

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なされているが、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 (OCP) 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/OCP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/OCP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/OCP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 μm , $\tau_h=0.09, 0.05$ 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・物理量導出の確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 Research 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

¹ Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, ² Institute 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 penetrate 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 Cosmo sciences, 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

¹ISAS/JAXA, ²Rikkyo 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