速度とイオン同士の衝突が、CO₂⁺ の鉛直密度分布に与える影響を報告する。

キーワード: 火星, 電離圏, 大気散逸, 多流体磁気流体シミュレーション
Keywords: Mars, ionosphere, Atmospheric escape, Multi-fluid MHD

水星大気密度の時間変動 Temporal variability of exospheric sodium density

亀田 真吾^{1*}; 布施川 綾花¹; 鍵谷 将人²; 米田 瑞生²
KAMEDA, Shingo^{1*}; FUSEGAWA, Ayaka¹; KAGITANI, Masato²; YONEDA, Mizuki²

¹立教大学, ²東北大学

¹Rikkyo University, ²Tohoku University

Mercury's atmosphere is very thin and it is also called "surface-bounded exosphere". In the detected species, e.g., H, He, O, Na, Mg, K, and Ca, Na emission (NaD) is the brightest and has been most frequently observed. Solar-photon-stimulated desorption, sputtering by impacting solar particles, and meteoroid vaporization are considered to be the source processes of Mercury's sodium. However, the primary process among these three processes is unclear as yet. The resonance scattering constitutes exospheric emission. The NaD emission is well suited for study by ground-based observations because of its high intensity. Past observations have shown that the temporal variation and north-south asymmetry of intensity of sodium emission.

We have observed Mercury sodium exosphere at the Haleakala Observatory in Hawaii since April 2011. The observations were performed using a 40 cm Schmidt-Cassegrain telescope, a high-dispersion spectrograph, and a CCD camera. We determined the temporal variation of the sodium density using the observational data. It is possible that the temporal variation of the sodium density is caused by variation of solar wind magnetic field if solar wind ion sputtering is the primary source process of Mercury exosphere. To verify this assumption, we checked the temporal variation of solar wind magnetic field observed by MESSENGER, and then we compared these variations with our observational result.

In this presentation, we show our observational results and discuss the dominant source process.

オフセットダイポールを考慮した水星磁気圏における重イオンダイナミクスの研究 Study of heavy ion dynamics in the Mercury's magnetosphere with offset dipole

八木 学^{1*}; 関 華奈子²; 松本 洋介³; Delcourt Dominique⁴; Leblanc Francois⁴
YAGI, Manabu^{1*}; SEKI, Kanako²; MATSUMOTO, Yosuke³; DELCOURT, Dominique⁴; LEBLANC, Francois⁴

¹ 東北大学, ² 名古屋大学, ³ 千葉大学, ⁴ フランス国立科学研究センター

¹Tohoku Univ., ²Nagoya Univ., ³Chiba Univ., ⁴CNRS

From Mariner 10 and MESSENGER observations, Mercury's magnetosphere is thought to be a miniature of the Earth's magnetosphere. While these two magnetospheres have several characteristics in common, some critical differences are also evident. First, there is no atmospheric layer, but only tenuous exosphere. Second, the kinetic effects of heavy ions might not be negligible because Mercury's magnetosphere is relatively small compared to the large Larmor radii. Trajectory tracings is one of the dominant methods to estimate the kinetic effect of heavy ions which originate the exosphere, though the results of the simulation are quite sensitive to the electric and magnetic field. Hence, it is important to provide a realistic field model in the trajectory tracings. In order to construct a large scale structure, we developed a MHD simulation code, and adopted to the global simulation of Mercury's magnetosphere. We performed four solar wind conditions of the northward IMF, and the results showed that the global configurations such as the location of magnetopause depend heavily on the dynamic pressure, while the solar wind electric field contributes little to the magnetospheric configuration. On the other hand, the results of statistical trajectory tracings of exospheric sodium ions depend not only on the dynamic pressure but also on the solar wind electric field. In the results, we identified two efficient acceleration processes and formation of the 'sodium ring' which is formed by the accelerated ions drifting around the planet by magnetic gradient of the dipole field. When the solar wind dynamic pressure is low, acceleration by magnetospheric convection is efficient in the vicinity of Mercury. When the dynamic pressure is high, entry of the accelerated ions picked-up in the magnetosheath into the magnetosphere becomes dominant. The entry point of sodium ions changes due to the variation of the solar wind electric field, which causes a difference in the sodium ring's shape for the same solar wind dynamic pressure cases. Recent observation by MESSENGER revealed the weaker dipole field of Mercury than the past estimation based on Mariner 10 as well as large offset of dipole which could change the global configuration of Mercury's magnetosphere and behavior of sodium ions. In the presentation, we will also discuss the ongoing simulation including the above configuration of intrinsic magnetic field of Mercury especially focus on how will this affect the acceleration mechanisms.

キーワード: 水星磁気圏, テスト粒子計算, 磁気流体シミュレーション

Keywords: Mercury's magnetosphere, test particle simulation, MHD simulation

HISAKI 衛星搭載極端紫外分光撮像装置で観測されたイオプラズマトーラスの空間分布と時間変動 Structure and time variability of Io plasma torus observed by EXCEED onboard the HISAKI satellite

土屋 史紀^{1*}; 吉川 一朗²; 吉岡 和夫³; 木村 智樹³; 山崎 敦³; 村上 豪³; 鍵谷 将人¹; 寺田 直樹¹; 笠羽 康正¹; 坂野 井健¹

TSUCHIYA, Fuminori^{1*}; YOSHIKAWA, Ichiro²; YOSHIOKA, Kazuo³; KIMURA, Tomoki³; YAMAZAKI, Atsushi³; MURAKAMI, Go³; KAGITANI, Masato¹; TERADA, Naoki¹; KASABA, Yasumasa¹; SAKANOI, Takeshi¹

¹ 東北大学, ² 東京大学, ³ JAXA 宇宙科学研究所

¹Tohoku University, ²The University of Tokyo, ³ISAS/JAXA

Spatial distribution and time variability of emission lines of sulfur ions in Io plasma torus (IPT) measured by EUV spectrograph (EXCEED) onboard the HISAKI satellite are presented. The satellite has been launched on 14 Sep. 2013 and begun regular observation of IPT and Jupiter's UV aurora since middle of Dec. and it will continue until the end of Feb. A wide slit whose designed field of view (FOV) is 400 x 140 arcsec was chosen to measure both radial and latitudinal distributions of IPT. Jupiter's north aurora was guided at the center of FOV and its spectrum was simultaneously observed. Averaged spatial distribution of sulfur emission lines is consistent with previous observations. Looking at the time variability of IPT, new features were found from the EXCEED observation. The most surprising one is periodic variation synchronized with Io's orbital period. The variations in dawn and dusk sides were out-of-phase, suggesting the bright region is co-rotating with Io. The amplitude of the periodic variation is larger than those of well-known Jupiter's rotation periodicities in shorter wavelength and becomes smaller as increasing wavelength. The wavelength dependence suggests significant electron heating and/or hot electron production processes associated with Io. Another noticeable feature is long-term change in dawn-dusk asymmetry of the emission intensity which had not been reported so far. The asymmetry has been assumed to be a proxy of large scale dawn-to-dusk electric field generated in Jovian magnetotail and the origin of the variation observed will be discussed in detail. Sporadic change in the emission intensity of IPT associated with the aurora brightening event is expected to investigate in detail with the EXCEED observation to reveal energy transport process between inner and middle/outer magnetospheres. The expected event has not been detected so far and further continuous observation will be expected to resolve this issue.

EXCEEDによるイオプラズマトーラス極端紫外観測 Plasma dynamics of Io plasma torus seen from the EXCEED

吉岡 和夫^{1*}; 村上 豪¹; 木村 智樹¹; 山崎 敦¹; 土屋 史紀²; 鍵谷 将人²; 吉川 一朗³
YOSHIOKA, Kazuo^{1*}; MURAKAMI, Go¹; KIMURA, Tomoki¹; YAMAZAKI, Atsushi¹; TSUCHIYA, Fuminori²; KAGI-
TANI, Masato²; YOSHIKAWA, Ichiro³

¹ 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所, ² 東北大学大学院理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター, ³ 東京大学
¹Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ²Planetary Plasma and Atmospheric Re-
search Center, Graduate School of Science, Tohoku University, ³The University of Tokyo

Major ions in Io plasma torus have many allowed transition lines in the EUV and their radiation easily escapes to become observable from outside the region. In other words, Jovian inner magnetosphere is able to be monitored by the EUV spectral observation remotely. Moreover, with the atomic database which provides the cross sections to the ambient electron, transition probabilities, and these temperature dependence, EUV observations can be a very important diagnostic of ion densities, electron density, and its temperature.

