

あかつき、金星への帰還

Akatsuki returns to Venus

*中村 正人¹*Masato Nakamura¹

1. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

1. Institute of Space and Astronautical Science of Japan Aerospace Exploration Agency

ISAS successfully launched Akatsuki at 06:58:22JST on May 21st 2010, by H-IIA F17. After a half year successful cruise from the earth to Venus, the malfunction happened on the propulsion system during the Venus orbit insertion (VOI) on December 7th, 2010. The engine shut down at 158 sec during the VOI, while we planned 12 min operation. The spacecraft did not enter the Venus orbit but entered an orbit around the Sun with a period of 203 days. The orbital maneuvering engine (OME) was found to be broken and unusable, but most of the fuel still remained. ISAS's engineers decide to use the reaction control system (RSC) for orbital maneuver and three minor maneuvers in November 2011 were successfully done so that Akatsuki would meet Venus in 2015.

The Akatsuki spacecraft was rotating about the sun with a period of 199 days and was on the trajectory to meet Venus on 22nd of November, 2015 after the orbital maneuvers in November 2011. The date, November 22nd, 2015, was chosen as the shortest encounter timing with consideration of spacecraft's lifetime. Trajectory analysis done later revealed that the orbit around Venus after insertion on 22nd of November, 2015 is unstable. We decided to perform another orbital maneuver in July 2015 to let the spacecraft to meet Venus on 7th of December, 2015 with this date the orbit around Venus would be more stable.

On 7th of December, 2015, the spacecraft approached from outside of Venus orbit and captured by Venus. For the Venus orbit insertion in 2015, termed VOI-R1, four 23 Newton-class thrusters were used as opposed to 500 Newton-class OME used at the 1st VOI in 2010. VOI-R1 burn (1228 seconds) was successfully achieved from 23:51:29 on 6th of December through 00:11:57 on 7th of December (UTC, on-board time).

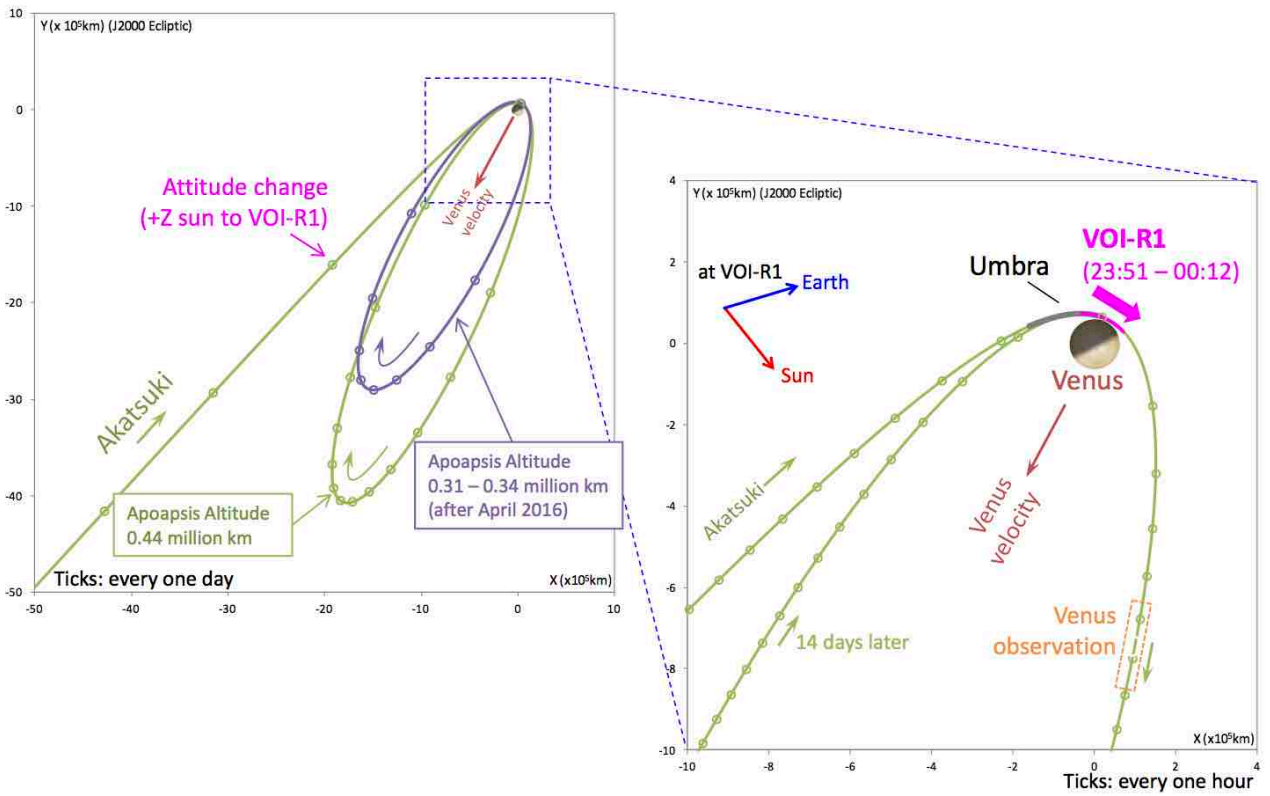
Akatsuki became the first satellite of a planet in Japan. After VOI-R1, the apoapsis altitude is 0.44 million km with the inclination of 3 degrees. The orbital period is 13 days and 14 hours. The figure shows the VOI-R1 geometry depicted with the Venus center coordinate. For two purposes, to decrease the apoapsis altitude and to avoid long eclipse during the orbiter, we performed a trim maneuver at the first periapsis. The apoapsis altitude is now 0.36 million km with periapsis altitude of 1,000 km - 8,000 km (varying) and the period is 10 days and 12 hours.

Akatsuki will send data over two years to us, and it means that our exploration enters the new era when Japan deliver the continuously changing planet's data to the whole world.

キーワード：あかつき、金星、探査

Keywords: Akatsuki, Venus, Exploration

VOI-R1 Geometry (Venus center)



あかつき紫外イメージャ初期報告と感度特性評価

Initial Results and Radiometric Properties of Ultraviolet Imager on AKATSUKI

*山田 学¹、山崎 敦²、今村 剛²、渡部 重十³

*Manabu Yamada¹, Atsushi Yamazaki², Takeshi Imamura², Shigeto Watanabe³

1.千葉工業大学惑星探査研究センター、2.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、3.北海道情報大学

1.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2.Institute of Space and Astronautical Science / Japan Aerospace Exploration Agency, 3.Hokkaido Information University

Introduction:

The beautiful UV images of the Venusian cloud top were previously performed by several spacecraft such as Mariner 10 [Bruce et al., 1974], Pioneer Venus [Travis et al., 1979; Rossow et al., 1980], Galileo [Belton et al., 1991], Venus Express [Markiewicz et al., 2007a, 2007b; Titov et al., 2008]. These previous instruments have taken images at the wavelength around 365-nm, but what material distribution reflects the contrasting density has been unknown yet. Under wavelength of 320nm, SO₂ absorption consistent with Pioneer Venus measurements [Pollack et al., 1979], and images in this wave length can clarify the distribution of SO₂.

The ultraviolet imager (UVI) on the AKATSUKI satellite takes ultraviolet images of the solar radiation scattered at the Venusian cloud top level at the both 283- and 365-nm wavelengths. There are absorption bands of SO₂ and unknown absorber in these wave-length regions. UVI result into measurements of the SO₂ and the unknown absorber distributions, and the sequential images lead to understand the velocity vector of the wind at the cloud top altitude.

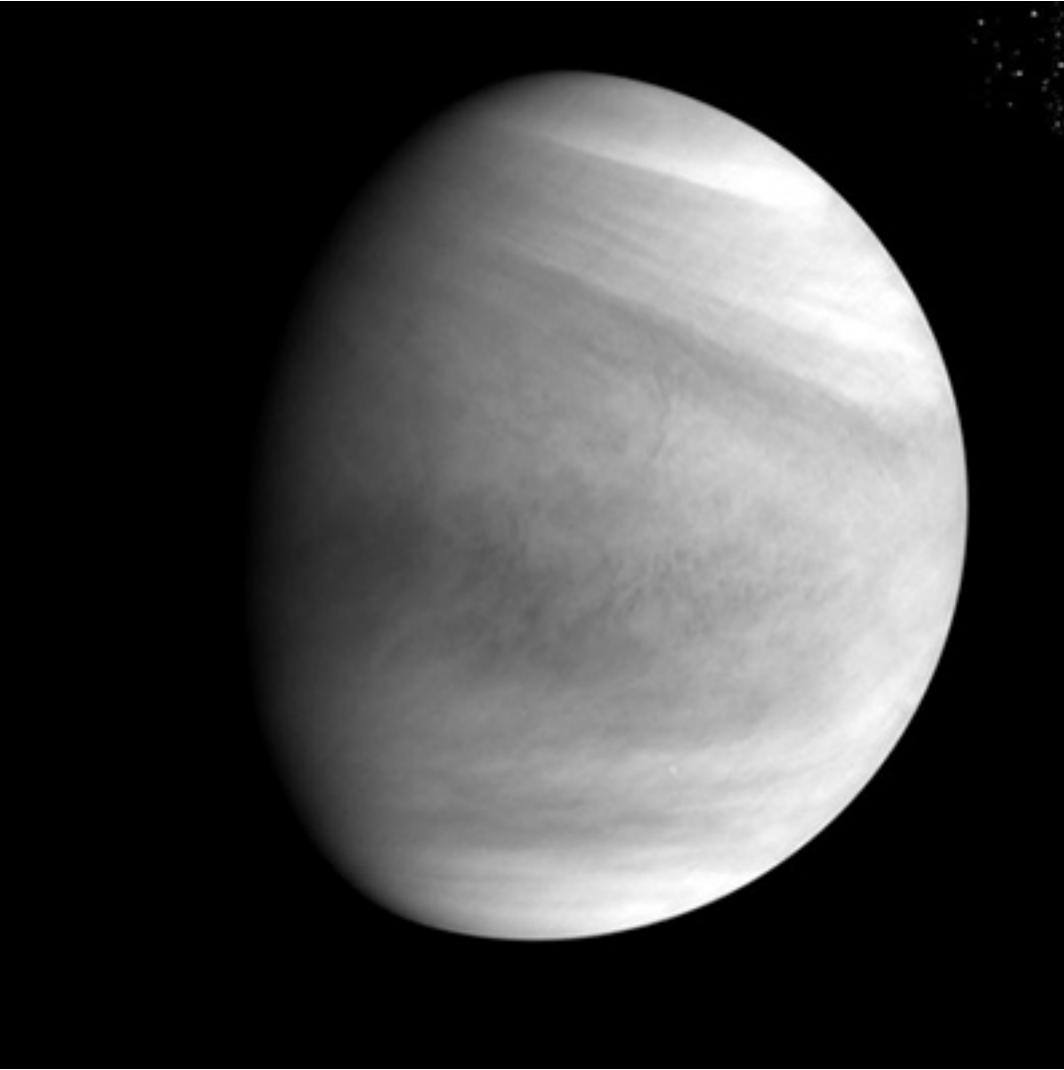
First Image of Venus:

UVI has taken the two UV wavelength images of Venus immediately after the operation of the Venus orbit insertion last year. The first memorial images by the AKATSUKI "satellite" of Venus were taken at the positions of ~72,000 km far from the Venus center. The solar phase angle at the sub-observer point was ~45 degrees with the evening terminator. The UVI image at a wavelength of 283 nm presents solar radiation attenuated by SO₂ absorption near the cloud top altitudes. This is the first time to capture the snapshot of Venus with this wavelength. Together with the 365-nm images, the continuous UVI images will be used to derive horizontal cloud-tracked velocities near the cloud top altitudes (62–70 km) [e.g., Ogohara et al., 2012; Kouyama et al., 2013].

Although UVI had experienced under interplanetary radiation environment for an unexpected long time, the performance of UVI is fortunately very high because CCD is strongly shielded. Estimated radiance from the first image is from 50 to 200 W/m²/sr/μm. It is very reasonable for brightness of the Venusian cloud top. The image quality is very comfortable suite to study scientific objectives before launch. We expect the interesting results from the UVI images of Venus.

キーワード：金星、あかつき、紫外イメージャ

Keywords: Venus, AKATSUKI, Ultraviolet Imager



あかつき搭載中間赤外カメラによる金星雲頂温度観測の初期結果

INITIAL RESULTS OF THE VENUSIAN CLOUD-TOP TEMPERATURE

OBSERVATION BY AKATSUKI/LIR

*田口 真¹、福原 哲哉²、今村 剛³、中村 正人³、鈴木 睦³、佐藤 隆雄³、神山 徹⁴、岩上 直幹⁵、はしもと じょーじ⁶、佐藤 光輝⁷、高木 聖子⁸、上野 宗孝⁹

*Makoto Taguchi¹, Tetsuya Fukuhara², Takeshi Imamura³, Masato Nakamura³, Makoto Suzuki³, Takao M. Sato³, Toru Kouyama⁴, Naomoto Iwagami⁵, George HASHIMOTO⁶, Mitsuteru Sato⁷, Seiko Takagi⁸, Munetaka UENO⁹

1.立教大学、2.情報通信研究開発機構、3.宇宙科学研究所、4.産業技術総合研究所、5.東京大学、6.岡山大学、7.北海道大学、8.東海大学、9.神戸大学

1.Rikkyo University, 2.NICT, 3.ISAS, 4.AIST, 5.University of Tokyo, 6.Okayama University, 7.Hokkaido University, 8.Tokai University, 9.Kobe University

The Longwave Infrared Camera (LIR) onboard Akatsuki took Venus images just after the first challenge in Venus orbit insertion (VOI) in December 2010¹⁾. They showed several interesting features in the brightness temperature distribution at the cloud top, however, quality and quantity of the data were far insufficient for studies in details. Akatsuki was finally thrown into a Venus orbit at the second attempt at VOI (VOI-R1) in December 2015 after the unwilling five year cruise around the Sun. It had been confirmed before VOI-R1 that LIR as well as the other cameras onboard Akatsuki was still very good in health. Observations of Venus were started immediately after the VOI-R1 operation. More than 20 Venus images in thermal infrared have been acquired by LIR so far, and observations are continuing to accumulate Venus images day by day.

This presentation will introduce initial results of observation of Venus by LIR, and also show a perspective in future studies in the atmospheric dynamics using brightness temperature and wind distributions derived from the LIR data.