The EUV spectroscope EXCEED on the Hisaki spacecraft has started to observe the Jovian magnetosphere from the Earth orbit since the end of 2013. The spacecraft is dedicated for the solar system planets so that all the observation window is spared for planetary science. The spectral range is from 52 to 148 nm and its resolution is 0.3 nm with one of the narrowest slit. The field of view is 400 arc-seconds which corresponds to around 18 RJ. Therefore, it can observe whole region of Io plasma torus at one time. Moreover, it can achieve better spatial resolution than 1 RJ. It is the first time to get a whole spectral images of Io plasma torus in the EUV with such a high performance instrument. In this presentation, we will show the first results of EXCEED observation with its high spectral resolution slit for Io plasma torus.

キーワード: 極端紫外, イオプラズマトーラス, 木星磁気圏, ひさき, EXCEED
Keywords: EUV, Io plasma torus, Jovian magnetosphere, Hisaki, EXCEED

土星内部磁気圏におけるダスト-プラズマ相互作用及び磁気圏-電離圏結合 Dust-plasma interaction in Saturn's inner magnetosphere and its magnetosphere-ionosphere coupling

堺 正太朗^{1*}; 渡部 重十¹

SAKAI, Shotaro^{1*}; WATANABE, Shigeto¹

¹ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

¹ Dep. CosmoSciences, Hokkaido University

We investigated the magnetosphere-ionosphere coupling with a dust-plasma interaction in Saturn's inner magnetosphere by using a modeling of ionosphere and inner magnetosphere. From our previous model, it was revealed that the magnetospheric ion velocity was significantly reduced by the electric fields generated by the ion-dust collisions when the dust density is high and the thickness of dust distribution is large. It was consistent with observations when the dust density is larger than $\sim 10^5 \text{ m}^{-3}$ for ionospheric conductivity of 1 S. An average electron density of Saturn's ionosphere obtained from radio occultations by Cassini spacecraft was $\sim 10^{10} \text{ m}^{-3}$ at 2000 km where density had a peak and gradually decreased with the increasing altitude. The density was $\sim 10^8 \text{ m}^{-3}$ at 10000 km. Plasma densities calculated by models also were similar to the observations and the topside temperature is $\sim 650 \text{ K}$. However, electron densities from those models were calculated at the altitudes below 4000 km.

We estimated the ionospheric Pedersen conductivity from the plasma densities, and the plasma temperatures and velocities by using a magnetohydrodynamics model. We used the magnetospheric plasma temperature, which was 2 eV, as a boundary condition to investigate the magnetospheric influences. The plasma density was about 10^9 m^{-3} at the altitude of 1200 km, and it decreased to about 10^7 m^{-3} at the altitude of 10000 km. Below 10000 km altitudes the light ion has the upward velocity, while heavy ions have zero or downward velocity at low altitudes. This might be due to the difference of mass. The electron temperature increased to 20000 K at the altitude of 10000 km due to the heat flow from the inner magnetosphere. The electron temperature was about 2000 K at the altitude of 1000 km, and the collision and joule heating were contributing to the temperature below 2000 km. The peak density changed between about 10^8 and 10^{10} m^{-3} during one Saturn's day, and the electron density decreased with increasing the altitude. On the other hand, the electron temperature didn't depend on the local time. The Pedersen conductivity was the maximum 0.77 S on day time and the minimum 0.30 S on dawn time. The Pedersen conductivity strongly depends on the ionospheric plasma density.

We estimated the magnetospheric ion velocity by using the calculated conductivity. The Pedersen conductivity was the largest value at $L = 3$ and it decreased with the increase of the distance from Saturn. The conductivity changed in local time. The maximum was on the day time and the minimum was on the dawn time. The calculated ion velocity decreases from the co-rotation speed outside $3.5 R_S$. The ion velocity was 60-80% of the co-rotation speed in the inner magnetosphere. The ion velocity was smaller than the co-rotation speed since the magnetospheric electric field is smaller than the co-rotational electric field when the current due to the ion-dust collision flows in the inner magnetosphere. The ion velocity strongly depended on the local time since the conductivity also depended on the local time. It is suggested that the dispersion of the observed speeds could show the dependence of local time. The ion velocity is fast during the solar irradiation since the Pedersen conductivity is large, while it becomes slow after the sunset because of the small conductivity.

The magnetosphere-ionosphere coupling is significantly important for the dust-plasma interaction. It is impossible to understand the dust-plasma interaction in Saturn's inner magnetosphere without understanding of the Saturn's ionosphere, since the magnetosphere and ionosphere is intimately-connected.

キーワード: 土星系, ダスト-プラズマ相互作用, 磁気圏-電離圏結合, ダスティプラズマ

Keywords: Saturn, Dust-plasma interaction, Magnetosphere-ionosphere coupling, Dusty plasma

カッシーニ探査機の太陽風データを利用したMHDシミュレーションによる磁気圏対流、オーロラ発光の関係
Relation between Kronian magnetospheric convection and auroral emission from MHD simulation with solar wind data observe

深沢 圭一郎^{1*}; WALKER Raymond J.²; ERIKSSON Stefan³
FUKAZAWA, Keiichiro^{1*}; WALKER, Raymond J.²; ERIKSSON, Stefan³

¹九州大学情報基盤研究開発センター, ²UCLA, IGPP, ³Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado at Boulder

¹Research Institute for Information Technology, Kyushu University, ²UCLA, IGPP, ³Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado at Boulder

In a series of our simulation studies we have reported that vortices formed at Saturn's dawn magnetopause in simulations when IMF was northward. We interpreted these vortices as resulting from the Kelvin Helmholtz (K-H) instability. In addition, thanks to the recent developments of computer performance, we have been able to perform the high resolution global MHD simulations of the Kronian magnetosphere. In these simulations we obtained the signature of the field-aligned currents from the K-H vortices in Saturn's auroral ionosphere and found small patchy regions of upward field-aligned current which may be related to auroral emissions. These patchy aurorae resembling our results have been reported from Cassini observations.

In our previous simulations we used the constant and simple solar wind conditions to understand the basic behavior of Kronian magnetosphere. In this study we have used Cassini observations of the solar wind upstream of Saturn to drive a simulation. Using these solar wind data we simulated the Kronian magnetosphere from 2008-02-12/14:00:31 to 2008-02-13/01:59:31 when the Hubble Space Telescope (HST) observed the Kronian UV auroral emissions. In these solar wind conditions there are several enhancement of the solar wind dynamic pressure (shock) and polarity reversal in the IMF components.

From these simulation the shape and convection of Kronian magnetosphere dynamically changed according to the variation of dynamic pressure and IMF directions. As the results, layered convection formed between the corotation region and magnetopause. Furthermore these convection interacted each other, then the large vortex configurations appeared. The calculated configuration of field aligned currents from the simulation also showed the layered and patchy distributions. In addition the upward field aligned current appeared in the dawn side mainly which resembles the configuration of auroral emission by HST.

木星磁気圏ダイナミクスに関する研究-II：内部磁気圏へのエネルギー輸送過程の解明 Study of dynamics of the Jovian magnetosphere-II: energy transportation process to the inner magnetosphere

水口 岳宏^{1*}; 三澤 浩昭¹; 土屋 史紀¹; 小原 隆博¹; 笠原 慧²

MIZUGUCHI, Takahiro^{1*}; MISAWA, Hiroaki¹; TSUCHIYA, Fuminori¹; OBARA, Takahiro¹; KASAHARA, Satoshi²

¹ 東北大学大学院理学研究科惑星プラズマ・大気研究センター, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

¹Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, ²Institute of Space and Astronautical Science/ Japan Aerospace Exploration Agency

We have researched response of the Jovian inner magnetosphere to the substorm-like event which occurred in the night side of the middle/outer magnetosphere. The transport of magnetic flux tube is one of important issues in the global dynamics of the Jovian magnetosphere [Kivelson et al., 2005]. The magnetic flux tubes are carried outward from the Io plasma torus with the slowly outflowing plasma. As they move outward, alternative flux tubes should be returned to the torus through rapid inflow of lower-dense flux tubes. Goal of this study is to reveal the role of the substorm-like event in the transport of magnetic flux tube in the Jovian magnetosphere.

In this study, substorm-like events were identified by using the in-situ observation data obtained by the Plasma Wave Subsystems (PWS), Energetic Particle Detector (EPD) and Magnetometer (MAG) onboard the Galileo orbiter. X-lines where the substorm-like events are thought to start were located at around 60-80 RJ [Woch et al., 2002]. Narrowband Kilometric radiation (nKOM) which was remotely observed by PWS was used to find response of the inner magnetosphere to the substorm-like event. The source of nKOM is suggested to be located at the outer edge of the Io torus (8-10 RJ) (Reiner et al., 1993).

In the preceding studies, Louarn et al. (2001) reported nKOM correlated with inward flow burst during Jovian substorm-like event reported by Woch et al.(1998) and Krupp et al.(1998). The report implies that the generation mechanism of nKOM relate with the return of magnetic flux tube to inner magnetosphere. However, it has not been revealed well yet how inner and outer magnetospheres couple each other during substorm-like event.

On the other hand, Dubyagin et al.(2011) reported about deeply penetrating flow burst at the terrestrial magnetosphere. They reported that an inward flow burst penetrated into the inner magnetosphere when its entropy was less than that of the inner magnetosphere, while flow burst did not penetrated when its entropy was larger than that of the inner magnetosphere.

We have analyzed Jupiter's several inward flow events which are expected to relate with tail reconnection and nKOM radiation by using the data obtained by Galileo. We also have applied Dubyagin's entropy analysis method to Jupiter's cases in order to reveal that how reconnection event at the outer magnetosphere couple with the inner magnetosphere.

In this presentation, we will show preliminary results on relations of Jovian substorm-like event and phenomena of inner magnetosphere.

キーワード: 木星磁気圏, 磁気圏ダイナミクス, サブストーム, プラズマ密度, Galileo, nKOM

Keywords: Jovian magnetosphere, magnetospheric dynamics, substorm, plasma density, Galileo, nKOM

LWA1で観測された木星電波Io-Cモジュレーションレーンについて(2) Jupiter's decametric Io-C modulation lanes observed by LWA1 (2)

今井一雅^{1*}; 島内良章¹; Clarke Tracy²; Higgins Charles A.³; 今井雅文⁴
IMAI, Kazumasa^{1*}; SHIMANOUCI, Yoshiaki¹; CLARKE, Tracy²; HIGGINS, Charles A.³; IMAI, Masafumi⁴

¹ 高知工業高等専門学校, ²Naval Research Laboratory, ³Middle Tennessee State University, ⁴ 京都大学
¹Kochi National College of Technology, ²Naval Research Laboratory, ³Middle Tennessee State University, ⁴Kyoto University

The Long Wavelength Array (LWA) is a low-frequency radio telescope designed to produce high-sensitivity, high-resolution images in the frequency range of 10-88 MHz. The Long Wavelength Array Station 1 (LWA1) is the first LWA station completed in April 2011, and is located near the VLA site in New Mexico, USA. LWA1 consists of a 256 element array, operating as a single-station telescope. Each LWA1 beam provides dual orthogonal linear polarizations such that it is possible to reconstruct the full Stokes parameters for each tuning. The first Jupiter radio observation using LWA1 was made by Tracy Clarke (PI) from December, 2011. The initial analyses of Io-A/C, Io-B, and Io-D event, show many spectral features such as S-bursts, narrow-band events (N-bursts), as well as modulation lanes and Faraday lanes.

The modulation lanes in Jupiter's decametric radiation, which were discovered by Riihimaa [1968], are groups of sloping parallel strips of alternately increased and decreased intensity in the dynamic spectral plots. We present LWA1 observations of modulations lanes detected across a Jovian decametric Io-C burst that contains both right hand circular and left hand circular emission. The modulation lanes cross both handedness of polarization, suggesting that the emissions may be coming from the same hemisphere. These results add important information regarding the emission mechanism of Jupiter's decametric emissions.

キーワード: 木星電波, デカメートル波, モジュレーションレーン, 電波源, 電波放射機構, LWA1
Keywords: Jupiter radio, decametric wave, modulation lane, radio source, radio emission mechanism, LWA1

かぐやによるオーロラキロメートル波の偏波観測と月による掩蔽 Observations of Polarization of Auroral Kilometric Radiation by KAGUYA and its Lunar Occultations

橋本 弘藏^{1*}; 後藤 由貴²; 宇田 和晃²; 笠原 禎也²; 小野 高幸³

HASHIMOTO, Kozo^{1*}; GOTO, Yoshitaka²; UDA, Kazuaki²; KASAHARA, Yoshiya²; ONO, Takayuki³

¹ 京都大学名誉教授, ² 金沢大学, ³ 東北大学

¹Professor Emeritus, Kyoto University, ²Kanazawa University, ³Tohoku University

月周回衛星「かぐや (SELENE)」搭載 LRS[1] の WFC-H 波動観測装置 [2] では、1-1,000kHz の波動のスペクトルを観測でき、オーロラキロメートル波 (AKR)、電子プラズマ波、広帯域静電波などが観測され、周辺プラズマ環境のモニターにもなっている。本装置は二対のダイポールアンテナを用いた偏波観測が可能であり、AKR の偏波解析を行ってきた。

かぐやは地球からの電波である AKR の観測中に、周回ごとに月の背面に入るが、その間地球の一部が隠れる時間がある。掩蔽観測は、月周回衛星 RAE2 の 32 チャンネル受信機で過去に行われたが [3,4]、偏波は観測されていない。AKR の偏波観測を行っても、プラズマ波動で言う磁場方向に対する偏波と観測される進行方向に対する偏波の関係は、源の半球により逆転する。AKR が、片半球しか見えていない時間帯に受かっているかどうかで源の半球が特定でき、同時に偏波も観測できる。この情報は、両半球が見える状態になっても、解釈のあいまいさをなくすることができる点で有意義である。このような条件で観測できた例について、観測結果と解釈を示す。

References

[1] T. Ono, A. Kumamoto, Y. Kasahara, Y. Yamaguchi, A. Yamaji, T. Kobayashi, S. Oshigami, H. Nakagawa, Y. Goto, K. Hashimoto, Y. Omura, T. Imacahi, H. Matsumoto, and H. Oya, The Lunar Radar Sounder (LRS) Onboard the KAGUYA (SELENE) Spacecraft, The Kaguya Mission to the Moon (Guest Editors: A. Matsuoka, C.T. Russell), Space Science Reviews, 154, Nos. 1-4, 145-192, DOI:10.1007/s11214-010-9673-8, 2010

[2] Y. Kasahara, Y. Goto, K. Hashimoto, T. Imachi, A. Kumamoto, T. Ono, and H. Matsumoto, Plasma Wave Observation Using Waveform Capture in the Lunar Radar Sounder on board the SELENE Spacecraft, Earth, Planets and Space, 60, 341-351, 2008.

[3] J.K. Alexander and M.L. Kaiser, Terrestrial Kilometric Radiation 1. Spatical Structure Studies, J. Geophys. Res., 81, 5948-5956, 1976

[4] J.K. Alexander and M.L. Kaiser, Terrestrial Kilometric Radiation 2. Emission From the Magnetospheric Cusp and Dayside Magnetosheath. J. Geophys. Res., 82, 98-104, 1977

キーワード: AKR, 偏波, 掩蔽, かぐや, 月

Keywords: AKR, Polarization, Occultation, KAGUYA, Moon

金星上部もや層の研究 Study of the Venus' upper haze

高木 聖子^{1*}; Arnaud Mahieux²; Valerie Wilquet²; AnnCarine Vandaele²; 岩上 直幹¹
TAKAGI, Seiko^{1*}; ARNAUD, Mahieux²; VALERIE, Wilquet²; ANNCARINE, Vandaele²; IWAGAMI, Naomoto¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ²Belgian Institute for Space Aeronomy

¹Graduate School of Science, the Univ. of Tokyo, ²Belgian Institute for Space Aeronomy

金星は地球とほぼ同じ大きさ・密度を持ち、太陽系形成時には互いに似た惑星として誕生したと考えられているが、90気圧もの二酸化炭素大気や全球を一様に覆う硫酸雲（高度 47-70 km）の存在など、地球とは全く異なる様相を見せる。

過去の金星観測により、硫酸雲の上に存在するもや層（70-90 km）が確認されている。しかし、もや層観測は絶対的に不足しているため、もや層の知見は硫酸雲に比べて格段に少なく、その描像は不明と言わざるを得ない。雲の一部であるもや層の描像が明らかでないことも大きく起因し、金星雲全体の生成・維持メカニズムは長年謎のまま残されてきた。将来的に金星雲の生成・維持メカニズムを解明するにあたり、まずもや層の描像を解明する必要がある。

現在、欧州の金星周回機 Venus Express 搭載の赤外分光計 Solar Occultation at InfraRed (SOIR, 2.3-4.2 μm) は、太陽掩蔽法により高高度（70-220 km）の金星大気・雲を 2006 年より継続観測している。これまで殆ど観測がなかったもや層の情報も豊富に取得している。私は博士課程 2 年次に、SOIR を担当している Ann C. Vandaele 博士に受入を認められ、ESA の研究機関 Belgian Institute for Space Aeronomy に身を置き研究する機会に恵まれた。SOIR の観測データを 2006 年から約 3 年分解析し、90 km 以上にもや（「上部もや層」とする）が存在することと、上部もや層の新たな知見（消散係数・光学的厚さ・混合比の高度・緯度分布）を初めて統計的に明らかにした。高低緯度共に混合比が高度 90 km 以上で増加していることから、存在も確認されてこなかった上部もや層において、もやが新たに生成されていることが初めて明らかになった。また、SO・SO₂ 混合比が高高度で増加する傾向との類似性から、もやと硫黄化合物との化学的関係を示唆した。