LIR is a small light-weighted thermal infrared camera using an uncooled micro-bolometer array with 320 x 240 effective pixels as an image sensor, and acquires a snapshot of thermal radiation emitted from the cloud top of Venus in the wavelength region of 8 to 12 μm ²⁾. The FOV of LIR is designed to fit the full Venus disk to it from the distance of 4.8 R_V from the center of Venus. Since Akatsuki is orbiting in a far elongated elliptical orbit compared to the originally planned orbit, LIR can capture the full Venus disk in most of an orbiting period. The pixel field-of-view is 0.05°, which is four times larger than those of UVI, IR1 and IR2.

LIR has an internal image accumulation function to improve noise-equivalent temperature difference (NETD). This function is called as primary accumulation, which is performed during each exposure. Image data are sent to DE, and up to 32 images can be accumulated. This is called as secondary accumulation. In the nominal observation sequences both primary and secondary accumulation numbers are set to be 32 which gives the best NETD according to the pre-launch test results, and an image acquisition sequence takes about two minutes. An image acquisition sequence without accumulation is also equipped to take an image with a very short exposure time of 1/30 sec, and used when the ground speed of spacecraft is large.

In the first orbiting period LIR took 19 images from Dec. 7 to Dec. 11. The shortest time separation between successive images was two hours. This is chosen so that a wind vector field can be properly derived by a cloud-tracking method. From Dec. 12 to Jan. 14 observation was suspended due to important operations on spacecraft which did not allow the observations in parallel. Observation restarted on Jan. 15.

As a matter of course data amount that can be transferred from spacecraft to ground is limited by

bit rate of telecommunication. In the nominal observation plan time interval of image acquisition by LIR is two hours, and it can be shortened to be one hour in a special observation period. In the first shot by LIR after VOI-R1 several amazing features which have never been seen before are identified at a glance. A huge bow-shape high temperature region extending from the northern high-latitudes across the equator to the southern high-latitudes exists around the evening terminator. The temperature in the southern polar region seems to be the highest in the snapshot. Dark filament-like streaks aligned north-south direction are found in the low latitudes. They are also identified in the UV image. Interpretation of these interesting features will be discussed in the presentation.

キーワード：雲形態学

Keywords: cloud morphology

あかつきIR2カメラの初期成果

Initial results of IR2 camera on board Akatsuki

*佐藤 毅彦¹、鈴木 睦¹、笠羽 康正³、上野 宗孝²、はしもと じょーじ⁴、佐藤 隆雄¹、榎本 孝之⁵

*Takehiko Satoh¹, Makoto Suzuki¹, Yasumasa Kasaba³, Munetaka UENO², George HASHIMOTO⁴, Takao M. Sato¹, Takayuki Enomoto⁵

1.宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所、2.神戸大学、3.東北大学、4.岡山大学、5.総合研究大学院大学

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2.Kobe University, 3.Tohoku University, 4.Okayama University, 5.SOKENDAI

探査機あかつきが2015年12月7日に金星周回軌道へ投入され、初期チェックアウトが続いている。IR2カメラは波長2 μ m帯で金星大気の運動や微量気体の分布、雲の性質、生成・維持機構の解明などを旨とする搭載機器である。

検出器は1024x1024画素のPtSi検出素子（17 μ m画素ピッチ）であり、焦点距離84.2mm/F4のレンズ（ニコン）を組み合わせ、12度四方の視野をもつ。PtSi素子の暗電流を低く抑えるために検出器は65K程度、フィルターを含む光学系は190K以下に冷却して熱雑音を抑える。冷却には一段スターリング冷凍機を用い、冷凍機の製造およびカメラ全体の組み立ては住友重機械工業が担当した。

金星観測用には4種類のフィルターを搭載している。波長1.735, 2.26, 2.32 μ mは金星の夜面観測用である。これらはCO₂大気の「窓」と呼ばれる領域で、相対的に大気吸収が弱く下層からの熱放射が漏れ出てくる。それにより雲のシルエットが見え、中下層大気の運動を可視化する。2.32 μ mはCO吸収帯にあたり、2.26 μ mとの差分により雲の影響を取り除き、CO分布とその時間変化を調べる。

波長2.02 μ mは昼面用、CO₂吸収を利用して雲頂の微細な凹凸を調べることができる。

本講演では初期チェックアウト中のデータ解析結果、最新のデータの紹介を行う。

キーワード：金星大気、近赤外線、雲特性、一酸化炭素

Keywords: Venus atmosphere, near-infrared, cloud property, CO

金星探査機「あかつき」による電波掩蔽観測

Radio occultation observation of Venus atmosphere in Akatsuki mission

*今村 剛¹、安藤 紘基¹

*Takeshi Imamura¹, Hiroki Ando¹

1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency

「あかつき」の電波掩蔽観測は気温の高度分布を精度0.1 K、高度分解能1 km程度で観測し、光学観測を補完する。この観測では普段は探査機と地上局の間の通信に用いている電波を利用する。地上局から見て探査機が金星の背後に隠れる時と背後から出てくる時、探査機から送信される電波は金星大気をかすめるように通過して地上局に届く。このとき電波が金星大気の影響で屈折する結果としてDoppler周波数が変化する。これを分析すると大気の屈折率の高度分布がわかり、そこから気温の高度分布がわかる。高度100 km以上の屈折率からは電離層の電子密度も得られる。受信電波強度の変化からは硫酸雲の下に多く存在する電波吸収体である硫酸蒸気の分布がわかる。

電波掩蔽という手法自体は枯れた技術であり、金星でも実績がある。しかし電波掩蔽はラジオゾンデを放球するようなものであり、いつどこでどのように実施するかによって成果は全く異なるものとなる。「あかつき」の探査においては5台の気象カメラで得られる大気の水平構造の情報と組み合わせることにより3次元の気象場の推定を可能にする。また「あかつき」は赤道周回軌道をとるため従来の極軌道の探査機と異なり中・低緯度を重点的に観測することも特色である。

金星大気の変動がもたらす微小な周波数変化を検出するために、基準周波数に対する周波数変動の割合が 10^{-12} 以下という超高安定発振器(Ultra-stable oscillator, USO)を搭載した。これまでの金星探査においてこのような安定度のUSOを搭載したのは欧州の金星周回機Venus Expressだけである。「あかつき」から送信されたGHz帯の電波は臼田宇宙空間観測所のアンテナで受信され、ローカル信号のミキシングにより数百kHzの信号に変換されたのち波形ごと記録される。このデータから周波数や電波強度の時系列を抽出する。

「あかつき」の電波掩蔽では撮像観測との連携が重要である。異なる高度の多様な雲の変動が温度場(安定度)のどのような変化に対応するのか、水平発散場と温度場の対応はどうなっているのか、そのような雲中のダイナミクスとその上の中層大気重力波活動はどう関係するのか。「あかつき」の新たな軌道では軌道周期が10日程度と長く、観測頻度が低いが、撮像観測との有機的な連携により革新的な成果を狙う。

2016年2月、あかつき搭載USOは4年半ぶりに目を覚まし、所定の性能を発揮することが確認された。3月以降によいよ観測が始まる。

キーワード：金星、あかつき、電波掩蔽

Keywords: Venus, Akatsuki, radio occultation

Subaru/COMICSの中間赤外分光データで調べる金星雲頂構造

Cloud top structure of Venus retrieved from Subaru/COMICS mid-infrared spectra

*佐藤 隆雄¹、佐藤 毅彦¹、佐川 英夫²、山崎 敦¹、神山 徹³、今村 剛¹

*Takao M. Sato¹, Takehiko Satoh¹, Hideo Sagawa², Atsushi Yamazaki¹, Toru Kouyama³, Takeshi Imamura¹

1.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、2.京都産業大学、3.産業技術総合研究所

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2.Kyoto Sangyo University, 3.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

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]. Approximately 50% of the solar energy absorbed by Venus is deposited at altitudes higher than 64 km mainly due to unknown UV absorber mixed in the upper clouds [Tomasko et al., 1980]. In addition, infrared radiation from the lower atmosphere is absorbed by the clouds. To elucidate the cloud structure which controls thermal balance of the planet, we analyzed the mid-infrared images obtained by the Cooled Mid-Infrared Camera and Spectrometer (COMICS) mounted on Subaru Telescope [Sato et al., 2014]. We found several important findings near the cloud top altitudes (~70 km), such as the possibility that the westward rotation of the polar features is synchronized between the northern and southern hemispheres, and temporally variable small-amplitude patterns distributed in the entire disk. In order to investigate what atmospheric parameters are responsible for these features seen in the images, we have also analyzed mid-infrared spectra taken on the same date by the same instrument.

A ground-based spectroscopy of Venus was carried out at the solar phase angle of ~90 deg, with the morning terminator in view, using Subaru/COMICS on October 29, 2007 (UT). The entire N-band (8-13 μm) spectra were obtained with a spectral resolving power of $R \sim 250$, which is equivalent to that of the Fourier Spectrometer onboard Venera 15 [Moroz, 1986]. The slit, which was sufficient to capture the northern and southern limbs of Venus (angular diameter ~25 arcsec), was set to be parallel to the central meridian of Venus just off the nightside limb and Venus was scanned toward the dayside limb. The observed thermal radiation in this wavelength range is emitted mainly from altitudes ~65-70 km.

From slit-scan images composed of a total of 78 spectra, polar hot spots and cold collars in both hemispheres are clearly seen and day-night asymmetry is also found, which are consistent with the characteristics of snapshots at 8.66 μm and 11.34 μm taken by imaging observations on the same date [Sato et al., 2014]. The spectra near 9.6 μm are unavailable due to the contamination of O₃ in the Earth's atmosphere even after the careful data reduction. There are two identifiable CO₂ bands (12.1 μm and 12.7 μm). For both bands, the spectral features appear in absorption for the equatorial region and in emission for the southern cold collar. This qualitative characteristic is consistent with our knowledge obtained from Venera 15 [Moroz, 1986]. Such information as well as overall spectral shape is useful to retrieve atmospheric parameters, for example, cloud top temperature, cloud top altitude, and cloud scale height.

To estimate how accurately atmospheric temperature can be retrieved from 8-13 μm spectra, as a first step, we performed a sensitivity test with VIRA-2 temperatures [Zasova et al., 2006]. The pseudo observed spectra were calculated from several combinations of VIRA-2 temperatures and a cloud model [Zasova et al., 2007; Eymet et al., 2009], and an inversion technique [Smith, 1970] was applied to these spectra while changing the initial guess of the temperature profile. As a result, we found that the temperature in altitudes ~65-70 km can be retrieved with the uncertainty of ~2 K. In this presentation, we will show the mid-infrared spectra of Venus obtained by Subaru/COMICS and

primitive results of atmospheric parameters retrieved from the observed spectra.

キーワード：金星、雲層、地上赤外分光、放射伝達

Keywords: Venus, cloud structure, ground-based infrared spectroscopy, radiative transfer

金星雲頂での惑星規模模様の形成と循環周期の地上観測

Ground-based observations of the formation and periodical rotation of the global scale UV-feature on Venus cloud top

*今井 正亮¹、高橋 幸弘¹、渡邊 誠¹、神山 徹²

*Masataka Imai¹, Yukihiro Takahashi¹, Makoto Watanabe¹, Toru Kouyama²

1.北海道大学・大学院理学院・宇宙理学専攻、2.国立研究開発法人産業技術総合研究所人工知能研究センター
1.Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Artificial Intelligence Research Center National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

On Venus, the atmosphere moves rapidly in the westward direction, reaching velocities 60 times the rotation velocity of the solid globe. This atmospheric "super-rotation," was first detected in the 1960s, however, the mechanism of super-rotation remains mysterious. A planetary-scale bright and dark UV feature, known as the "Y-feature," rotates around Venus with a period of 4-5 days and has been long-time interpreted as a planetary wave. When assuming this, its rotation period and spatial structure might help to understand the propagation of the planetary-scale waves and find out their role in the acceleration-deceleration of the zonal wind speed, which is essential for understanding the super-rotation of the planet. The rotation period of the UV feature varied over the course of observation by the Pioneer Venus orbiter (PVO). However, last work issuing this crucial topic was made more than 15 years ago, and, since PVO was operated in nearly fixed inertial space, the periodicity variations on sub-yearly timescales (one Venusian year is ~224 Earth days) were obscured by the limitation of continuous dayside observations.

We newly conducted ground-based Venus imaging observations at 365 nm, which consists of six periods covering over half or one month from mid-August 2013 to the end of June 2014 and one continuous periods from mid-April to end of July 2015. Distributions of the relative brightness were obtained from the equatorial to mid-latitudinal regions in both hemispheres, and from the cyclical variations of these distributions we deduced the rotation periods of the UV features of the cloud tops albedo. The relative brightness exhibited periods of 5.2 and 3.5 days above 90% of significance. The relative intensities of these two significant components also seemed subject to temporal variations.

In 2013 and 2014, although the 3.5-day component persisted throughout the observation periods, its dominance over the longer period varied in a cyclic fashion. The prevailing period seems to change from 5.2 to 3.5 days in about nine months, what is clearly not-coincident with the Venusian year (224 days). The amplitude of relative brightness variation is weak during the transition periods of dominant-wave changing. It was indicated that the stability of the planetary scale UV-feature were observed only in the presence of single longer or shorter periodic waves. In 2015, 3.5-days and 5.2-days wave periods could be observed. We success to obtain the change of the first significant mode from 3.5-day wave to 5.2-day wave continuously. As the former observation results, Venus experienced the absence of dominant-wave mode during the transition periods, and the time scale of the transition is estimated about one month in that period.