キーワード: 金星, 雲, もや層

Keywords: Venus, upper haze, Venus Express, SOIR, cloud

欧州探査衛星 PFS を用いた火星中間圏に存在する CO₂ の氷雲の観測 Observation of CO₂-ice cloud in the Martian mesosphere by using PFS onboard Mars Express

佐藤 佑紀^{1*}; 笠羽 康正¹; Marco Giuranna²; 青木 翔平¹; 中川 広務¹; 黒田 剛史³
SATO, Yuki^{1*}; KASABA, Yasumasa¹; MARCO, Giuranna²; AOKI, Shohei¹; NAKAGAWA, Hiromu¹; KURODA, Takeshi³

¹ 東北大学 惑星大気物理学, ²IAPS,INAF,Italy, ³ 東北大学 惑星プラズマ大気研究センター

¹Planetary Atmosphere, TOHOKU University, ²IAPS,INAF,Italy, ³Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, TOHOKU University

Almost all of constituent of martian atmosphere is CO₂ (95%). It condenses at very high altitude (60~100km) and become cloud. CO₂-ice cloud have been observed by many instrument, but it was difficult to clearly judge whether observed cloud is made of CO₂ or not. However OMEGA, visible and near-infrared imaging spectrometer onboard Mars Express, have provided the first spectroscopic identification of a cloud as being composed of CO₂ (Montmessin et al, 2007) CO₂-ice cloud has characteristic spectral feature emission peak at 4.26 μ m. Recent study reported that CO₂-ice cloud distributes around equator in spring equinox to early summer and mid latitude in local autumn. (Maattanen et al,2010, Montmessin et al,2007 2006, Clancy et al 2007) However, it is not clear about cloud feature (particle size or opacity).

We try to observe CO₂-ice cloud using high spectral resolution instrument PFS, infrared fourier spectrometer onboard Mars Express. Strong point of PFS is that spectral resolution is ten times greater than that of OMEGA and We can see spectral feature of CO₂-ice cloud (spike at 4.26 μ m) more clearly. Another point is that PFS and OMEGA observe almost the same point, so two instruments can observe CO₂-ice cloud at the same time. For the first step, we check the data where OMEGA observed CO₂-ice cloud (10 orbits) and found CO₂-ice cloud like feature all of the 10 orbits. However emission peak appears at shorter wavelength (at 4.25 μ m). In order to judge whether this signal is real or not, we compared PFS spectra and OMEGA spectra observed at the same point. When PFS observe signal at 4.25 μ m, OMEGA also show strong signal at 4.26 μ m, so we can say PFS signal is real. In some orbit, PFS observed different signal from that of OMEGA. It is double spike feature at 4.25 μ m and 4.28 μ m which OMEGA can not resolve. It is possible that double peak feature shows different cloud feature, for example, particle size. Now we are trying radiative transfer model and discuss how cloud spectral feature changes when we changes cloud parameter (size distribution, altitude, cloud opacity).

キーワード: 火星, 雲

Keywords: Mars, CO₂-ice cloud

巨大惑星を想定した雲対流の 2 次元数値計算 Numerical Modeling of Moist Convection in Giant planets

杉山 耕一郎^{1*}; 中島 健介³; 小高 正嗣²; 倉本 圭²; 林 祥介⁴

SUGIYAMA, Ko-ichiro^{1*}; NAKAJIMA, Kensuke³; ODAKA, Masatsugu²; KURAMOTO, Kiyoshi²; HAYASHI, Yoshi-yuki⁴

¹JAXA 宇宙研, ²九大理・地球惑星科学, ³北大理・宇宙理学, ⁴神戸大理・地球惑星科学

¹ISAS/JAXA, ²Graduate school of Science, Kobe University, ³Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, ⁴Graduate school of Science, Kobe University

巨大惑星には活発な積雲が存在することが知られている。巨大惑星の雲対流は、地球大気の場合と同様に、大気の成層構造と物質分布の決定に重要な役割を担っ

ていると考えられている。しかし、厚い雲に覆われた巨大惑星の雲層を遠隔観測するのは困難であり、巨大惑星における雲対流と平均的大気構造との関係については未だ明らかとなっていない点が多い。この問題に対し我々は、複数成分の凝結および化学反応を考慮した 2 次元雲対流モデルを開発し、木星大気条件において、雲の生成消滅が繰り返された結果として決まる統計的平衡状態での大気構造を調べてきた (Sugiyama et al., 2009, 2011, 2014)。本発表では、木星以外の巨大惑星 (土星, 天王星, 海王星) を想定した同様の 2 次元数値計算を実行し、雲対流と平均的大気構造との関係を議論する。

モデル方程式として準圧縮系方程式 (Klemp and Wilhelmson, 1978) を用い、雲微物理過程は地球の暖かい雨のパラメタリゼーション (Kessler, 1969) を用いて表現する。放射過程は陽に計算せず、水平一様かつ時間変化しない熱強制で代用する。木星以外の巨大惑星では、雲層における正味の放射加熱・冷却の鉛直プロファイルは観測されていないため、木星の観測結果に基づき 2 bar 高度から対流圏界面の間を冷却する。統計的平衡状態に至るまでの計算時間を短縮するため、熱強制の値は木星大気における観測値より 2 桁大きい -1 k/day とする。

鉛直計算領域は、土星で 500 km, 天王星と海王星で 600 km, 水平計算領域は各ケースとも 960 km とする。鉛直計算領域の大きさ、および下部境界での温度圧力は熱平衡計算 (Sugiyama et al., 2006) に基づき決定した。解像度は水平方向と鉛直方向共に 2 km とする。初期の鉛直温度構造は、下部境界から対流圏界面までは断熱的とし、その上部は温度一定とする。凝結成分気体の存在度は太陽組成を基準に数通り与える。

一例として、以下では凝結成分気体の存在度は太陽組成の 1 倍とした場合の土星条件での数値計算結果を示す; 当日は天王星・海王星条件での結果や、凝結成分気体の存在度を広く変化させた計算も示す予定である。雲対流層内の流れ場は、上昇域よりも下降域の方が強く狭いという特徴が見られる。この特徴は狭くて強い上昇流と広くて弱い下降流によって特徴付けられた木星大気の雲対流計算の結果 (Sugiyama et al., 2009) と明らかに異なる。その一方で、凝結性成分気体と凝結物の平均的鉛直分布の特徴は木星大気の雲対流計算の結果と整合的である。H₂O 持ち上げ凝結高度に形成される安定層が流れ場に対する境界として作用しており、鉛直速度の自乗平均はその高度において局所的な最小値を取る。活発な対流によって、H₂O と NH₄SH の雲粒は NH₃ 持ち上げ凝結高度より上空まで移流される。雲対流層内はよく混合されるため、NH₃ と H₂S 蒸気はそれぞれの持ち上げ凝結高度ではなく H₂O 持ち上げ凝結高度より高度と共に減少を始める。

キーワード: 巨大惑星, 湿潤対流, 数値計算, 雲解像モデル

Keywords: atmosphere of giant planets, moist convection, numerical modeling, cloud resolution model

雲解像モデルを用いた金星重力波の2次元数値実験 Two dimensional numerical study on Venusian gravity waves by using mesoscale model

安藤 紘基^{1*}; 杉山 耕一朗¹; 今村 剛¹; 小高 正嗣²; 中島 健介³

ANDO, Hiroki^{1*}; SUGIYAMA, Ko-ichiro¹; IMAMURA, Takeshi¹; ODAKA, Masatsugu²; NAKAJIMA, Kensuke³

¹宇宙航空研究開発機構, ²北海道大学, ³九州大学

¹ISAS/JAXA, ²Hokkaido University, ³Kyusyu University

昨今、地球だけでなく金星大気中でも重力波がよく観測されるようになった。例えば、O₂の大気光観測によって高度110kmにて水平波長が100 km程度の重力波が見られている。また金星周回衛星に搭載された紫外光カメラの撮像観測により、雲頂(高度70 km)で水平波長が60-150 kmの重力波が確認されている。しかしこれらの観測では、ある特定の高度での重力波しか見ることができず、波の鉛直伝播特性を考察することや運動量フラックスを見積もることが難しい。また、電波掩蔽観測によって高度65-90 kmの範囲で得られた鉛直温度分布から、重力波に伴う温度擾乱が検出され、そのスペクトル解析から鉛直波長5-10 kmの波が卓越することが示されている。しかしこの観測では水平方向に物理量を積分してしまうため、上記の様な小規模な重力波を捉えることは出来ず、また水平波長や水平位相速度について知ることができない。このように、現段階では重力波が金星大気の運動に与える影響を観測のみから理解することは難しい。