キーワード：金星、Y字模様、地上望遠鏡

Keywords: Venus, Y-feature, Ground-based telescope

Venus Express VMCの雲画像解析による金星雲頂の微細構造の研究

Analysis of fine structures of Venusian clouds using VMC on Venus Express

*奈良 佑亮¹、今村 剛²、村上 真也²

*Yusuke Nara¹, Takeshi Imamura², Shin-ya Murakami²

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

1. Department of Earth and planetary Science, University of Tokyo, 2. Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science

金星の雲の紫外線観測では低緯度に、数十から数百kmの空間スケールの不規則な乱流のような模様が観察される(Markiewicz *et al.*, 2007)。従来、輝度の変化が小さく雲の模様の変化が見にくいとされてきた可視波長でも、Venus Expressの観測により低コントラストながら模様が存在することが明らかとなった(Titov *et al.*, 2007)。可視波長領域は雲の吸収物質による影響が少ないため、雲の厚さの水平分布上層雲の水平分布をよく表していると考えられ、さらに太陽放射の大半は可視波長領域にある。そのため雲の反射率の変化が金星大気におよぼす影響を考える上で可視波長を用いた研究は重要である。可視波長での観測により得られる、金星の雲そのものの形態を手がかりに、どのような物理が金星大気に働いているか理解することに意義がある。

本研究では、欧州の金星探査機Venus Expressに搭載されていた撮像装置VMC (Venus Monitoring Camera) により得られた可視画像を用いて金星の雲の低緯度にある微細な構造の抽出を試みた。輝度の微細な空間変化を強調するために空間差分を行う際に、同時に検出器の読み出しに伴う筋状の固定ノイズを取り除くよう工夫することにより、低コントラストの模様までとりだすことができ、雲が背景風に流される様が観察できた。本発表では、可視波長でみた金星の雲の空間構造について議論する。

キーワード：金星、可視画像、雲の形態学

Keywords: Venus, visible image, cloud morphology

電波掩蔽データの電波ホログラフィ解析で明らかになった金星大気温度の微細構造

Detailed temperature structure of the Venusian atmosphere revealed by radio holographic analysis of radio occultation data

宮本 麻由²、*今村 剛¹

mayu miyamoto², *Takeshi Imamura¹

1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、2.東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻

1.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2.Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

電波掩蔽とは探査機が地上局から見て惑星の背後を通過した際に、探査機から送信された電波が惑星大気を通過し地上局に届くことを利用した観測である。惑星大気の高高度方向の温度分布を測定することができ、惑星探査における重要な観測手法のひとつである。電波掩蔽データの解析においては長年、電波を1本の光線として扱う幾何光学解法が用いられている。しかし、この解法では複数経路(マルチパス)の電波が重なり地上で同時に受信されると分離できない。マルチパスは金星では高緯度に見られる温度逆転領域でしばしば生じる。また、この解法では鉛直分解能がフレネルゾーンの大きさ(典型的な探査機と電波の接点の距離を金星半径の2倍、電波の波長3.6cmのとき~1 km)で制限される。

本研究では上記の欠点を補うために新たに提案されている電波ホログラフィ法を用いて金星大気の構造を決定した。この法はマルチパス領域の処理と高分解能で大気構造を得るために提案された手法であり、そのうちのひとつがFull Spectrum Inversion (FSI)で、近年の地球大気におけるGPS掩蔽観測で用いられている。本研究では、このFSIをESA Venus Expressの電波掩蔽データに適用し金星大気の鉛直温度分布を新たに求め、惑星大気観測におけるFSIの有効性を実証した。

FSIにより求めた金星大気の鉛直温度分布はマルチパスを分離し、高鉛直分解能(~150m)を達成した。これにより金星大気の高高度方向の温度構造について新たに次のことを述べた。(1)中高緯度で従来知られていたよりもシャープな温度極小構造が見られ、温度極小の直下が断熱温度勾配になっていること、およびこの中立層(対流層)は従来知られていたよりも高高度まで到達しており、その上の安定層と薄い遷移領域で隣り合っている。これは雲頂付近における放射冷却だけではなく、対流プルームがより高高度まで到達し温度極小の構造を作っていることを示唆している。また対流層がその上の安定層と薄い遷移領域で隣り合っている状況は、対流プルームが安定層をたたき重力波を生成するのに好都合な条件である。さらに、(2)対流層の上の安定層で厚さ数百m程度の薄い中立層が中高緯度で数多く捉えられた。これは重力波の砕波によって生成された乱流の層が捉えられた可能性がある。

キーワード：金星、電波掩蔽、FSI

Keywords: Venus, radio occultation, FSI

雲解像モデルを用いた金星大気重力波の2次元数値実験

Two dimensional numerical experiment of the Venusian gravity waves by using a cloud resolving model

*安藤 紘基¹、杉山 耕一朗¹、小高 正嗣²、中島 健介³、今村 剛¹、林 祥介⁴

*Hiroki Ando¹, Ko-ichiro SUGIYAMA¹, Masatsugu Odaka², Kensuke Nakajima³, Takeshi Imamura¹, Yoshi-Yuki Hayashi⁴

1.宇宙航空研究開発機構、2.北海道大学、3.九州大学、4.神戸大学

1.ISAS/JAXA, 2.Hokkaido University, 3.Kyushu University, 4.Kobe University

大気中の重力波は、その伝播と砕波に伴う熱と運動量の輸送を介して、大気循環に影響を与える。近年、金星大気においても重力波が光学機器や電波掩蔽観測により盛んに観測されている (e.g. Peralta et al. 2008; Ando et al. 2015)。金星大気中を鉛直伝播する重力波の励起源の一つとして、雲層内 (高度50-70 km) に存在すると思われる鉛直対流がある。これまで我々は、金星雲層内の対流運動とそれによる波の励起と伝播を2次元の数値モデルを用いて調べてきた (安藤 他, JPGU 2014)。その結果、再現された重力波は分散関係式を良く満たすが、波の振幅やエネルギー密度がモデルの解像度や数値粘性に強く依存することが分かった。本発表では、モデルの解像度と数値粘性を変えて、それに伴うエネルギースペクトルの形状の変化を調べることにより、鉛直対流起源の重力波の生成と伝播を計算するのに適切な解像度と数値粘性を探索する。さらに、それらの値を用いた場合の重力波のエネルギースペクトル分布、重力波による鉛直方向の運動量フラックス収束に伴う加速率を調べる。

用いた数値モデルは雲解像モデルdeepconv (Sugiyama et al. 2009) である。計算水平領域は500 km、鉛直領域は金星の高度35-135 kmとした。境界条件は上下端にて応力なし、鉛直流・温位フラックスなしとし、側面は周期境界とする。また、上下端からの波の反射を抑えるために、上端から35 kmと下端から5 kmの範囲にレイリー摩擦とニュートン冷却を加えた。また運動の結果として平均流が生成されないように人工的な摩擦を波数0成分に対して加える。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48-54 kmで中立、その上下の領域で安定である。放射過程は陽に計算せずに、水平一様かつ時間変化しない熱強制として与え、正味の加熱・冷却の鉛直分布はIkeda et al. (2010) の計算結果に準ずる。初期に大気は静止しているとし、対流運動を励起するために最大振幅1 Kの温位擾乱を高度50 kmに与え、そこから15日間の計算を行う。モデルの水平解像度は200 mに固定し、鉛直解像度を16, 32, 62 mと変化させ、また数値粘性も 1×10^{-4} , 3×10^{-4} , 1×10^{-3} , 3×10^{-3} , $1 \times 10^{-2} \text{ m s}^{-2}$ と変えた。

その結果、数値粘性 3×10^{-3} 以下、鉛直解像度32 m以下の計算では、スペクトル密度の大きさと水平波数に対する依存性はおおむね一致することが分かった。重力波の鉛直伝播が生じる高度66-98 kmでは、スペクトル密度の振幅は高度と共に減少する。そして、スペクトルの傾きは水平波数領域 $10^{-4} < k < 10^{-3} \text{ (1/m)}$ では -2 に比例し、 $10^{-3} < k \text{ (1/m)}$ の領域では -3 であった。特に、 $10^{-4} < k < 10^{-4} \text{ (1/m)}$ におけるスペクトルの傾きは、地球大気の観測に基づいて提唱された経験的な重力波の水平波数スペクトルの傾きに一致する。また、波の減衰に伴う水平方向の加速率は高度と共に増大し、高度90 kmでおおよそ $1 \text{ m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$ であった。

キーワード：金星、大気重力波、数値計算

Keywords: Venus, Atmospheric gravity waves, Numerical calculation

GCMを用いた金星低・中緯度の雲生成と分布の研究：化学と循環の影響

Study of the Venusian cloud formation and distribution in low- and mid-latitudes using a GCM: Effects of atmospheric chemistry and circulation

伊藤 一成¹、*黒田 剛史¹、笠羽 康正¹、寺田 直樹¹、池田 恒平²、高橋 正明³

Kazunari Ito¹, *Takeshi Kuroda¹, Yasumasa Kasaba¹, Naoki Terada¹, Kohei Ikeda², Masaaki Takahashi³

1.東北大学大学院理学研究科 地球物理学専攻、2.国立環境研究所、3.東京大学大気海洋研究所

1.Department of Geophysics, Tohoku University, 2.National Institute for Environmental Studies,

3.Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

硫酸雲は金星の高度48~70kmを覆い、その放射効果は金星の気候に大きな影響を与える。また硫酸雲はJAXAの金星探査機「あかつき」の主要な観測対象であり、雲観測を通しての大気力学の研究が予定されているため、金星大気大循環モデル(VGCM)を用いた硫酸雲の生成・移流過程の研究はあかつきミッションに対しても資するものとなる。我々はVGCMに硫酸雲生成過程とそれに関連する大気化学過程を導入し、雲の分布および生成に絡む過程の研究を行った。

本研究に用いたVGCM [Ikeda, 2011]はCCSR/NIES/FRCGC AGCMをもとに開発されたもので、水平分解能はT21(緯度・経度のグリッド間隔ともに約5.6°)、鉛直シグマレベル52層で地表面から高度約95kmまでをカバーしている。雲の凝縮・蒸発過程については過飽和の効果は考慮せず、飽和蒸気圧を超えた分の硫酸を雲として取り扱い、雲の半径はHaus and Arnold [2010]で示された4つのモードに、各高度におけるモード別雲量の比に応じて分配し設定している。すなわち現在のところは雲粒の成長過程は導入されておらず、生成された雲の移流のみを考慮している。また放射コードはIkeda [2011]に導入されているものをそのまま用いており、すなわち今回のモデルで得られる雲分布の変化は放射には反映されず、水平一様の雲分布を仮定した放射を与えている。

本研究のモデルには硫酸(H₂SO₄)蒸気の生成・消滅に係る大気化学過程(SO₃, SO₂, H₂Oとの反応を含む)が導入されており、それによって現実的な雲分布の維持機構が再現された。これらの大気化学過程を含むモデル(WCモデル)では、低・中緯度(緯度0~70°)において、雲の光学的厚さの緯度分布はVenus Express搭載のVIRTISによる近赤外分光観測と整合し、また硫酸蒸気の鉛直分布もMagellan電波掩蔽観測と整合していた。一方で大気化学過程を含まないモデル(NCモデル)では、低・中緯度における雲の光学的厚さは観測と比べて半分以下の値となり、また高度48km付近の硫酸蒸気量もWCモデルと比べて半分以下の量となった。WCモデル、NCモデルとも雲は高度50km以上で生成されているが、雲量には大きな違いがあり、WCモデルの方が雲量は多い。この違いはWCモデルでは上部雲領域(高度60~80km)で大気化学過程により硫酸蒸気が生成され、またそれが凝結して雲が生成されていることによる。このことより本研究にて用いるVGCMは、大気化学過程の導入により、低・中緯度における硫酸雲および硫酸蒸気の観測事実を精度よく再現するものになったといえる。

我々はこのVGCMを用いて、硫酸雲と硫酸蒸気分布の維持および循環プロセスの研究を行った。このモデルの結果によると、上部雲領域では高度65km付近を中心に雲が生成され、子午面循環と鉛直拡散によって上方および極方向へと輸送されている。一方で下部雲領域(高度50~60km)では、赤道域の高度50~54kmにおいて移流と鉛直拡散により下方から輸送された硫酸蒸気が凝結して雲になり、それが子午面循環によって極方向へ輸送されている。このような硫酸雲の循環メカニズムは子午面循環を外的に与えたImamura and Hashimoto [1998]による緯度-高度2次元モデルによって示されたものと一致し、VGCMでこれを再現したのは本研究が初めてである。このVGCMはさらに、主に1金星日周期の熱潮汐が東西平均流加速と絡んで低・中緯度の子午面循環を駆動していることを示した。

キーワード：金星、硫酸雲、大気化学、大気大循環モデル、あかつき

Keywords: Venus, Sulfuric acid clouds, Atmospheric chemistry, General circulation model, Akatsuki

金星GCM(AFES)で再現された小規模擾乱の解析

Small-scale disturbances reproduced by AFES for Venus

(Atmospheric general circulation model For the Earth Simulator)

*杉本 憲彦¹、高木 征弘²、安藤 紘基³、櫻村 博基⁴、今村 剛³、松田 佳久⁵、大淵 濟⁴、榎本 剛⁶、高橋 芳幸⁷、林 祥介⁷

*Norihiko Sugimoto¹, Masahiro Takagi², Hiroki Ando³, Hiroki Kashimura⁴, Takeshi Imamura³, Yoshihisa Matsuda⁵, Wataru Ohfuchi⁴, Takeshi Enomoto⁶, Yoshiyuki O. Takahashi⁷, Yoshi-Yuki Hayashi⁷

1.慶應義塾大学 法学部 日吉物理学教室 自然科学研究教育センター、2.京都産業大学、3.宇宙航空研究開発機構、4.海洋研究開発機構、5.東京学芸大学、6.京都大学防災研究所、7.神戸大学大学院理学研究科