本研究では、金星雲層中の対流層から生成される重力波について対流生成も含めて2次元の数値計算を行い、波の伝播特性や位相速度、波に伴う大気の加速・減速率について考察する。過去にも重力波が金星大気の運動に及ぼす影響に関する理論研究はあるが、いずれも地球の重力波観測に基づいた経験的なスペクトルをモデルに組み込んでいる。また対流そのものの挙動についてはImamura et al. (2014)で計算されているが、高度60 kmより上は考慮していない。故に重力波の励起から伝播に至るまで全て網羅した理論研究は、本研究が初めてである。

モデル方程式として準圧縮系方程式(Klemp and Wilhelmson, 1978)を用いる。計算の水平領域は50 km、鉛直領域は金星の高度35-100 kmとした。また解像度は水平方向に400 m、鉛直方向に250 mである。境界条件は上・下端にて、応力なし・鉛直流なし・温位フラックスなしとし、側面は周期境界とする。また波の反射を抑えるために、上端から20 kmと下端から5 kmの範囲でそれぞれスポンジ層を設けた。初期に与える温度の鉛直分布は、放射対流平衡の下での温度分布(Ikeda et al. 2010)を用いた。この時の静的安定度は、高度48-55 kmで中立層、その上下に安定層を持つように分布している。放射過程は陽に計算せず、水平一様かつ時間変化しない熱強制を与え、正味の放射加熱・冷却の鉛直分布はIkeda et al. (2010)に準ずる。初期では大気は静止しているとし、対流運動を駆動するために最大振幅1 Kの温位擾乱を高度45 kmに与え、そこから15日分の計算を行った。その結果、高度48-55 kmにて対流が生じており、対流層内の鉛直流の大きさ最大で約3 m s⁻¹である。また対流の水平スケールは約10 km程度である。対流層の上に位置する安定層では、対流によって励起された重力波が鉛直に伝播している様子が見られる。また高度60-80 kmにおける波に伴う鉛直流のホフメラー図を見ると、今回の計算では鉛直波長が約4 kmの波が卓越しており、波の周期は $\sim 5 \times 10^3$ sであった。また水平波長は50 km程度であった。これらの値は重力波の分散関係式を満たしている。また波の水平位相速度は ± 10 m s⁻¹程度であり、過去の紫外画像解析から推定された値と同程度である。当日は、より計算領域を広く取った上で数値計算を行った結果も提示し、実際の観測結果との比較について詳しく議論する予定である。

キーワード: 金星大気, 重力波, 数値計算

Keywords: Venus atmosphere, Gravity waves, Numerical study

IRTF/CSHELL 観測による金星 O₂ 大気光の時間変動 Temporal variations of Venus O₂ night airglow using IRTF/CSHELL

大月 祥子^{1*}; 岩上 直幹²; Robert Severine³; 佐川 英夫⁴; 神山 徹⁵; 佐藤 隆雄⁶

OHTSUKI, Shoko^{1*}; IWAGAMI, Naomoto²; ROBERT, Severine³; SAGAWA, Hideo⁴; KOUYAMA, Toru⁵; SATO, Takao M.⁶

¹ 専修大学, ² 東京大学, ³ Belgian Institute for Space Aeronomy, ⁴ 情報通信研究機構, ⁵ 産業技術総合研究所, ⁶ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

¹ Senshu University, ² University of Tokyo, ³ Belgian Institute for Space Aeronomy, ⁴ National Institute of Information and Communications Technology, ⁵ Information Technology Research Institute, ⁶ Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

Venus 1.27-micron O₂ night airglow is the indicator of the general circulation at about 95 km in Venus. Recent observations reported that the airglow emission showed the temporal variations with a period of a few hours and days [e.g. Ohtsuki et al., 2008; Gerard et al., 2008]. Such variations may be caused by the upward momentum transport and fluctuations by atmospheric waves. In recent years, the importance of planetary-scale waves on the general circulation of the Venus atmosphere has been recognized. Forbes and Konopliv [2007] suggested the propagation of planetary-scale waves originated in the cloud deck into the upper atmosphere. However, effects of planetary-scale waves on the Venus upper atmosphere have not been investigated yet.

We conducted 5-days monitoring observation of the airglow to detect the planetary-scale waves with IRTF/CSHELL from 11-15 July 2012, 3 and 5 February 2014. The 1.27-micron O₂ night airglow in the Venus atmosphere can pass through the Earth's atmosphere with a help of the Doppler shift. We obtained spectral image cubes at the wavelength of R-branch of the airglow band, which includes several rotational lines. In order to cover spectral information continuously, a slit drifted across Venus' nightside disk. The spatial resolution of the image is governed by seeing. The typical seeing was 0.6" to 1.5" in our observing run and corresponds to 200-450km at the center of Venus' disk. Under such conduction, we may detect airglow structures of small scales due to atmospheric waves; this is smaller than the region of enhanced airglow having a horizontal scale of ~3000km. We can also derive the hemispherical distribution of the rotational temperature. To coincide with our observations, SOIR/Venus Express stellar occultations were conducted. We can try to compare our horizontal temperature map and vertical temperature profile from SOIR data.

In this presentation, we will show temporal variation of the airglow distributions in July 2012 and report a preliminary result of our new observations in February 2014.

ハワイ・マウナケア山頂における赤外ヘテロダイン分光惑星観測計画 Observing plan for planetary atmosphere using IR heterodyne spectroscopy in 2014

中川 広務^{1*}; 青木 翔平¹; 笠羽 康正¹; 村田 功¹; 佐川 英夫²
NAKAGAWA, Hiromu^{1*}; AOKI, Shohei¹; KASABA, Yasumasa¹; MURATA, Isao¹; SAGAWA, Hideo²

¹ 東北大学, ² 情報通信研究機構

¹Tohoku University, ²National Institute of Information and Communications Technology

We propose a new developed infrared heterodyne instrument, called Mid-Infrared LAser Heterodyne Instrument (MILAH), for our dedicated telescope at the top of Mt. Haleakala, Hawaii. It addresses the key physical/meteorological parameters, such as the atmospheric temperature profiles, abundance profiles of the atmospheric compositions and their isotopes, and wind velocity. The observational sensitivity of MILAH is discussed in this paper. The scientific target of MILAH is to understand highly variable phenomena in the planetary atmospheres. The nature of atmospheric activity in various time-scale will be investigated by continuous monitoring with our dedicated telescope, in order to increase our understanding of planetary atmospheric dynamics, photochemistry, and meteorology. New measurements with high spatial/spectral resolutions constrain the three-dimensional distributions of temperature and compositions. The D/H and other isotopic ratios, diagnostic of the terrestrial atmosphere evolution, will be accurately measured in H₂O and CO₂. The atmospheric chemistry will be studied by monitoring O₃, H₂O₂, H₂O, and HDO. Mapping of the H₂O isotopes reveal the mechanism of complex interaction between regolith-aerosols-atmosphere-polar caps on Mars. Direct measurements of wind velocity and temperature allow the first monitoring of the middle atmosphere oscillations to investigate the effects of the gravity waves from the lower atmosphere on the upper atmosphere for various seasons and dust loadings. A number of organics molecule bands in the mid-infrared regime will be accurately measured in planetary/cometary/stellar atmospheres. In addition to these interconnected objectives, serendipitous searches with our advantage of dedicated use for astronomical/atmospheric transient events which occur at frequent and unpredictable intervals (e.g. dust storm) will enhance our knowledge of the composition and dynamics of the astronomical sources.

キーワード: 赤外分光, ヘテロダイン, レーザー, 観測, 惑星大気, 同位体

Keywords: infrared spectroscopy, heterodyne, laser, observation, planetary atmosphere, isotopes

次期火星探査機のための視覚的軌道設計 Visual Orbit Design for the Next Mars Exploration Mission

小倉 聡司¹; 川勝 康弘¹; 松岡 彩子¹; 田口 真^{2*}
OGURA, Satoshi¹; KAWAKATSU, Yasuhiro¹; MATSUOKA, Ayako¹; TAGUCHI, Makoto^{2*}

¹ 宇宙科学研究所, ² 立教大学

¹ ISAS/JAXA, ² Rikkyo University

In December, 2011, the working group concerned with the Japanese next Mars exploration mission began to study the use of orbiters to investigate the mechanisms of carbon dioxide and water escape from the Martian atmosphere, and the role played by the solar wind. This will be the successor to the first Japanese mission to Mars involving the NOZOMI spacecraft, and two different orbiters will be deployed around the planet. Orbiter-A will carry out in-situ observations of electric and magnetic fields, particles, plasma and the atmosphere at an altitude of about 100 km above the Martian surface. Orbiter-B will capture images of the escaping atmosphere and monitor solar-wind conditions. The mission life will be a Mars year. This paper describes a visual method for determining the orbits of both spacecraft, and presents examples of possible orbits.

The orbital constraints proposed by the working group are as follows.

Orbital constraints for Orbiter-A

A1. The periapsis altitude is around 150 km.

A2. The apoapsis altitude is between 5000 and 7000 km.

A3. The period during which periapsis occurs on the dayside of the planet is more than two thirds of the mission life.

Orbital constraints for Orbiter-B

B1. The apoapsis altitude is about 4-6 R_M .

B2. The period during which the orbiter is exposed to the solar wind is more than three quarters of the mission life.

B3. The period during which the orbiter can image the local time zone of 12-15 h at the planetary limb is more than three quarters of the mission life.

Orbital constraints for combined observations by both orbiters

C1. The number of times during which Orbiter-B is exposed to the solar wind and can also image Orbiter-A, whose solar zenith angle and altitude are less than 60 deg and about 300-800 km, respectively, is more than one hundred during the mission life.

C2. When C1 is satisfied, the angle between the line-of-sight of the imager onboard Orbiter-B and the velocity vector of Orbiter-A is within 90 ± 20 deg.

The orbital elements are obtained by solving the Lagrange planetary equations for a two-body boundary-value problem, taking only the J2 perturbation into account. Constraint A3 is chosen as an example for explaining the visual method of orbital design. The orbiter's longitude of ascending node and argument of periapsis in a Mars-Sun fixed coordinate system are taken as design variables, and the orbital constraint is used as an evaluation function. A contour map for a period in which periapsis occurs on the dayside is plotted in a coordinate system in which the longitude of ascending node and argument of periapsis are the X and Y axes, respectively. A mission profile is placed on the map, along which the changes in the longitude of ascending node and argument of periapsis during the mission period are plotted. The mission profile can be placed at anywhere on the map, since its shape can be kept almost constant by selecting an initial position determined by the position and direction of the spacecraft during Mars orbit insertion. By looking at the map, it then becomes easy to identify an appropriate initial point for the mission profile that maximizes the period during which periapsis occurs on the dayside.

By the method described above, it is possible to visually determine rough values for the longitude of ascending node and argument of periapsis that are suitable for the mission. This technique is also applicable to the general design of orbits around a planet by choosing a coordinate system appropriate for the given orbital constraints.

キーワード: 火星大気散逸, 火星探査機

Keywords: atmospheric escape of Mars, Mars orbiter

極周回成層圏望遠鏡による惑星観測-FUJIN プロジェクト- A Circumpolar Stratospheric Telescope for Observations of Planets ? FUJIN

前田 惇徳^{1*}; 田口 真¹; 吉田 和哉²; 坂本 祐二²; 中野 壽彦²; 荘司 泰弘³; 高橋 幸弘⁴; 仲本 純平⁴; 今井 正亮⁴; 渡辺 誠⁴; 合田 雄哉⁵

MAEDA, Atsunori^{1*}; TAGUTI, Makoto¹; YOSIDA, Kazuya²; SAKAMOTO, Yuji²; NAKANO, Toshihiko²; SHOJI, Yasuhiro³; TAKAHASHI, Yukihiko⁴; NAKAMOTO, Jumpei⁴; IMAI, Masataka⁴; WATANABE, Makoto⁴; GODA, Yuki⁵

¹ 立教大学理学部, ² 東北大学大学院工学研究科, ³ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁴ 北海道大学大学院理学院, ⁵ 北海道大学理学部

¹College of Science, Rikkyo University, ²Graduate School of engineering, Tohoku University, ³JAXA/ISAS, ⁴Graduate School of Science, Hokkaido University, ⁵School of Science, Hokkaido University

惑星の大気圏やプラズマ圏で起こる現象を研究するためには長時間の連続観測が重要である。気球を用いて極域成層圏に望遠鏡を浮かべて惑星を連続観測することを目的として FUJIN プロジェクトを遂行している。システムの性能確認を目的とした FUJIN-1 実験は 2013 年 5、6 月に北海道大樹町で実施される予定であったが、JAXA 側の気球制御システムの不具合により見送られた。しかし、それまでに実施された各種地上試験結果を総合して、FUJIN-1 の目的は達成されたと判断し、FUJIN-1 実験は終了した。新たに北極域での本格実験を行う FUJIN-2 の開発に着手した。成層圏の風向きが変わる 4、5 月期及び 8、9 月期に短期間ではあるが風速がきわめて小さい状態が発生する。FUJIN-2 はその機会を狙ってスウェーデン・キルナの気球実験施設である ESRANGE で放球し、1-2 日間の観測の後、スカンジナビア半島内にゴンドラを降下させ回収する。現在の計画では、FUJIN-2 実験は金星が観測好機となる 2015 年 4、5 月に実施される予定である。夏期の極域成層圏で卓越する東風に気球を乗せると、キルナからアラスカまで約 1 週間、ほぼ等緯度に沿って地球を一周してキルナまで戻すのに約 2 週間余りかかる。それを利用し、FUJIN-3 は極周回実験に臨む。FUJIN-2 をベースに高感度 CCD カメラ及び液晶チューナブルフィルターを搭載し、2017 年夏期に金星、木星、水星を観測する。さらに将来的には 1 メートルクラスの望遠鏡を備えた次世代観測機器にアップグレード、推進力を備え極に近い地点へ移動するゴンドラ、スーパープレッシャー気球による通年観測を実現するために、今後技術的検討及び要素開発を進める。

キーワード: 極周回, 成層圏, 望遠鏡, 金星, FUJIN プロジェクト

Keywords: Circumpolar, Stratospheric, Telescope, Venus, FUJIN-project

金星超高層大気における速い抵抗性磁気リコネクション Study of fast resistive magnetic reconnection in the upper atmosphere of Venus

阪本 仁^{1*}; 寺田 直樹¹
SAKAMOTO, Hitoshi^{1*}; TERADA, Naoki¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku University

金星は固有磁場を持たない惑星だが、太陽風との相互作用により、超高層大気中には磁場が存在する。金星の昼側の電離圏では、太陽風の動圧が低い時に磁力線がロープのようにねじれたフラックスロープと呼ばれる微細構造がしばしば観測される。Pioneer Venus Orbiter (PVO) は、昼側の下部電離圏を通過する軌道の 40 パーセント以上でフラックスロープを観測し、その観測頻度が 170km で最大となることを報告した [Elphic et al., 1983]。

フラックスロープに関して、これまでにいくつかの生成モデル (K-H 不安定 [Wolff et al., 1980], ホール効果に起因する非線形効果 [Kleorin et al., 1994]) が提案されたが、いまだにその生成メカニズムはよくわかっていない。本研究では、最近提案された速い抵抗性磁気リコネクション [Loureiro et al., 2007] に基づく、新しいフラックスロープの生成モデルを提案する。最近提案された速い抵抗性リコネクションは、非常に横に長い Sweet-Parker タイプの電流シートの中で起こる。その成長率はルンキスト数の 4 分の 1 乗に比例し、ルンキスト数が 10 の 4 乗より大きいときに、横長の電流シートは不安定となる。MHD シミュレーションの結果 [Samtaney et al., 2009] によれば、電流シート内の多数の点でリコネクションが起きたのちに、鎖状にたくさんのプラズモイドが形成される。このような鎖状の構造はフラックスロープに似ている。金星の昼側の下部電離圏においても、速い抵抗性リコネクションが起こる非常に横に長い電流シートが形成される可能性が考えられる。そこで我々は、金星の昼側電離圏において、横に長い電流シートの形成によって生じる速い抵抗性リコネクションを介したフラックスロープ生成のモデルを考察し、その適用可能性を検討した。我々が今回提案するモデルの概要は次の通りである。まず太陽風の動圧が高い状態を考えると、太陽風が運んでくる惑星空間磁場が下部電離圏まで入り込む。次に惑星空間磁場の向きが変化し、反平行に並んだ磁場が入り込めば、金星の昼側の電離圏で、横長の電流シートが形成される。形成された電流シートの中で、速い抵抗性リコネクションが起きることにより、フラックスロープが生み出される。

我々はこのモデルの適用の可能性を検討するために、まず先行研究の金星超高層大気の高ブリッドシミュレーションの結果 [Terada et al., 2002] を用いて、金星電離圏におけるルンキスト数、速い抵抗性リコネクションの成長率、Sweet-Parker タイプの電流シートの厚み、それぞれの高度分布を求めた。得られた高度分布から、ルンキスト数に関して典型的な大きさを持つ高度をいくつか抜き出した。そして、抜き出したそれぞれの高度で、以下の 2 つの条件を満たすときモデルが適用可能と考察した。1 つ目の条件は、速い抵抗性リコネクションが十分速く成長するという時間的な条件であり、2 つ目の条件は電流シートの厚みが観測で得られているフラックスロープのねじれの半径 [Elphic et al., 1983] 以上になるという空間的な条件である。結果によると、およそ高度 170km (ルンキスト数が 10 の 5 乗) から高度 230km (ルンキスト数が 10 の 6 乗) の範囲で我々のモデルは適用可能ということが予測された。発表では、これら適用可能な高度におけるパラメータを用いた MHD シミュレーションの計算結果も紹介する予定である。

キーワード: リコネクション, 電離圏, 金星
Keywords: reconnection, ionosphere, Venus

ガリレオ探査機の観測に基づくガニメデ極域磁気圏のイオン加速の推定 Estimation of the ion acceleration in the Ganymede polar magnetosphere by the Galileo spacecraft observation

渡辺 真矢^{1*}; 加藤 雄人¹; 熊本 篤志¹; 小野 高幸¹; Kurth William S.²; Hospodarsky George²
WATANABE, Shinya^{1*}; KATO, Yuto¹; KUMAMOTO, Atsushi¹; ONO, Takayuki¹; KURTH, William S.²; HOSPO-
DARSKY, George²

¹ 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, ²Department of Physics and Astronomy, University of Iowa Iowa City, Iowa, USA.