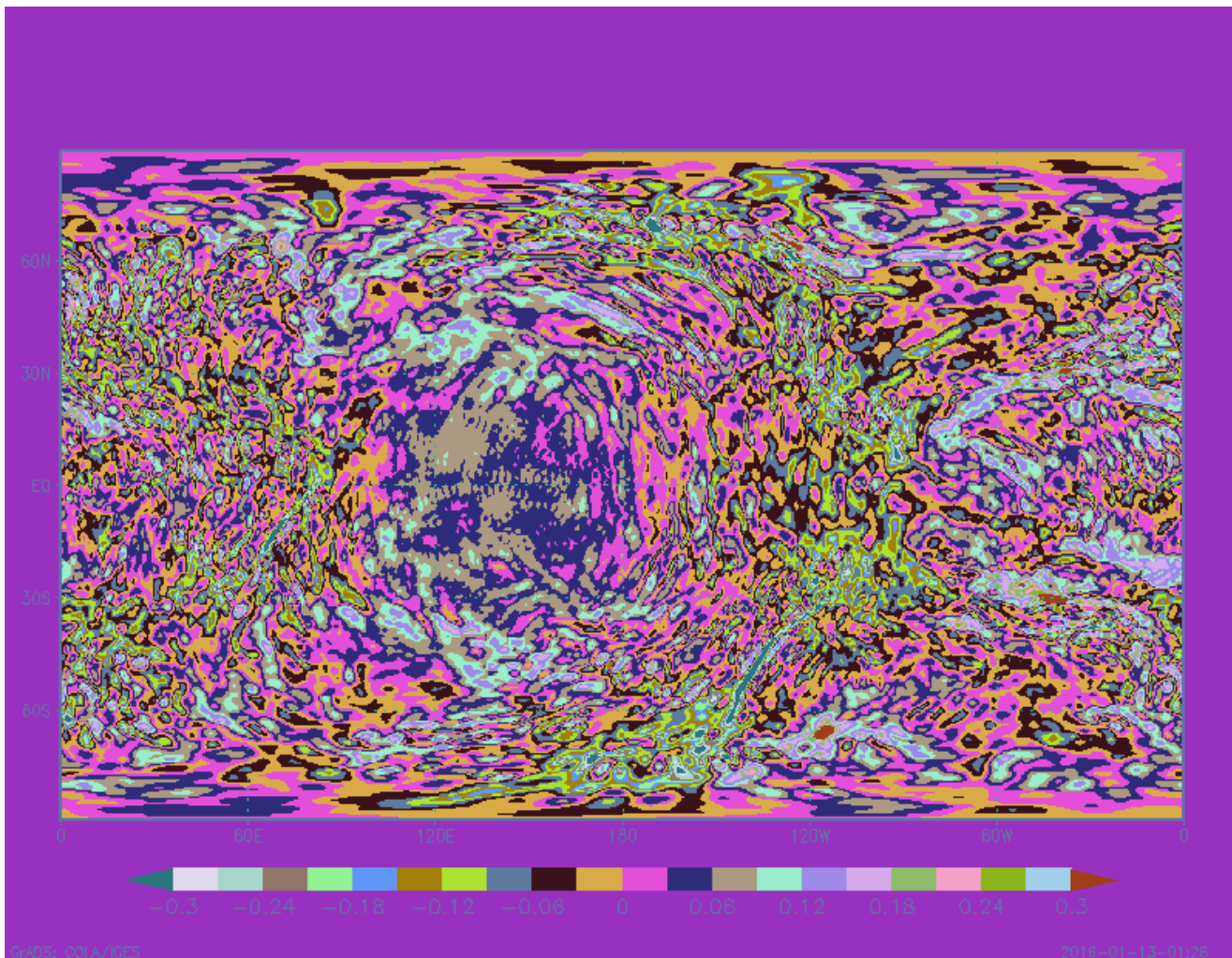
1.Department of Physics, Research and Education Center for Natural Sciences, Keio University, 2.Kyoto Sangyo University, 3.JAXA/ISAS, 4.JAMSTEC, 5.Tokyo Gakugei University, 6.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 7.Graduate School of Science, Kobe University

An atmospheric general circulation model (AGCM) for Venus on the basis of AFES (AGCM For the Earth Simulator) have been developed to perform a very high-resolution simulation (e.g., Sugimoto et al., 2014a). The highest resolution is T319L120, namely, there are 960 times 480 horizontal grids (grid intervals are about 40 km) with 120 vertical layers (layer intervals are about 1 km). In the model, the atmosphere is dry and forced by the solar heating with the diurnal and semi-diurnal change. The infrared radiative process is simplified by the Newtonian cooling. Then the temperature is relaxed to a prescribed horizontally uniform temperature distribution which has a virtual static stability of Venus with almost neutral layers. We set a fast zonal wind in a solid-body rotation as the initial state.

Starting from this idealized superrotation, the model atmosphere reaches a quasi-equilibrium state within 1 Earth year. This state is stably maintained for more than 10 Earth years. The zonal-mean zonal flow with weak midlatitude jets has almost constant velocity of 120 m/s in latitudes between 45°S and 45°N at the cloud top levels, which agrees very well with observations. We have investigated small-scale disturbances reproduced in the model. In the cloud layer, baroclinic waves develop continuously at midlatitudes and generate Rossby-type waves at the cloud top (Sugimoto et al., 2014b). At the polar region, warm polar vortex zonally surrounded by a cold latitude band (cold collar) appears successfully (Ando et al., 2016). As for horizontal kinetic energy spectra, divergent component is broadly ($k > 10$) larger than rotational component compared with that on Earth (Kashimura et al., in preparation). In the presentation, the relation between small-scale gravity waves and large-scale thermal tides will be also shown.

キーワード：金星、大気大循環モデル、波動

Keywords: Venus, GCM, Waves



太陽系地球型惑星大気観測専用ミリ波望遠鏡によるSPARTプロジェクトの現状報告
Status of Millimeter-wave Band Ground-based 10m-SPART Telescope for Monitoring
Observations of the Middle Atmospheres of Terrestrial Planets in the Solar System.

*前澤 裕之¹

*Hiroyuki Maezawa¹

1.大阪府立大学大学院理学系研究科物理科学科

1.Department of Physical Science Osaka Prefecture University

近年、系外惑星の探査研究が活発に展開されている。我々は、中心星が周囲の惑星の中層大気の物理・化学的環境に与える影響を理解するため、まずG型星である太陽の活動が地球型惑星の中層大気に与える影響について理解を深めるべく、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の口径10 mの単一鏡を惑星大気監視専用ミリ波望遠鏡として運用し、太陽系惑星大気監視プロジェクト(SPART: Solar Planetary Atmosphere Research Telescope)を推進している。これまでにSPART望遠鏡は、主として、金星や火星の一酸化炭素 ($^{12}\text{C}O$ $J=1-0$ 230.538 GHz, $J=2-1$ 115.2712018 GHz, $^{13}\text{C}O$ $J=2-1$ 230.3986765 GHz)の回転遷移によるスペクトル線のモニタリングを実施してきた。2011-2015年の観測期間において、金星の高度80 km付近のCO混合比の全球平均は約60 ppmvであった。野辺山宇宙電波観測所の太陽電波偏波計1 GHz帯の電波強度データによると、この観測期間中、太陽はほぼ極大期を維持していた。Cycle-22における過去の先行研究によるCO混合比(高度80 km)と比べて、このCycle-24におけるCO混合比は半減している。このことは近年の太陽活動の低下傾向との関連を示唆している可能性がある。固有磁場を持たない金星や火星に対して、太陽からの高エネルギー粒子の降込みが、COの生成にどのような影響を与えるかを理解するため、ベーテ・ブロッホの解析式を用いた数値モデル計算を実施したところ、COの生成を誘発するCO₂の高エネルギー粒子(protonなど)によるイオン化率はちょうど高度80-90 km付近で極大となったが、その効果は紫外線よりも小さいことも分かった。太陽はこれから極小期を迎えるため、金星のCOが今後減少に転じるのか、観測を継続していく予定である。現在SPART望遠鏡の観測棟は、一般の来訪者が運用の様子を見学できる博物資料館へと改良工事が進められている。この間に、モーターやGM-JT冷凍機のメンテナンス、旧計算機群のLinux化などを平行して実施しており、現在はシャットダウン中であるが、AKATSUKI衛星との連携研究を見据え2016年3月には運用を再開する計画である。本講演では、これらSPARTプロジェクトの一連の取り組みと現状について報告する。

キーワード：金星大気、電波望遠鏡、太陽活動

Keywords: Venusian atmosphere, Radio Telescope, Solar Activity

SMILES-2を用いた火星大気の1.9 THz帯リモートセンシングを見据えた放射輸送シミュレーション
Radiative Transfer Simulations for 1.9 THz Band Remote Sensing Observations of the Martian Atmosphere with SMILES-2

*西田 侑治¹、齊藤 滉介¹、森前 和宣¹、原口 大輝¹、前澤 裕之¹、佐川 英夫²、鈴木 睦^{3,4}、塩谷 雅人⁵

*Yuji Nishida¹, Kosuke Saito¹, Kazunori Morimae¹, Daiki Haraguchi¹, Hiroyuki Maezawa¹, Hideo Sagawa², Makoto Suzuki^{3,4}, Masato Shiotani⁵

1.大阪府立大学、2.京都産業大学、3.宇宙航空研究開発機構、4.宇宙科学研究所、5.京都大学

1.Osaka Prefecture University, 2.Kyoto Sangyo University, 3.JAXA, 4.ISAS, 5.Kyoto University

現在、国際宇宙ステーションJEM/SMILESの後継となるSMILES-2のワーキンググループが立ち上がり、地球の中間圏・下部熱圏のサブミリ・テラヘルツ波帯の衛星観測が提案されている。このミッションでは、地球におけるO₃層回復や温暖化などの予測や重力波/Planetary波などの総括的理解を目指しており、H₂O, N₂O, NO₂, NO, CH₃Cl, CO, H₂CO, OH and O-atomなどの分子種をターゲットとし、400 GHzから2.5 THz帯までをカバーする複数バンドの観測を見据えている(Suzuki et al Proc. of SPIE, 2015)。この受信機には、SIS接合やHEB細線などを実装した、4 Kの冷却による超伝導ヘテロダイン検出素子の搭載なども検討されている。

THz帯は未開拓な波長領域であり、我々は現在、SMILES-2にも搭載可能な、超伝導NbTiN細線を集積した1.8-2.0 THz帯ホーン集光型ホットエレクトロンボロメータ(HEB)ミクサの開発を進めている。太陽系の地球型惑星では、CO₂の安定問題や、最近では火星においてCH₄が観測されており、惑星大気における酸化反応素過程の解明が急務の課題となっている。これには1.8-2.0 THz帯に分布するCOや、地上観測からは不可能であったOHやH₂O, O-atomなどの衛星観測が鍵を握り、系内外の惑星大気科学へと理解を拡張する上でも重要な役割を担う。そこで、本研究では、火星の中層大気の放射輸送モデル計算を実施し、SMILES-2にHEB検出素子を搭載し、火星大気のリモートセンシングを実施した場合の観測スペクトルを検証した。本講演ではこれらの放射輸送計算の結果について報告する。

キーワード：SMILES-2、THz、リモートセンシング、火星

Keywords: SMILES-2, THz, Remote Sensing, Mars

多流体MHDシミュレーションに基づく太陽風磁場進入時の火星電離圏 CO_2^+ 鉛直分布にイオン種間衝突が及ぼす影響の研究

Effects of ion-ion collisions on vertical CO_2^+ profiles in Martian ionosphere under magnetic field penetration: Multi-fluid MHD

*小山 響平¹、関 華奈子²、寺田 直樹³、寺田 香織³

*Kyohei Koyama¹, Kanako Seki², Naoki Terada³, Kaori Terada³

1.名古屋大学大学院理学研究科、2.東京大学大学院理学研究科、3.東北大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Nagoya University, 2.Graduate School of Science, University of Tokyo, 3.Graduate School of Science, Tohoku University

The escape of the planetary atmosphere is an important phenomenon related to evolution of the atmosphere, and numerical simulations are an effective method to understand the global atmospheric escape processes. The escape of CO_2^+ from Mars observed by Mars Express is presumed that the origin of CO_2^+ escape flux is result of the ionospheric outflow. In this process, the escape of massive amounts of CO_2^+ requires relatively high density of CO_2^+ at high altitude ionosphere. Ionospheric model developed by Fox and Hac [2010] presumed chemical reaction and velocity difference for each ion fluxes in ionosphere to reproduce the density disturbance of CO_2^+ in high altitude ionosphere. This result suggests velocity difference is important to reproduce the high CO_2^+ density in high altitude ionosphere. Multi-fluid MHD, it is the model allows ion fluxes to take individual velocities, has developed Najib et al., [JGR, 2011], but the model has not include the effects of the collisions between ions. In our previous research, we developed Multi-fluid MHD and reproduced Martian ionosphere. To investigate effects of collisions, we conducted 5 cases of the simulation. Case1: Multi-fluid MHD includes electron-neutral and ion-ion collisions, Case2: Multi-fluid MHD without electron-neutral collision, Case3: Multi-fluid MHD without ion-ion collisions. Case4: Multi-fluid MHD without electron-neutral and ion-ion collisions. Case5: Multi-fluid MHD. From this previous study, we obtained the effects of velocity differences between ion fluxes and collision for CO_2^+ vertical density distribution. Our recent study is the effect of solar wind magnetic field on Martian ionosphere using under developing Multi-fluid model. Mars has no intrinsic magnetic field. So that, solar wind magnetic field penetrates into Martian ionosphere when the solar wind magnetic field is in active state. When solar wind magnetic field penetrates, Martian ionosphere is contracted, and ion-fluids are accelerated by magnetic field. Our Multi-fluid MHD code can describe individual velocity of ion fluxes, ion-ion collisions, electron-neutral collision, and effects of magnetic field for ion fluxes with different speeds. In this presentation, we report the dependence of ionospheric condition on magnetic field strength and ion velocity in the upper boundary.

キーワード：火星、電離圏、多流体MHD

Keywords: Mars, Ionosphere, Multi-Fluid MHD

火星電離圏界面における昼夜間密度勾配を考慮したケルビン-ヘルムホルツ不安定のMHDシミュレーション

An MHD simulation study of the Kelvin-Helmholtz instability at the Martian ionopause with a day-to-night density gradient

*相澤 紗絵¹、寺田 直樹¹、笠羽 康正¹、八木 学¹、松本 洋介²

*Sae Aizawa¹, Naoki Terada¹, Yasumasa Kasaba¹, Manabu Yagi¹, Yosuke Matsumoto²

1.東北大学大学院理学研究科、2.千葉大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Graduate School of Science, Chiba University

The effect of a day-to-night density gradient on the evolution of the Kelvin-Helmholtz instability (KHI) at the Martian ionopause is investigated using 2-D extended-local MHD simulations. The KHI is expected to play a major role in transporting mass, momentum and energy across the ionopause between the sheath flow and the Martian ionospheric plasmas, and is thus regarded as one of the candidate processes that have removed a huge amount of ions from Mars through its long history. Recent local MHD simulation studies have pointed out that a density gradient in the vertical direction significantly reduces its linear growth rate and its maximum growing wavelength mode becomes longer. A longer wavelength mode makes KH vortices more inhomogeneous during the nonlinear phase [Amerstorfer et al., 2010]. However, the actual ionopause has a density gradient not only in vertical but also in the horizontal (day-to-night) direction. In order to investigate the effects of a day-to-night density gradient, we have developed two extended-local MHD models by incorporating two elements of a global model, i.e., an aperiodic boundary condition and the day-to-night density gradient, into a local model.