¹Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, ²Department of Physics and Astronomy, University of Iowa Iowa City, Iowa, USA.

ガニメデは木星の衛星の一つで、太陽系で唯一固有磁場を持つ衛星として知られている [Gurnett et al., 1996]。また、ガニメデは木星の磁気圏内を公転しているため、木星と共回転する磁気圏プラズマとの間で相互作用が生じ、ガニメデ周辺には磁気圏が形成されている。ガニメデ磁気圏の空間スケールは、木星磁気圏プラズマを構成するイオンのラーマー半径が無視できない程度であることから、特殊なプラズマ環境がガニメデ周辺に実現されていると考えられる。今日、ガニメデの磁気圏やプラズマ環境の研究は行われているものの、磁気圏とプラズマの相互作用やガニメデの磁気圏の様相には未解明の点が多く残されている。

本研究では、ガリレオ探査機の観測結果を用いてガニメデ極域のプラズマ環境を議論する。まず、Plasma Wave Subsystem (PWS) の観測結果から Upper-Hybrid Resonance (UHR) 周波数を同定することで、その場の電子密度を求めた。私達は、先行研究で行われていた軌道 (G01, G02) に加え [Gurnett et al., 1996]、新たな軌道 (G07, G29) での解析も行った。ガニメデ磁気圏で主要なイオン種である一価の酸素原子イオンの数密度がこの電子密度と等しいとし [Vasyliunas and Eviatar, 2000]、ガニメデ表面からの距離が 264 km から 5262 km までの領域におけるイオン密度の高度分布を求めたところ、距離に伴って密度が顕著に減少する傾向が示された。次に、得られた高度分布に基づいて、ガニメデ磁気圏極域からのイオンの流失について考察した。まず、極域電離圏から磁気圏に向かってガニメデ電離圏起原のイオンが流出する過程において、イオン流出の経路上でフラックスが一定であると仮定した。観測された密度分布を冪乗の関数で近似して、断面積が距離の 2 乗に比例するとした場合と 3 乗に比例するとした場合に、フラックスを一定にするために必要な速度を求め、イオン流出速度の高度変化を推定した。その結果、密度は距離 r に対して $r^{-5.98}$ で変化すること、高度 500 km における速度は断面積が距離の 2 乗に比例する場合は 17.3 km/s、3 乗に比例する場合は 14.5 km/s に達すると見積もられることが明らかとなった。過去の研究では Vasyliunas and Eviatar, [2000] が G02 軌道 (高度 264 km~2000 km) の PLS の観測に基づいてイオン流出速度を 18 km/s と示した例がある。本研究の結果は、今までとは異なるアプローチでイオンの流出を指摘するものであると考えられる。本研究ではさらに、その流出プロセスを考察するための計算機シミュレーションを構築中であり、その進捗状況についても報告する。

Keywords: Ganymede, magnetosphere, outflow, acceleration

恒星観測を用いたひさき衛星搭載 EXCEED の機上較正 In-flight calibration of HISAKI/EXCEED by stellar observations

村上 豪^{1*}; 吉岡 和夫¹; 山崎 敦¹; 木村 智樹¹; 土屋 史紀²; 鍵谷 将人²; 吉川 一朗³
MURAKAMI, Go^{1*}; YOSHIOKA, Kazuo¹; YAMAZAKI, Atsushi¹; KIMURA, Tomoki¹; TSUCHIYA, Fuminori²; KAGI-
TANI, Masato²; YOSHIKAWA, Ichiro³

¹宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ²東北大学惑星プラズマ・大気研究センター, ³東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻

¹ISAS/JAXA, ²Tohoku University, ³The University of Tokyo

The extreme ultraviolet (EUV) telescope EXCEED (Extreme Ultraviolet Spectroscope for Exospheric Dynamics) onboard the Japan's small satellite HISAKI (SPRINT-A) will be launched in August 2013. The EXCEED instrument will observe tenuous gases and plasmas around the planets in the solar system (e.g., Mercury, Venus, Mars, Jupiter, and Saturn). One of the primary observation targets is Jupiter, whose magnetospheric plasma dynamics is dominated by planetary rotation. In the EUV range, a number of emission lines originate from plasmas distributed in Jupiter's inner magnetosphere. The EXCEED instrument is designed to have a wavelength range of 52-148 nm with a spectral resolution of 0.3-1.0 nm. The spectrograph slits have a field of view of 400 x 140 arc-seconds (maximum), and the attitude fluctuations are stabilized within 5 arc-seconds. The optics of the instrument consists of a primary mirror with a diameter of 20cm, a laminar type grating, and an EUV detector using microchannel plates (MCPs). The surfaces of the primary mirror and the grating are coated with CVD-SiC.

After the launch of the HISAKI satellite and the initial check out of the instrument for 2 months, we performed in-orbit calibrations of the EXCEED instrument by stellar observations. We observed the standard stars GD71, HZ2, and FEIGE110, and measured the absolute sensitivity and the spatial resolution of the EXCEED instrument. As a result, the absolute sensitivity was $\sim 1\text{-}2\text{ cm}^2$ and the spatial resolution was ~ 16 arc-seconds. In this presentation, we report the overview and initial results of the in-orbit calibration of EXCEED.

キーワード: ひさき, 極端紫外, 惑星分光観測衛星
Keywords: HISAKI, EXCEED, EUV

Hisaki/EXCEED と地上望遠鏡によるイオプラズマトーラスの協調観測 Coordinated observation of Io plasma torus using Hisaki/EXCEED and ground-based telescopes

鍵谷 将人^{1*}; Andrew Steffl²; Badman Sarah³
KAGITANI, Masato^{1*}; ANDREW, Steffl²; BADMAN, Sarah³

¹ 東北大学, ²Southwest Research Institute, ³University of Leicester

¹Tohoku university, ²Southwest Research Institute, ³University of Leicester

EXCEED is an EUV spectrograph onboard an earth-orbiting space telescope, Hisaki (SPRINT-A). One of the primal mission goal of Hisaki/EXCEED is to reveal radial transport of mass and energy in the Jovian magnetosphere. At the beginning of January 2014, intense campaign observations of Jovian aurora and Io plasma torus were made using Hisaki/EXCEED, Hubble Space Telescope and other ground-based telescopes covering wavelength range from EUV through IR. We will present results of spectroscopic observation of Io plasma torus using the R.C. spectrograph attached to Kitt-Peak 4-meter telescope and an Echelle spectrograph attached to Haleakala 40-cm telescope.

The 4-meter R.C. Spectrograph was set up covering 550nm through 800nm which could successfully detect NaD (589nm), SIII 631.2nm, SII 671.6/673.1nm, and OII 731.9/733.0nm as well. A field-of-view was 98 arcseconds along the slit and the slit center was pointed at the dawn or dusk edge of the centrifugal equator. We could get 54 spectra from the observation during January 4th through 10th, 2014.

The Haleakala spectrograph is a high-resolution echelle spectrograph with an integrated field unit (IFU) which enables to capture 2-d distribution of [SII] 671.6/673.1nm emission with spectral resolution of 67000 over a field-of-view of 41" by 61". The 40-cm telescope was observing Io plasma torus all over the night during the observing campaign period.

Based on preliminary analysis of the EUV spectrum from EXCEED/Hisaki, visible spectrum from Kitt-Peak 4-meter and Haleakala 40-cm, emission peaks of SIII and OII was located outward compared to the SII emission peak which is consistent with results from previous studies. More accurate analysis including pointing calibration and flux calibration are ongoing, the result will be presented at the meeting.