Comparing the results of the aperiodic case (extended-local model without a day-to-night density gradient) with those of the periodic case (local model), we find two notable differences in the evolution of the KHI. Firstly, while the evolution of the main vortices group is mostly the same in both cases, that of the leading vortex is quite different [YK1]. [AS2] The main vortices group rises and its intrusion into two regions is symmetrical with the ionopause but the leading vortex does not enter the sheath region in the linear growth phase. On the other hand, the leading vortex seems to be squeezed by the sheath region while the main vortices group does not show such a squeezing like structure. Secondly, the ionospheric plasma in the aperiodic case is excavated about 1.5 times deeper. We find that these two differences are caused by the asymmetry in the structure of both sides of each vortex. When there is another vortex with a larger amplitude just downstream of a vortex, this structure behaves like a wall, the sheath flow will be stagnated by this wall-like structure. This stagnated sheath flow induces an enhanced vortex return flow, resulting in a deeper excavation of the ionospheric plasma. Previously, it has been thought that the mixing area will spread widely over time. The deeper excavation of the leading vortex enhances mixing of ions. In addition, we also find the elongated filament structure is caused by the asymmetry in the structure of both sides of the vortex. A wall-like structure downstream side which mentioned above and an insufficient vortex motion on the leading (upstream) side of a KH vortex leads to vortex return flow and an imbalance between the pressure gradient force and the centrifugal force associated with the vortex motion. The vortex cannot keep its structure and will be an elongated filament. These asymmetries in the vortex structure are responsible for making two differences between the aperiodic and the periodic cases.

We also add the day-to-night density gradient to the aperiodic case by reference to MEX observation results [Duru et al., 2008]. We find that the KHI is quickly excited in the downstream (low density) region. It has been thought that the KH wave propagates from upstream to downstream, i.e.,

one-way propagation. This excitation in the downstream indicates that the perturbations associated with the KH wave propagate not only to the downstream but also toward the opposite direction, with highly elongated filamentary structures in downstream.

In those simulations, we evaluate the effect of the day-to-night density gradient on the loss rate of the ionospheric ions. We find that the day-to-night density gradient reduces the ions loss efficiency with 30-40%.

キーワード：火星、ケルビン-ヘルムホルツ不安定、MHD シミュレーション

Keywords: Mars, Kelvin-Helmholtz instability, MHD simulation

火星探査機MAVENの観測データを使用したMagnetic Pileup BoundaryとIon Composition Boundaryの比較

Comparison of Martian Magnetic Pileup Boundary with Ion Composition Boundary Observed by MAVEN

*松永 和成^{1,2}、関 華奈子³、Brain David A.^{4,5}、原 拓也^{6,7}、益永 圭³、McFadden James P.^{6,7}、Halekas Jasper S.⁸、Mitchell David L.^{6,7}、Mazelle Christian^{9,10}、Connerney Jack E. P.¹¹、Jakosky Bruce M.^{4,5}
 *Kazunari Matsunaga^{1,2}、Kanakano Seki³、David A. Brain^{4,5}、Takuya Hara^{6,7}、Kei Masunaga³、James P. McFadden^{6,7}、Jasper S. Halekas⁸、David L. Mitchell^{6,7}、Christian Mazelle^{9,10}、Jack E. P. Connerney¹¹、Bruce M. Jakosky^{4,5}

1.名古屋大学大学院理学研究科、2.宇宙地球環境研究所、3.東京大学院理学研究科、4.Laboratory for Atmospheric and Space Physics (LASP)、5.University of Colorado at Boulder、6.Space Sciences Laboratory (SSL)、7.University of California, Berkeley、8.University of Iowa、9.IRAP CNRS、10.University Paul Sabatier, Toulouse、11.NASA Goddard Space Flight Center

1.Graduate School of Science, Nagoya University, 2.Institute for Space-Earth Environmental Research (ISEE), 3.Graduate School of Science, University of Tokyo, 4.Laboratory for Atmospheric and Space Physics (LASP), 5.University of Colorado at Boulder, 6.Space Sciences Laboratory (SSL), 7.University of California, Berkeley, 8.University of Iowa, 9.IRAP CNRS, 10.University Paul Sabatier, Toulouse, 11.NASA Goddard Space Flight Center

The Martian upper atmosphere directly interacts with the solar wind, since Mars does not possess the intrinsic global magnetic field. This interaction forms a transition region between the shocked solar wind (magnetosheath) and the ionosphere, in which characteristic boundary structures are embedded. In this transition region, the neutral atmospheric heavy atoms can be ionized and involved into the solar wind flow. This is called the mass loading process [e.g., Dubinin and Lundin, 1995]. The loaded heavy ions form a dense layer which called "ion composition boundary" (ICB). ICB separates the solar wind protons dominant region from the planetary heavy ions dominant one [e.g., Erkaev et al., 2007]. Since the interplanetary magnetic field (IMF) frozen-in the solar wind plasma, IMF also drape around the transition region. Due to the draping IMF piles up in the front of the Martian upper atmosphere, the magnetic pileup boundary (MPB) is formed [e.g., Luhmann et al., 2004].

Previous studies have shown existence of the magnetic pileup region or the induced magnetosphere in the transition region. Mars Global Surveyor (MGS) observed MPB, a boundary between the magnetosheath and the Martian magnetic pileup region by its magnetometer and electron reflectometer [e.g., Vignes et al., 2000, Trotignon et al., 2006]. ICB was also observed by the ion mass analyzer of Phobos 2 and Mars Express (MEX) [e.g., Breus et al., 1991, Dubinin et al., 2006]. Due to the lack of continuous simultaneous observations of the magnetic field and ion composition, however, relations between MPB and ICB are far from understood. In this study, we investigate relative locations and characteristics of MPB and ICB, and their dependence on solar wind parameters, utilizing a full package of plasma instruments onboard Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN).

We conducted a statistical analysis of the ion, electron, and magnetic field data obtained by MAVEN from November 2014 to March 2015 in order to investigate relations between MPB and ICB. We identified MPB from the electron and magnetic field data by inspection based on criteria of Trotignon et al. [2006]. We calculated the density ratio between the planetary heavy ions and the solar wind protons to investigate the ion composition around MPB. Results show that there is a north-south asymmetry in locations of MPB and ICB. Observations also indicate that the relative

location of MPB and ICB has deference between dayside and nightside. Moreover, the southern crustal magnetic fields seem to play a role of the north-south asymmetry in locations of MPB and ICB. However, dependences of MPB and ICB on the solar wind dynamic pressure, density, and velocity are not clear. The solar wind induced magnetic field direction also has no clear effects on ICB and MPB locations.

キーワード：火星、誘導磁気圏、Magnetic Pileup Boundary、Ion Composition Boundary、非磁化惑星、MAVEN
Keywords: Mars, Induced magnetosphere, Magnetic Pileup Boundary, Ion Composition Boundary, Unmagnetized planet, MAVEN

火星磁気圏周辺における酸素イオン反射

 O^+ ion beams reflected below the Martian bow shock

*益永 圭¹、関 華奈子¹、Brain David²、Fang Xiaohua²、Dong Yaxue²、Jakosky Bruce²、McFadden James³、Halekas Jasper⁴、Connerney Jack⁵

*Kei Masunaga¹、Kanao Seki¹、David Brain²、Xiaohua Fang²、Yaxue Dong²、Bruce Jakosky²、James McFadden³、Jasper Halekas⁴、Jack Connerney⁵

1.東京大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、2.Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado Boulder, USA、3.Space Science Laboratory, University of California Berkeley, USA、4.Department of Physics and Astronomy, University of Iowa, USA、5.NASA Goddard Space Flight Center, USA

1.Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, Japan, 2.Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado Boulder, USA, 3.Space Science Laboratory, University of California Berkeley, USA, 4.Department of Physics and Astronomy, University of Iowa, USA, 5.NASA Goddard Space Flight Center, USA

We investigate a generation mechanism of O^+ ion beams observed above the Martian bow shock by analyzing ion velocity distribution functions (VDFs) measured by the Superthermal and Thermal Ion Composition (STATIC) instrument on the Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) spacecraft. In the solar wind near Mars, MAVEN often observes energetic O^+ ion beams (~ 10 keV or higher). Accompanied with the O^+ ion beam events, we sometimes observe characteristic ion VDFs in the magnetosheath: a partial ring distribution or a hook-like distribution. The partial ring distribution corresponds to pickup ions with a finite initial velocity (i.e. not newborn pickup ions). Thus the partial ring distribution is most likely to be produced by the reflection of the precipitating O^+ ions below the bow shock. After being injected into the magnetosheath from the solar wind, the precipitating O^+ ions are subject to the significantly enhanced magnetic field in this region, and consequently, a part of precipitating O^+ ions are reflected back to the solar wind, generating O^+ beams in the solar wind. The hook-like distribution contains two ion populations: a mixture of local O^+ pickup ions and O^+ pickup ions precipitating from the solar wind right above the bow shock, and O^+ pickup ions precipitating from the upstream solar wind and being reflected below the bow shock. The latter population also generates the O^+ ion beams in the solar wind. The reflected O^+ beams are reaccelerated by the convection electric field in the solar wind and may escape Mars.

キーワード：火星、イオン反射、MAVEN

Keywords: Mars, ion reflection, MAVEN

水星磁気圏の大規模構造：太陽風依存性

Global structure of Mercury's magnetosphere : Dependence on solar wind parameters

*八木 学¹、関 華奈子²、松本 洋介³、Delcourt Dominique⁴、Leblanc Francois⁴*Manabu Yagi¹, Kanako Seki², Yosuke Matsumoto³, Dominique Delcourt⁴, Francois Leblanc⁴

1.東北大学大学院理学研究科、2.東京大学大学院理学系研究科、3.千葉大学大学院理学研究科、4.フランス国立科学研究センター

1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Graduate School of Science, Tokyo University, 3.Graduate School of Science, Chiba University, 4.CNRS

Based on observations by MESSENGER, Mercury's magnetosphere is thought to be a miniature of the Earth's magnetosphere. These two magnetospheres have several characteristics in common, however, 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 magnetosphere is relatively small compared to the large Larmor radii. Recent observation by MESSENGER also found that the center of dipole is shifted to northward about 485km from the center of Mercury. 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. Therefore, 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 magnetosphere. In this study, first we performed two cases of simulation, low and high solar wind density cases (35cm^{-3} , 70cm^{-3} , and 140cm^{-3}) with velocity for 400km/s and northward IMF condition. When solar wind density is low, magnetopause is formed at $1.4R_M$, and the global structure has weak north-south asymmetry in the MHD simulation. One of the important characteristics is open field line from south pole even in the northward IMF condition without B_x and B_y components. When solar wind dynamic pressure is high, Mercury's magnetosphere is compressed to the scale of Mercury itself. In this case, planetary surface disturbs the magnetospheric convection, and the north-south symmetry as well as similarity to Earth's magnetosphere are strongly violated. Trajectory tracings in the MHD fields show that there are enough space for energetic (\sim few keV) sodium ions which are the main component of 'sodium ring' at the vicinity of the planet to go through the dayside magnetosphere in the low density case. In the high density case, dayside is too compressed and there are no space for sodium ions to go through. As a result, 'sodium ring' became not isotropic ring but formed only at nightside. In the next step, we performed higher dynamic pressure of the solar wind condition, it is, density for 140cm^{-3} and velocity for 800km/s. This parameter is rarely occurred except for the extreme case such as CME events. The result of MHD simulation shows that most of magnetic field lines are opened, and continuous tail reconnection occurred by extremely high dynamic pressure. These structure and phenomenon partly correspond to that of magnetosphere with southward IMF, while magnetospheric convections are largely different because no magnetic reconnection occurs at the dayside magnetosphere. Another characteristics is secondary compression region in the magnetosheath at flank side of the planet. First compression is occurred by planetary surface at the front side and formed what we call bow shock. Second compression is caused by magnetopause at the flank side which lies at the direction of sheath flow. In the presentation, we will also report the ongoing simulation result of trajectory tracings in this extreme case.

キーワード：水星磁気圏、磁気流体

Keywords: Mercury's magnetosphere, MHD

地上望遠鏡とHisaki/EXCEEDとによるイオプラズマトーラスのイオン組成の計測

Ionic composition in the Io plasma torus measured using Hisaki/EXCEED and ground-based telescope

*鍵谷 将人¹

*Masato Kagitani¹

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

1.Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University

Volcanic gases (mainly composed of SO₂, SO and S) originated from jovian satellite Io are ionized by interaction with magnetosphere plasma and then form a donut-shaped region called the plasma torus. Ion composition in the plasma torus is a key issue to investigate a source region and production mechanisms of magnetospheric plasma. A coordinated observation of EUV spectroscopy by Hisaki/EXCEED with a ground-based spectroscopy by Kitt Peak 4-m telescope enables to measure composition of most of ions (S⁺, S⁺⁺, S⁺⁺⁺, O⁺ and O⁺⁺) in the plasma torus.

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. The 4-meter R.C. Spectrograph was set up covering 550nm through 800nm which could successfully detect NaD (589nm), [S III] 631.2nm, [S II] 671.6/673.1nm, and [O II] 731.9/733.0nm as well. A field-of-view was 98 arc-seconds 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.

Based on analysis of visible spectrum from Kitt-Peak 4-meter, typical emission intensity of [S II] 671.6+673.1nm, [S III] 631.2nm and [O II] 731.9+733.0nm were 700R, 100R and 60R, respectively. Combining the visible spectrum with EUV spectrum measured by EXCEED/Hisaki, plasma diagnostics can be made on the plasma torus. According to the atomic database, CHIANTI version 8.0, the best fit ion composition was S⁺:S⁺⁺:S⁺⁺⁺:O⁺:O⁺⁺ = 4:27:11:13:40. The result shows that the average ionization state was higher than that at Cassini era in 2004. More accurate analysis including errors and uncertainty is ongoing, the recent result will be presented at the meeting.

キーワード：イオプラズマトーラス

Keywords: Io plasma torus

木星ナトリウム雲に観測されるイオの火山活動変動

Variations of Io's volcanism seen in Jupiter's sodium nebula

*米田 瑞生^{1,2}、鍵谷 将人²、坂野井 健²、土屋 史紀²、岡野 章一²

*Mizuki Yoneda^{1,2}, Masato Kagitani², Takeshi Sakanoi², Fuminori Tsuchiya², Shoichi Okano²

1.キーペンハウアー太陽物理学研究所、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
1.Kiepenheuer Institute for Solar Physics, 2.Planetary Plasma and Atmospheric Research Center,
Tohoku University

木星の衛星、イオは太陽系で最も活発な火山活動を有する。この火山から生じるガスがイオの大気を構成するが、この大気は太陽光や木星磁気圏高エネルギー粒子などにより、電離・プラズマ化する。火山性プラズマは、木星の共回転する磁場にピックアップされ、木星内部磁気圏へと流出し、イオ・プラズマ・トーラスという環状の構造を形成する。トーラスプラズマには、同じくイオの火山を起源とした、 NaCl^+ 分子イオンが含まれている。この分子イオンが、電子と衝突し、解離することで共回転速度(74km/s)を達成している高速中性ナトリウム原子が生成される。これら高速ナトリウム原子は、木星の磁気圏・重力圏を超えて分布し、木星ナトリウム雲と呼ばれる巨大構造を形成している。木星ナトリウム雲は、太陽光を共鳴産卵することで、ナトリウムD線の波長で発光していて、地上から観測することができる。また、木星ナトリウム雲の発光強度はイオの火山活動に応じて変化していることが知られている。木星磁気圏プラズマの供給源でもあるイオの火山活動を監視することは、木星磁気圏の研究にも貢献する。木星磁気圏を主観測ターゲットとしている、ひさき衛星の観測期間も含め、我々は木星ナトリウム雲の観測を行ってきた。特に、2015年前半にはイオでの火山性爆発の検出に成功している。本発表では、この数年のイオ火山活動の状況の詳細を報告する。

キーワード：イオ、木星、火山、磁気圏

Keywords: Io, Jupiter, Volcanism, magnetosphere

木星極域ヘイズの外縁部波構造及び非対称分布

The wave structure in Jupiter's polar region and the asymmetric distribution of the polar cup haze

*合田 雄哉¹、高橋 幸弘¹、渡辺 誠¹

*Yuya Gouda¹, Yukihiro Takahashi¹, Makoto Watanabe¹

1.北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

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

In the Jupiter stratosphere, the polar cup hazes exist in the both hemispheres whose edges show the wave structure. Previous observations, such as by Cassini ISS in 2000 or the Hubble Space Telescope (HST) from 1994 to 1999 [Barrado-Izagirre *et al.*, 2008], show that the polar region is covered by bright diffuse haze and its edge has a wavy structure spreading in longitudinal direction with wavenumber of 12 -14 at 67° S, which travels westward with a phase velocity of 0- 10 m/s. These observations suggested that this wave structure is caused by a planetary Rossby wave. However, these observations had been carried out only every other year and the variance of short time scale (about month) is not clear. The spatial range of this wave structure have not been investigated. The aim of this study is to clear dynamics of the wave structure which vary within few days or few weeks. This is achieved by the continual observation using a methane absorption band filter at 889 nm installed at Multi-Spectral Imager (MSI) of the 1.6 m Pirka telescope. To investigate spatial structure of this wave, we measure the boundary of the low-latitude side of the wave. We also clear the vertical structure in polar region using observation at wavelengths that absorption by methane are different. In addition, identify of distribution of the haze structure is also purpose of this study.

In this presentation, we introduce the observational results of time variation of the wave structure in Jupiter's south polar region in 2011 to 2015 by the ground-based telescope. Each result is separated by few days to few weeks. Our results show the variation of the wave structure within few weeks for the first time. It is found that disappearance of wavy positive peak at longitude 100° in 18 days by the time variation of the wave structure. The wave structure change locally in a short period. The longitudinal difference of the vertical wave propagation is found by observation at some wavelength that observational altitude are different. It is possible that which is different from Rossby wave. It was suggested that not only Rossby wave but also locally and short-period wave structure exist in the polar region. It is cleared that the wave structure at 67° S is only seen at 56° S by the latitudinal variation of the wave structure. Thus, the spatial distribution of the wave structure is constrained.

In addition, the spatial distribution of polar cup haze in the north hemisphere is asymmetry for the north pole. This corresponds with a sharp of auroral oval at some longitude. It is suggested the relationship haze structure and auroral oval.

キーワード：ヘイズ、波構造

Keywords: haze, wave structure

LWA1モジュレーションレーンデータによる木星デカメートル波電波源の位置測定について
Measurements of Jupiter's decametric source locations by LWA1 modulation lane data

*今井 一雅¹、今井 雅文²、Higgins Charles³、Clarke Tracy⁴

*Kazumasa Imai¹, Masafumi Imai², Charles A. Higgins³, Tracy Clarke⁴

1.高知工業高等専門学校、2.京都大学、3.Middle Tennessee State University、4.Naval Research Laboratory

1.Kochi National College of Technology, 2.Kyoto University, 3.Middle Tennessee State University, 4.Naval Research Laboratory

Jupiter's decametric emissions originate along magnetic field lines within auroral zones as well as field lines that pass through Io and the Io plasma torus. The radio waves at Jupiter are amplified by particle-field interactions and are generated in both the X-mode and O-mode. Due to the emission source parameters, right-hand (RH) polarized waves are generated from northern hemisphere sources (Io-A and Io-B sources) while left-hand (LH) polarized waves come from the southern hemisphere (Io-C and Io-D sources).

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 spectra. Extensive systematic observations of modulation lanes have been made in the frequency range 21 to 23 MHz by Riihimaa [1970, 1974, 1978]. The frequency-time slopes of the lanes can be either positive or negative, depending on which of the Jovian sources is being observed. In the Imai et al. model for the production of modulation lanes, the lanes are assumed to be a manifestation of interference fringes from the line source consisting of the points along the axis of the Io-activated flux tube that are emitting at the different local values of f_c . The fringes are produced as a result of the passage of the multi-frequency radiation through an interference grating. This grating is a planar grid of almost equally spaced field-aligned columns of enhanced plasma density, perpendicular to the ray-paths toward Earth, located near the sub-Earth point on Io's orbit. Radiation from each of the frequencies emitted by the line source produces a set of interference fringes when it is scattered by the plasma-enhanced columns. These sets of fringes are inclined with respect to the Jovian equator. The rotation of Jupiter sweeps the inclined interference patterns for the different frequencies across Earth, producing the modulation lanes in the observed dynamic spectra. We developed a model to explain the production of the modulation lanes [Imai et al., 1992a, 1992b, 1997, 2001, 2002]. By using our model the precise Jupiter's radio source locations and beam parameters can be measured. This new remote sensing tool is called as the modulation lane method.

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. The sensitivity of the LWA1 combined with the low radio frequency interference environment allow us to observe the fine structure of Jupiter's decametric modulation lanes. Using newly available wide band modulation lane data observed by LWA1, we measured source locations and beam parameters. The results of LWA1 data analysis indicate that the radio emitting sources are located along the restricted range of longitude. We only receive one of the individual sources which has a very thin beam thickness (probably less than few degrees) at a given time. We show the measured locations of Io-related sources based on the modulation lanes observed by LWA1. The new components of Io-C and Io-B sources are discussed.

キーワード：木星電波、モジュレーションレーン、電波源の位置

Keywords: Jupiter radio, modulation lane, radio source locations

これがVenus Express/ESAが捉えたスーパーローテーションのエンジン～南極の渦の変化にも(当然)理由があった～

Elucidation, this is the engine of Super-Rotation caught by Venus Express/ESA

*間瀬 博文¹

*Hirofumi Mase¹

1.なし

1.none

高温体-低温体-高温体の並びの時に限り高温体同士が引き寄せあう(一見、高温体が低温体に引かれる)(1)他。2温度回転円盤(回転円盤)と呼ぶこの仮説はロウソク振動子(スケールが小さすぎ恐縮だが)で一周期ごと簡単に観察可能であることが判明している(2)。

金星大気のスーパーローテーション(SR)の仕組みについて回転円盤を用い過去に一度だけ説明した(3)が今回はVenus Express(VEX)/ESAが獲得した知見にも矛盾がない説明をしたい。全ての引用元に感謝申し上げる。(図面を参照のこと)

南極中心半径約2000km高度65km付近の渦の連続画像(10日間(2007/5/13-23)2時間おき121枚)(Fig.01~13)及び関連記事(4)を見れば確認できる事項(a~e)を列挙する。a.渦及び周辺(領域)が全体的に左回転(みそすり回転、14度/2h)をすることが一般である。b.2日に一度領域全体の横滑り或いは過度の回転或いは両方によって短時間(4h)に大移動(最大2000km)している(Fig.01,04,07,10,13)。c.大移動は全て領域内の特定の位置を掴まれて駆動された様な動きで150° Wを中心とした方向へ向かっている。d.巨大な渦が大きさ形をほぼ維持したまま濃淡を変化させ発生・消失しているが渦ごとの形は多彩である。e.大移動で渦の重心は回転中心から大きく外れ、一致した状態の新渦が発生し、先のものとの交代して次の大移動を迎えている。4回目の大移動後のみ"失敗作"を含め新渦が2つ発生し5回目の時に合体した(Fig.11,12,13)。

これらより(f)(g)(h)を得た。(f)a,bの事実は大移動でも領域回転がくずれない構造(恐らくはずみ車とジャイロ)が備わっていることを示す。(g)b,cの事実は領域内の特定の点が領域外の不動に近い点に引き寄せられていることを示す。(h)d,eの事実は領域回転を左右するほどの回転エネルギーを渦がその構造に沿った流れにより保持しており且外力(大移動)により渦の回転が不正になれば渦を替えて順応することを示す。

まず(3)(Fig.14)で要修正点を明確にする。Fig.15は北極の高度/温度変化(5)であるが参考としたい(高度61km以下(w),74~88km(y)では高度上昇/温度下降、高度88km以上(z)では高度上昇/温度上昇、高度61~74km(x)では高度上昇/温度停滞或いは上昇気味)。(3)は(低1)と(高1)で構成する直径2000km程度の回転円盤を想定したがその距離を直線で見通す場合中点付近では高度が80km以上も下がるから温度構造上不合理である。(x)では水平方向に高温低温の共存が期待でき渦は短径が数百km(長径は制限なし)の変形回転円盤と考えられる(直径700kmで高度10km下がり)。次に(3)の(低2)はpolar collar(6)であった。Fig.16(7)の如き形状であれば見通す距離と温度構造の関係で先端部(local timeで夕方)位しか回転円盤になれそうにない。

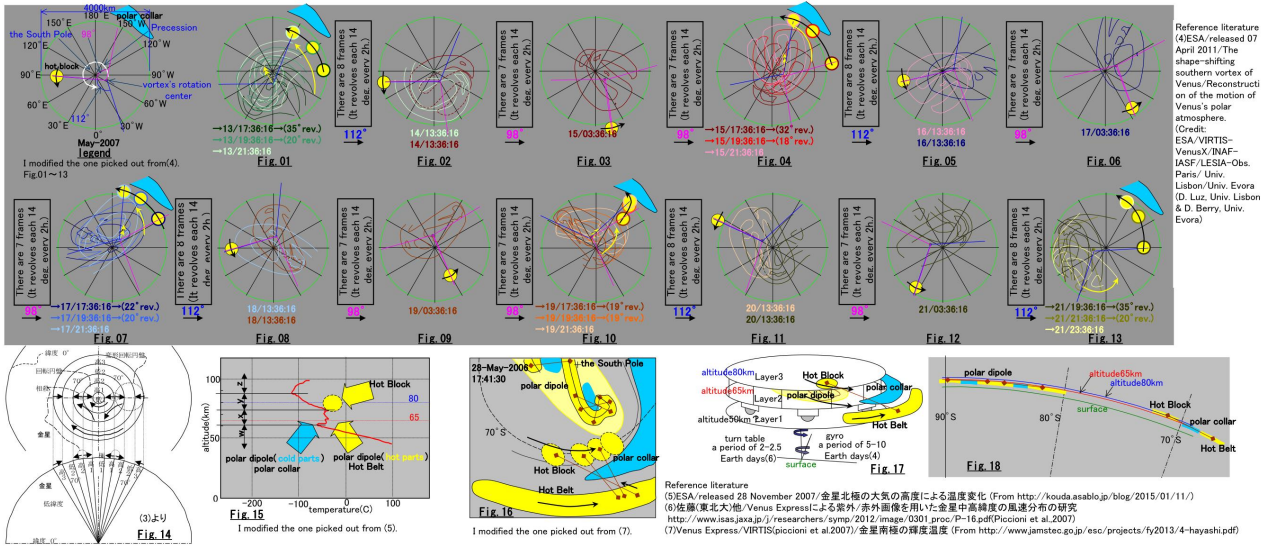
(f)(g)(h)を同時に満たすモデルを構築したい(Fig.17)。高度65kmを中心としたLayer2はcold partsとhot partsが並存し、polar dipole(6)が形成される。この渦は温度構造を利用して自律的に流れを産出し全体的に旋回流となることで回転エネルギーを保持する。これがSRの主要な駆動力(回転円盤1)である。高度80kmを中心としたLayer3はLayer2の上に乗り同じ動きをする。縁近くにHot Blockがありpolar collarの先端に接近したときHot Belt(回転円盤1により回されている)との間で引き合いを起こす(回転円盤2)。このとき回転は一時的に促進されるのでこれもSRの駆動力に相違ない(Hot Beltの一部は極方向に引かれる)。はずみ車・ジャイロの機能を持つ回転台Layer1の上に"キャスト"を介してLayer2,3が載る。駆動力は上から下へ安定性は下から上へ伝達する。

(3)に根本的な誤りはなかった。そしてVEX/ESAの連続画像はSRのエンジンの動きそのものをすでに捉えたものということになる。

(1)間瀬/JpGU2008/E108-P007(2)間瀬/http://homepage3.nifty.com/hmase/upload110120web.pdf(3)間瀬/J-GLOBAL ID:201302212255521162 (4)ESA/released 07 April 2011/The shape-shifting southern vortex of Venus/Reconstruction of the motion of Venus's polar atmosphere.(Credit:

ESA/VIRTIS-VenusX/INAF-IASF/LESIA-Obs. Paris/ Univ. Lisbon/Univ. Evora (D. Luz, Univ. Lisbon & D. Berry, Univ. Evora)

以下図面に記載



あかつき・Venus Express継続観測から明らかにする金星雲構造

A plan to study the Venus' haze based on SOIR/Venus Express and AKATSUKI

*高木 聖子¹、Mahieux Arnaud²、Wilquet Valérie²、Robert Séverine²、Drummond Rachel²、Vandaele Ann Carine²、岩上 直幹³

*Seiko Takagi¹、Arnaud Mahieux²、Valérie Wilquet²、Séverine Robert²、Rachel Drummond²、Ann Carine Vandaele²、Naomoto Iwagami³

1.東海大学情報技術センター、2.Belgian Institute for Space Aeronomy、3.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

1.Tokai University, Research and Information Center, 2.Belgian Institute for Space Aeronomy, 3.Department of Earth and Planetary Science, the University of Tokyo