キーワード: Hisaki/EXCEED, イオプラズマトーラス

Keywords: Hisaki/EXCEED, Io plasma torus

2014年1月に行われた木星熱圏・放射線帯観測の初期解析結果 Coordinated observation of Jupiter thermosphere and radiation belt in January 2014

北元^{1*}; 三澤 浩昭¹; 土屋 史紀¹; 藤澤 翔太¹; 坂野井 健¹; 笠羽 康正¹
KITA, Hajime^{1*}; MISAWA, Hiroaki¹; TSUCHIYA, Fuminori¹; FUJISAWA, Shota¹; SAKANOI, Takeshi¹; KASABA, Yasumasa¹

¹ 東北大学

¹Tohoku Univ.

In order to evaluate the solar UV/EUV heating effect on the Jovian radiation belt, we made coordinated observations for both temperature of the Jovian thermosphere using an infrared telescope and synchrotron radiation from the radiation belt (JSR) using a radio interferometer. JSR is the most effective probe for the dynamics of the Jovian radiation belt through remote sensing from the Earth. Recent intensive observations for JSR reveal short term variations of JSR with the time scale of days to weeks, but their causalities are not understood well. It is theoretically expected that the Jovian thermosphere is heated by solar UV/EUV radiation, and planetary atmospheric neutral wind is driven by solar UV/EUV heating. Then, induced dynamo electric field is mapped into the radiation belt and induces radial diffusion. From this scenario, the total flux density of JSR is expected to correlate with the solar UV/EUV flux.

Previous studies confirmed that the total flux density of JSR varied corresponding to the solar UV/EUV variations though it is unclear whether the temperature of the Jovian thermosphere actually varied during this event. The purpose of this study is to confirm whether sufficient solar UV/EUV heating occurs on the Jovian thermosphere and it actually causes variations of JSR total flux density. We made coordinated observations of the NASA Infra-Red Telescope Facility (IRTF) and the Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT). From the infrared spectroscopic observations, we measured thermospheric temperature of H_3^+ ion. From the radio interferometer, we measured the total flux density and brightness distribution of JSR.

The IRTF is a 3 m infrared telescope located in Mauna Kea, Hawaii. The IRTF observations were made on Jan 3, 8, and 13 in 2014. We used the high spectral resolution spectrometer, CSHELL, and observed H_3^+ 3.9530 microns emission (Q(1,0)) and 3.4547 microns doublet emission (R(4,3) and R(4,4)). We assumed local thermodynamic equilibrium at the equatorial region and calculated thermospheric temperature from the two emission line ratio. The GMRT is a large radio interferometer located in India. The GMRT observations were made from Dec 31 to Jan 16 with a few days interval. The typical duration of observation time was 2 hours per day, and the observation frequency was 235 and 610 MHz. During this period, the SOHO satellite showed that the solar EUV flux increased from Dec 26, reached at the maximum flux on Jan 8, and then decreased to Jan 16. A preliminary analysis of the IRTF data showed that the temperature increased from Jan 3 to Jan 8, and decreased from Jan 8 to Jan 13. This is the first result that shows the temperature response of Jovian upper atmosphere to the solar UV/EUV heating. We will also introduce analyzed results of the GMRT data and discuss the relationship between Jovian thermosphere and radiation belt.

キーワード: 木星, 熱圏, 放射線帯, 赤外観測, 電波干渉計

Keywords: Jupiter, thermosphere, radiation belt, infrared observation, radio interferometer

LWA1 で観測された木星電波のデータ解析 Data analysis of Jupiter's decametric radio emission observed by LWA1

島内 良章^{1*}; 今井 一雅¹; Clarke Tracy²; Higgins Charles A.³; 今井 雅文⁴
SHIMANOUCI, Yoshiaki^{1*}; IMAI, Kazumasa¹; CLARKE, Tracy²; HIGGINS, Charles A.³; IMAI, Masafumi⁴

¹ 高知工業高等専門学校, ²Naval Research Laboratory, ³Middle Tennessee State University, ⁴ 京都大学
¹Kochi National College of Technology, ²Naval Research Laboratory, ³Middle Tennessee State University, ⁴Kyoto University

木星電波は 1955 年に発見されて以来、多くの観測が行われ研究されてきたが、その電波放射機構は完全に解明されていない。この木星電波を解析するにあたって良く使われる手法として、時間経過による各周波数成分の強度変動を表すダイナミックスペクトラム解析がある。この低周波宇宙電波のダイナミックスペクトラム解析において、世界最高レベルの感度を持つ LWA1 は、ニューメキシコ大学のグループにより建設された低周波宇宙電波の研究を目的とするアレイアンテナである。LWA1 は、256 基のアレイアンテナで構成されており、右回りと左回りの偏波を観測可能とするため、広帯域な 2 系統のアクティブ・ダイポールアンテナで構成され、受信したアナログ信号は超高速サンプリングによりデジタル化されてデータ処理の後、アーカイブされている。

我々は、木星電波の放射機構を解明するために、LWA1 で観測されたデータをデータ解析言語である IDL によって解析を行っている。観測されたダイナミックスペクトラムデータは、天文分野でよく用いられる FITS ファイルでアーカイブされている。我々が作成した IDL のプログラムは、自動的にカレントディレクトリ内の FITS ファイルを探索し、ヘッダの情報を読み取ることができ、自動的に時系列順に並び替えて、配列数・時間軸・周波数軸をヘッダからの情報をもとにダイナミックスペクトラムを生成することができる。また、作成した IDL プログラムにより、任意の時間の周波数や強度を抽出や、時間分解能が大きいデータに関しては拡大処理することも可能で、右回り・左回り偏波成分を独立に抽出することも可能である。

今回解析した木星電波の Io-C 電波源のデータのダイナミックスペクトラムでは、LWA1 の 22MHz から 28MHz の観測周波数帯で、モジュレーションレーンの縞状構造を明瞭に確認することができた。また、右回り偏波と左回り偏波のダイナミックスペクトラム上で、モジュレーションレーンの縞状構造がつながっていることから、同じ磁極側で放射された電波であることが推定された。今後、LWA1 で観測された多くの木星電波のデータの解析をこの手法で行うことにより、木星電波の放射モードを特定する上で極めて重要な情報を得ることができると我々は考えている。

キーワード: 木星電波, デカメートル波, データ解析, 電波源, 電波放射機構, LWA1

Keywords: Jupiter radio, decametric wave, data analysis, radio source, radio emission mechanism, LWA1

木星オーロラ電波の長期変動特性 - II Long Term Variations of Jupiter's Auroral Radio Emissions - II

三澤 浩昭^{1*}; 米田 瑞生²; 森岡 昭¹; 土屋 史紀¹; 水口 岳宏¹
MISAWA, Hiroaki^{1*}; YONEDA, Mizuki²; MORIOKA, Akira¹; TSUCHIYA, Fuminori¹; MIZUGUCHI, Takahiro¹

¹ 東北大学惑星プラズマ・大気研究センター, ² 東北大学惑星プラズマ・大気研究センター / ハワイ大学天文学研究所
¹PPARC, Tohoku Univ., ²PPARC, Tohoku Univ. / IFA, Univ. Hawaii

It is known that Jupiter's auroral radio emission (hereafter JAR) shows long term variations with the time scale of about a decade. The variations were first considered to be initiated by the solar activities in 1960's, however, longer term analyses in 1970's showed the variations relate with the Jovicentric declination of the earth (De). So far, their plausible causalities are considered to be brought by 1) De relating to amount of reachable rays to the earth, and 2) the geocentric declination of Jupiter relating to incidence angle of the radio wave to the terrestrial ionosphere. However, considering solar cycle dependence on the terrestrial auroral radio activity (e.g. Kumamoto et al., 2003), the solar activity control may not be negligible for the long term variations. Furthermore, we have not known well long term relationship between JAR and Jupiter's substorm-like process which may be controlled by Io's volcanic activity.

In order to assess the previously proposed causalities and the other effects, we have investigated occurrence features of JAR using the radio wave data observed outside the terrestrial ionosphere; i.e., by the WIND satellite after 1995. We have derived year-scale occurrence probabilities for 0.7 - 14 MHz around Jupiter's occultation periods, where the frequency range includes both Jupiter's decameter and hectometer radio emissions (so-called DAM and HOM, respectively). As the result, the yearly-scale occurrence probabilities show almost monotonous decrease from 1995 to 2005, then gradual increase after 2005, but change to somewhat complex nature with increase and decrease after 2009. The tendency is roughly similar for DAM and HOM, and also quite roughly similar for Io-related and non-Io-related DAMs. On the other hand, the JAR variation features do not seem to correspond to individual variation of De, solar activity and solar wind, but seem to somewhat correlate with those of Iogenic gas luminosity. These results imply that multiple causalities and/or Jupiter's internal process(es) control the long term variations.

Acknowledgements: We would greatly appreciate M. Kaiser and the WIND/WAVES team for providing the radio wave data.

キーワード: 木星, オーロラ電波, 長期変動, イオ火山活動, イオ起源ガス

Keywords: Jupiter, auroral radio emission, long term variation, Io's volcanic activity, Iogenic gas