金星を一様に覆う雲の大局的な振る舞いを高時間・高分解能で捉えることができるのは、周回軌道からの継続観測のみである。過去の金星観測により、主成分濃硫酸の雲層(45-70 km)の上にもや層(70-90 km)が重なる金星雲が確認されている。しかしその知見は観測不足故に断片的であり、金星雲の描像の理解は停滞している。ESA (European Space Agency)の金星探査機Venus Expressは、2006年から8年間にわたり金星大気・雲を極周回軌道から継続観測し、雲の描像理解に大きく貢献した。2015年12月7日にはJAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)の金星探査機あかつきが赤道周回軌道に投入され、今後数年にわたり観測を実施する。これら2衛星の相補的観測により、長年謎のまま残されてきた金星雲の生成・維持メカニズムの解明が期待できる。

Venus Expressに搭載された赤外分光計Solar Occultation at InfraRed (SOIR, 2.3-4.2 μm)は、太陽掩蔽法により高高度(65-165 km)の金星大気・雲を2006年より継続観測した。本研究ではSOIRのデータ解析により、もや層の新たな知見のほか、90 km以上の「上部もや層」の存在やその知見を初めて観測から統計的に明らかにした。もやの混合比が高高度で増加していることから、これまでもや層と認識されてこなかった90 km以上におけるもやの生成が初めて明らかになった。そのメカニズムとして、もやのソースとなる物質が雲層から上方輸送され、高高度で比較的小さなもや粒子が生成される機構を定量的に提案した。以上の知見はこれまで予想されたことのない高高度の実態及び雲層・もや層の関連性であり、長年謎の金星雲の生成・維持メカニズム解明に貢献する成果である。

今後は、複数波長を用いたあかつき観測のデータ解析とVenus Express観測から得られたこれまでの本研究成果を包括することにより、高高度におけるもや層の長期的描像と境界高度における雲の構造・大気運動を明らかにする。2衛星の相補的な継続観測を扱い、雲層から高高度に及ぶ雲全域に働く物理・化学過程の理解を目指す。

本発表では、これまでの研究成果及び今後得られるあかつき観測データを用いた研究計画を報告する。

キーワード：金星、あかつき、Venus Express、雲

Keywords: Venus, AKATSUKI, Venus Express, cloud

近赤外偏光分光観測で探る金星上層雲構造

Near-Infrared spectro-polarimetry of Venusian upper cloud structure

*榎本 孝之¹、佐藤 毅彦²、川端 弘治³、秋田谷 洋³、伊藤 亮介³*Takayuki Enomoto¹, Takehiko Satoh², Koji Kawabata³, Hiroshi Akitaya³, Ryosuke Itoh³

1.総合研究大学院大学、2.宇宙科学研究所、3.広島大学

1.Grad.Univ.Advanced Studies, 2.ISAS, 3.Hiroshima Univ.

惑星大気構造をリモートセンシングにより推定するには、多くのパラメータを一度に決定する必要があり、それは分厚い雲の上に薄いヘイズ層が乗っただけの単純な構造であっても、やはり簡単ではない。雲とヘイズ粒子のサイズが大きく異なる場合には、それらの性質の波長依存性を利用するなどして、両者を独立に近い形で決定できる可能性がある。本講演では、そのような手法の一つを提案し、実際の金星大気に適用した結果を報告する。

具体的な手法として、近赤外線偏光分光観測を用いる。金星の主雲はおよそ1ミクロン、ヘイズはサブミクロンの粒子（Mie散乱で近似できる）から成る。近赤外線領域（ $0.9\mu\text{m} < \lambda < 2.5\mu\text{m}$ ）における利点は

- (1) ヘイズの散乱断面積が急速に小さくなり、主雲の性質が支配的となること
- (2) 主雲によるMie散乱で生じる偏光の符号が変化する点＝中立点が存在し、その検出が容易であること

である。こうした性質を利用し、近赤外線領域のデータから主雲の性質を独立に決定する。

近赤外線領域で半無限雲層モデル（雲粒子は標準サイズ $1.05\mu\text{m}$ ）の放射伝達計算を行った。偏光度は予想通り、波長の増大に伴い負から正へ符号変化した（以降、正負の境目の波長を λ_n とする）。また主雲粒子サイズを $r=0.8\mu\text{m}$ （小）、 $1.05\mu\text{m}$ 、 $1.5\mu\text{m}$ （大）と変化させると、標準サイズは $\lambda_n=1.81\mu\text{m}$ 、小サイズでは $\lambda_n=1.46\mu\text{m}$ 、大サイズでは $\lambda_n=2.28\mu\text{m}$ であった。したがって、 $0.8\mu\text{m} < r < 1.5\mu\text{m}$ の範囲であれば、J、H、Kバンド（中心波長それぞれ $1.25\mu\text{m}$ 、 $1.65\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ ）での偏光分光観測によって λ_n を求め粒子サイズを決定することが可能である。なお温度や硫酸濃度（いずれも屈折率を変える）といった他のパラメータを変えた場合の偏光度も計算したところ、金星の値として考えうる範囲内では影響がないことを確認した。

この手法の妥当性を検証し、かつ近年我々が捉えている極域ヘイズが激減する金星の雲物理特性を調べるための観測を、2015年5月19日から25日にかけて広島大学東広島天文台で行った。観測装置は「かなた」望遠鏡装着の“HONIR”(Hiroshima Optical and Near - Infrared)で、観測波長域はJ、H、Kバンドである。光学系内で生じる機械偏光については無偏光標準星Procyonを観測し、その補正が必要ないことを確認している。なお、その偏光度(P[%])には約0.2%のばらつきがあり、測定誤差としてこの程度の不確定性を持つと考えられる。

得られた金星低緯度の偏光スペクトル $P(\lambda)$ の傾きは $dP/d\lambda \sim 4.5\%/ \mu\text{m}$ 程度である。これと測定誤差 $\pm 0.2\%$ とから、 λ_n の決定精度 $\pm 0.05\mu\text{m}$ が得られる。さらに先述のモデル計算で得た λ_n の r 依存性より $d\lambda_n/dr \sim 1.16$ が求められ、 λ_n の決定精度を鑑みると、粒子サイズの決定精度はJ、H、Kバンドの範囲内の平均で $\pm 0.04\mu\text{m}$ 程度であることがわかった。金星観測から得た λ_n は、5月21日は $\lambda_n=2.1\mu\text{m}$ 、22、24、25日は $\lambda_n=2.2\mu\text{m}$ 程度であった。これらを放射伝達計算と比較すると、21日は $r=1.2\mu\text{m}$ 、22、24、25日は $r=1.35\mu\text{m}$ の計算と整合しており、いずれも標準モデル(Esposito et al., 1983)の $r=1.05\mu\text{m}$ よりも大きい粒子の存在を示唆する結果となった。

2010年4、5月にVenus Express搭載SPICAVによって取得された低緯度の近赤外域($\lambda \sim 1.1\mu\text{m}$ 、 $1.27\mu\text{m}$)偏光データにおいて、主雲の粒子サイズ $r=1.2\mu\text{m}$ が観測と整合する例も報告されており(Rossi et al., 2014)、本研究でもそのような変化をとらえた可能性があると考えられる。

キーワード：金星上層雲、偏光分光観測

Keywords: Venusian Upper Cloud, Spectro-polarimetry

金星雲観測のためのファイバ面分光ユニット開発
Development of Fiber IFU for Venus Cloud Tops

*山田 学¹、鍵谷 将人³、山崎 敦²

*Manabu Yamada¹, Masato Kagitani³, Atsushi Yamazaki²

1.千葉工業大学惑星探査研究センター、2.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、3.東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

1.Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2. Institute of Space and Astronautical Science / Japan Aerospace Exploration Agency, 3.Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University

金星の上層雲は太陽放射のうち200nmから500nmの波長を吸収する。200nm から320nm はSO₂による吸収で良く説明できるが、320nm より長い波長での吸収を担う物質はいまだ同定されていない。異なる波長の空間構造の違いを比較することでこの非同定球種物質の数を明らかにできるかもしれないが、これまで実施された観測は365nmを中心波長とする単バンドしか使っていなかった。

我々はファイバアレイを用いた分光イメージャを開発している。分光イメージングは同時に複数の波長で二次元の画像を取得でき、金星の非同定吸収物質を観測するのに適している。百数十μm程度の細いファイバを数百本用いたファイバアレイの新しい製造方法を考案し、実用化に向けて改良を加えてきた。これを持ちいて地上から金星の雲を面分光する光学系を検討している。本発表では、開発中の光学系の性能と、ハリアカラ観測所の望遠鏡を持ちいた測観測計画を報告する。

キーワード：ファイバ面分光、紫外観測、金星大気

Keywords: Fiber integral field units, Ultraviolet observation, Venus atmosphere

Venus upper atmosphere as observed by Hisaki: Dayglow and ion tail

*Kei Masunaga¹, Kanako Seki¹, Naoki Terada², Fuminori Tsuchiya³, Tomoki Kimura⁴, Kazuo Yoshioka¹, Go Murakami⁵, Atsushi Yamazaki⁵, Chihiro Tao⁶, Ichiro Yoshikawa⁷

1.Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, 2.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, 4.Nishina Center for Accelerator Based Science, RIKEN, 5.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 6.National Institute of Information and Communications Technology, 7.Department of Complexity Science and Engineering, University of Tokyo

Hisaki was launched on September 14, 2013. Since then, we have conducted quasi-continuous observations of the upper atmosphere of Venus by using the Extreme Ultraviolet Spectroscope for Exospheric Dynamics (EXCEED) [Yoshioka *et al.*, 2013; Yoshikawa *et al.*, 2014] on-board Hisaki. Our observation aims to see variations of the EUV dayglow of Venus and to detect ions, such as O⁺ and C⁺, escaping from Venus.

From three quasi-continuous observations in 2014, we found characteristic periodic variations of oxygen EUV dayglow [Masunaga *et al.*, 2015]. In 2015, we conducted new observations of Venus upper atmosphere covering different local times or different latitude from those in 2014. Our result shows that the ~4 day periodicity is observed on the dawn side of Venus. We suggest that gravity waves may propagate from the middle atmosphere of Venus, where the atmosphere is super-rotating with a 4-day period, to the upper atmosphere of Venus. The local time difference of the ~4-day periodicity of the dayglow suggests that there is a local time difference in wave propagation altitudes or wave filtering structures.

Using the 10" slit of EXCEED, we also observed Venus tail region to detect ion tail escaping from Venus. The 10" slit has a better pointing accuracy than that of the 60" slit. The result shows that C⁺ ion tail (CII 133.5 nm) is detected with SNR > 1. We discuss the escape rate of C⁺ ions from Venus by assuming cold C⁺ ions are escaping from Venus.

Keywords: Hisaki, EXCEED, Venus, Dayglow, Ion escape

地上電波望遠鏡SPARTによる金星中層大気の一酸化炭素のモニタリング観測

Monitoring Observations of Millimeter-Wave Band Spectral Lines of Carbon Monoxide in the Middle Atmospheres of Venus with the SPART Telescope

*原口 大輝¹、森前 和宣¹、種倉 平晃¹、齋藤 滉介¹、西田 侑治¹、大西 利和¹、前澤 裕之¹、半田 一幸、神澤 富雄、大矢 正明、前川 淳、岩下 浩幸、齋藤 正雄、佐川 英夫、徳丸 宗利、水野 亮

*Daiki Haraguchi¹, Kazunori Morimae¹, Naruaki Tanekura¹, Kosuke Saito¹, Yuji Nishida¹, Kazutoshi Ohnishi¹, Hiroyuki Maezawa¹, Kazuyuki Handa, Tomio Kanzawa, Masaaki Oya, Jun Maekawa, Hiroyuki Iwashita, Masao Saito, Hideo Sagawa, Munetoshi Tokumaru, Akira Mizuno

1.大阪府立大学

1.Osaka Prefecture University

中心星が惑星大気の物理・化学的環境に与える影響を理解するため、G型星である太陽の活動が太陽系の地球型惑星の中層大気に与える影響の詳細理解が鍵を握る。そこで我々は国立天文台野辺山宇宙電波観測所にある口径10 mのミリ波干渉計のうち1 台を独立させ惑星大気の観測に特化させ、太陽系惑星大気監視プロジェクト (SPART: Solar Planetary Atmosphere Research Telescope) を推進している。

これまでに我々はSPART 望遠鏡を用いて、磁場で守られていない金星や火星の中層大気における一酸化炭素 (CO) の変動のモニタリング観測を実施している。具体的には(¹²C0 $J=1-0$ 115.2712018, GHz $J=2-1$ 230.538 GHz, ¹³C0 $J=2-1$ 220.3986765 GHz) の回転遷移による吸収スペクトルを観測している。2011-2015年 の観測期間において、金星の高度80 km 付近のCO 混合比の全球平均 (光解離等によりCO₂からCOが形成される) は、およそ60 ppmv であった。野辺山宇宙電波観測所の太陽電波偏波計1 GHz 帯の電波強度を解析すると、この観測期間中、太陽活動はほぼ極大期を維持していることが分かった。Cycle-22における過去のCO混合比(高度80 km)と比べて、Cycle-24におけるCO混合比は半減しており、近年の太陽活動の低下傾向との関連の可能性が示唆される。太陽はこれから極小期を迎えるため、これに伴ってCOがどのように変動していくか観測を継続していく予定である。本講演では、これら一連の解析の現状を報告する。

キーワード：金星、地上電波望遠鏡、太陽活動

Keywords: Venus, Ground-based Radio Telescope, Solar Activity

超伝導NbTiN細線を集積した1.9THz帯ホーン/導波管型超伝導HEBミキサ検出素子の開発
Development of 1.9-THz-band Waveguide-type Hot-electron Bolometer Mixer Employing
Superconducting NbTiN Microbridge

*前澤 裕之¹、齊藤 滉介¹、西田 侑治¹、相馬 達也²、大口 脩²、山本 智²

*Hiroyuki Maezawa¹, Kosuke Saito¹, Yuji Nishida¹, Tatsuya Soma², Osamu Oguchi², Satoshi Yamamoto²

1.大阪府立大学大学院理学系研究科物理科学科、2.東京大学大学院理学系研究科

1.Department of Physical Science, Osaka Prefecture University, 2.The faculty of science, University of Tokyo

星間ガスや惑星大気中の分子・原子・イオンの多くが、ミリ-サブミリ波帯において回転・振動・微細構造などによるスペクトル線を放射している。電波天文学では、この波長域においてヘテロダインリモートセンシングの手法を用いるため、高い周波数分解能($\Delta f/f > 10^6$)が得られ、星間ガスや星形成領域、惑星大気中のダイナミクスや密度、温度、組成などの基本的な物理・化学的状態を探る強力なツールとなっている。ただし観測波長が1 THzを超えると、従来の伝導SIS検出素子はクーパ対が破壊されて機能しなくなるため、我々はNbTiN超伝導細線を用いた手法により集積する次世代の超伝導ホットエレクトロンボロメータミキサ(HEBM)素子の開発を推進している。

現在、我々は、地球・惑星大気中のOHラジカル、星間ガス中の炭素イオンや酸素原子、その他の高励起スペクトル線が分布する1.8-2THz帯をカバーすべく、HEBMの集光方式を、従来のレンズをもちいた準光学方式から、ビームパターンの優れた導波路/ホーン集光方式へと改良を行っている。ホーン・導波路の設計は3次元高周波電磁界シミュレーターHFSSを用いて行い、ビームの軸対称性やサイドローブの特性を改善している。導波路の最適サイズは幅 $50\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$ と非常に微細であるが、近年のマイクロマシニング技術の向上により、実際に加工・製作を実現することができた。また、このHEBMの集光方式にあわせ、GRASPソフトウェアにより新たに冷却光学伝送系を設計・製作した。HEBM素子を冷却する4 K機械式冷凍機のヘッドの温度振幅はpeak to peakで0.2 Kと大きい。これはNbTiN細線の相転移の温度幅と同程度のため、このまま振幅がHEBMに伝わると出力の不安性を誘起する。そこで、新光學系を搭載・経由させることで、HEBMへの温度変動を1 mKと十分なレベルまで減衰できるように工夫している。本講演では、これら1.9THz帯HEBM受信機の開発の進捗について講演を行う。

キーワード：テラヘルツ、ヘテロダインリモートセンシング、超伝導検出素子

Keywords: Terahertz, heterodyne remote sensing, Superconducting detector

赤外レーザーヘテロダイン分光器MILAH Iによる金星中間圏の風速・温度場計測

Measurements of the Venusian mesospheric wind and temperature profiles using mid-IR heterodyne spectrometer MILAH I

*高見 康介¹、中川 広務¹、佐川 英夫²、青木 翔平³、笠羽 康正¹、村田 功¹、渡部 重十⁴、田口 真⁵、今村 剛⁶
 *Kosuke Takami¹, Hiromu Nakagawa¹, Hideo Sagawa², Shohei Aoki³, Yasumasa Kasaba¹, Isao Murata¹, Shigeto Watanabe⁴, Makoto Taguchi⁵, Takeshi Imamura⁶

1.東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻、2.京都産業大学 理学部、3.Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali, Istituto Nazionale di Astrofisica、4.北海道大学大学院 理学院 宇宙理学専攻、5.立教大学、6.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

1.Graduate School of Science, Tohoku University, 2.Faculty of Science, Kyoto Sangyo University, 3.Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali, Istituto Nazionale di Astrofisica, 4.Department of CosmoSciences, Hokkaido University, 5.Rikkyo University, 6.Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science

地球型惑星の中間圏は、地表に接する下層大気と宇宙へ開いた上層大気の接続域である。その高度領域は火星で50-90 km、金星で60-100 kmとされる。金星の中間圏は、金星探査機あかつきが観測する雲上層(高度:65-90 km)での自転方向高速風(スーパーローテーション)と、熱圏に存在する昼夜間対流(高度:100-120 km)との遷移域である。この下層-上層間結合の理解にはこの高度域の風速高度変化量の情報が必要だが、観測データは少なく、また金星大気モデルVenus International Reference Atmosphere (VIRA)の中間圏物理量と整合しない [Sonnabend et al., 2010]。

我々は、金星中間圏の風速場・温度場を継続的な地上赤外線高分散分光観測によって捉えるべく、ハワイ・ハレアカラ山頂の東北大60cm望遠鏡(T60)に実装した本学開発の赤外レーザーヘテロダイン分光器 MILAH I (Mid-Infrared LAsEr Heterodyne Instrument)を整備してきた。MILAH Iは、空間分解能~3.5秒角(内合時の金星で直径数百 km)、波長分解能~10⁶以上の性能を有する分光器である。本研究は、この独自地上観測データを主軸とするもので、これから得られる金星雲の風速・温度場情報をあかつき観測データと比較し、金星雲層の活動が中間圏に与える影響の考察を可能とすることを目的とする。

高度100-120 kmの風速・温度は、この高度で発光する10μm帯CO₂非局所熱力学平衡(non-LTE)放射輝線から導出できる。輝線のドップラー幅から温度を、ピーク周波数のドップラーシフト量から視線方向風速をそれぞれ直接導出する。これに近い高度領域(80-110km)での類似手法として、サブミリ波・ミリ波域CO分光観測による風速・温度導出がある[e.g., Clancy et al., 2008]が、観測波長が長い単一境での観測では空間分解能に制約が生じる(>~14秒角程度)。MILAH I+T60による観測では、これと比べ高空間分解で金星ディスクを分解でき、また専有利用可能な望遠鏡のため長期連続追跡を実現できる。また夜面では、雲頂上方(高度:70-95 km)の風速場・温度場も、10μm CO₂吸収線から導出可能である。風速・温度場鉛直プロファイルを求める際には、LTE非散乱放射伝達・反転解析計算モデル AMATERASU [Baron et al., 2008]を用いている。

現在、2016年3月の観測に向けた準備を鋭意進めている。この時期に活動を本格化する見込みの金星探査機あかつきは、赤外・紫外カメラ群および電波観測により、地表から高度90 kmまでの大気運動をグローバルに観測する。MILAH Iによる雲頂~中間圏域の風速場・温度場観測はあかつき探査機で得られる鉛直分布をさらに上方へ伸ばし、金星大気のみを包括的な理解に資する。あかつきに搭載されている中間赤外カメラLIR(観測波長域:8-12μm)、紫外線イメージャUVI(観測波長:283nm)、超高安定発振器US0からは、それぞれ夜面雲頂付近(高度:~70km)の温度分布、雲追跡手法による昼面雲頂の風速分布、探査機の一周回毎に二度行われる電波掩蔽観測によるlimbの温度鉛直プロファイル(高度範囲:35-90 km)が定常的に導出される。我々も継続的な地上観測によって有効な同時観測活動を実現させたい。

今発表では、US0による電波掩蔽観測とMILAH Iの温度鉛直プロファイルを比較し、地上観測による金星大気の高高度分解性能を評価する。また、UVIによる昼面雲頂高度の風速と、MILAH I観測によるlimbの風速鉛直プロファイルを高度方向に繋げ、「雲頂~中間圏の風速構造」の日変化を導出し、スーパーローテーション-昼夜間対流間の遷移機構を導出する。またLIRによる雲頂温度分布とMILAH Iによる夜面鉛直温度プロファイルから「雲頂~中

間圏の温度構造」の日変化も導出しうる。

キーワード：金星、中間圏、ヘテロダイン、あかつき
Keywords: Venus, mesosphere, heterodyne, Akatsuki

惑星大気の多重散乱を扱う輻射輸送モデルを用いた生命の痕跡の示唆について
Radiative transfer model combined with multiple scattering in planetary atmosphere:
implication for a potential biomarker

*石原 駿¹、梅村 雅之¹、小松 勇¹

*Shun Ishihara¹, Masayuki Umemura¹, Yu Komatsu¹

1.筑波大学

1.University of Tsukuba

太陽系外惑星の観測に用いられる方法の一つにトランジット法がある。トランジット法によって観測された惑星の食（トランジット）による主星の減光の中には惑星大気にある分子の情報が含まれており、その波長依存性から大気分子を分析している。しかしながら、トランジット法によって観測されているスペクトルのデータ点は少なく、理論モデルと比較することで大気組成を推定するという方法がなされている。系外惑星の観測が進み、地球のように生命が存在しうる惑星の発見が期待されている。酸素やオゾンなど、地球において生命活動に由来する大気分子は惑星のスペクトルから特徴づけられるバイオマーカーであるとみなされている。それゆえに、様々な状況においてこれらの分子の検出可能性を議論することは、惑星における生命を探す1つのよい基準になるであろう。

本研究の目的は、系外惑星の大気中にある生命活動に由来する分子が観測でどう検出できるかを定量的に評価することである。先行研究 (Hollis et al. 2013) の1次元球対称の惑星大気において輻射輸送モデルを拡張し、トランジット法による疑似観測をする。1次元球対称の大気における光の多重散乱を、反復計算を用いて表す。多重散乱によって分子のレイリー散乱、地表の反射の効果がトランジット観測におけるバイオマーカーの検出にどのように影響を与えるかを見積もった。

晴れた地球大気を模した条件で、 O_2 、 O_3 の特徴がみられるかを見積もった。トランジットで観測できるスペクトルに惑星表面の海からの反射スペクトルの効果が加わっていた。これは、レイリー散乱による多重散乱で、海からの反射が観測できることを示唆する。 O_2 と O_3 の吸収スペクトルは、それぞれ $1.27\mu\text{m}$ 、 $2.47\mu\text{m}$ に見られるが、検出するには弱い特徴である。

キーワード：太陽系外惑星、透過スペクトル、模擬観測

Keywords: extrasolar planet, transmission spectra, mock observation

Ion acceleration by magnetic reconnection in the dayside ionospheres of unmagnetized planets

Ion acceleration by magnetic reconnection in the dayside ionospheres of unmagnetized planets

阪本 仁¹、*寺田 直樹¹、中川 広務¹、笠羽 康正¹

Hitoshi Sakamoto¹, *Naoki Terada¹, Hiromu Nakagawa¹, Yasumasa Kasaba¹

1.東北大学大学院理学研究科

1.Graduate School of Science, Tohoku University

We have examined magnetic reconnection in the dayside ionosphere of Venus and its application to other unmagnetized planets using a 2-D multi-species magnetohydrodynamic (MHD) model. Main object is to investigate the ionospheric ion acceleration and the escape processes associated with magnetic reconnection after an interplanetary magnetic field (IMF) reversal.

Magnetic reconnection is an efficient energy conversion process that converts the energy of magnetic field in an anti-parallel configuration into plasma kinetic and thermal energy. Thus, it is potentially important to accelerate and remove the ionospheric ions from unmagnetized planets and to understand the evolution of planetary atmospheres. Recently, magnetic reconnection has been observed around unmagnetized planets such as Venus and Mars [Eastwood et al., 2008; Halekas et al., 2009; Zhang et al., 2012; Hara et al., 2014; Harada et al., 2015]. However, there remain unsolved problems about magnetic reconnection after an IMF reversal; its spatiotemporal evolution and resulting atmospheric loss rate.

In this study, we performed three runs with different initial conditions. In order to examine the altitude where magnetic reconnection develops, different initial heights of the current sheet are given; 450 km (Run A), 360 km (Run B) and 260 km (Run C) altitudes. Our simulations showed that the fast magnetic reconnection called the plasmoid instability [Loureiro et al., 2007] occurs in Run A and Run B. On the other hand, the instability evolves slowly in Run C. From three runs, it is shown that the growth rate of the plasmoid instability is suppressed in the lower region of the ionosphere. For all cases, ionospheric plasmas are accelerated and ejected from the current sheet by magnetic reconnection. The averaged outflow velocities are 2.3 km/s for Run A, 2.8 km/s for Run B, and 0.4 km/s for Run C, respectively. It is indicated that the plasma is accelerated efficiently (up to 0.7-0.8 times the local Alfvén velocity) in the upper ionosphere of Venus.

We also examined the O^+ loss rates due to magnetic reconnection after an IMF reversal in three runs. The transient O^+ loss rates are about 2.8×10^{25} ions/s for Run A, 2.3×10^{25} ions/s for Run B, and 5.5×10^{24} ions/s for Run C. This difference is attributed to the difference in the outflow velocity. It is suggested that the escape rate due to the reconnection decreases with a decreasing initial altitude. We have compared the O^+ loss rate due to magnetic reconnection with other escape processes, and concluded that the reconnection after an IMF reversal potentially contribute to oxygen loss if an IMF reversal frequently occurs.

Based on the simulation results and the theory of magnetic reconnection, we investigated the possible atmospheric loss by the magnetic reconnection after an IMF reversal at other unmagnetized planets. From an analytical estimation of the loss rate due to the reconnection after an IMF reversal, it is shown that the loss rate is proportional to local Alfvén velocity and the number density of ionospheric ions. Using the parameter of the Martian ionosphere, we have estimated the O^+ loss rates as 8×10^{24} ions/s at the maximum. The estimated maximum loss rate is several ten times larger than that obtained from the Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) spacecraft [Hara et al., 2015].

キーワード：金星、火星、磁気リコネクション

Keywords: Venus, Mars, Magnetic reconnection

火星大気散逸における太陽風コンディション

Solar wind conditions on the escape of oxygen from Mars

*宮澤 淳次¹、渡部 重十¹*Junji Miyazawa¹, Shigeto Watanabe¹

1.北海道大学大学院理学院

1.Planetary and Space Group Department of CosmoSciences Hokkaido University

The Martian atmosphere was warm and high pressure several billions of years ago[Carr, 1999]. The Martian atmosphere is dry and low pressure (636 Pa)[McKay and Stoker, 1989; Kerr, 2000; Baker, 2001]. Although about 95% of Martian atmosphere is CO₂, about 90% of escaping atmosphere is oxygen (O, O⁺) from the observation by Mars Express[Lundin et al., 2009]. Oxygen escape may be important for the evolution of the water of Mars. Mars does not have a significant internal magnetic field. The solar wind can penetrate to the Martian ionosphere altitude and interact with the Martian ionosphere [Acuña et al., 1998; Lundin et al., 2004]. Then, ionopause and bow shock are formed, and oxygen ion escape is strongly affected by the solar wind. The structures of ionopause and bow shock are important for oxygen ion escape. The important escape mechanisms of Martian atmosphere are Dissociative Recombination, Solar Wind pick up and Sputtering. The previous models do not include the effect of the collision of the escaping particles with the atmospheric particles and the escape of the collided secondary particles. Then, We constructed a model including dissociative recombination, solar wind pick up and sputtering processes, and investigated the amount of the atmospheric escape from Mars. We calculated the solar wind interaction with the Mars ionosphere with Magnetohydrodynamics equations and particle model of Oxygen, and we found that the solar wind conditions around Mars control the escape flux of Oxygen in Mars.

キーワード：火星、太陽風、散逸、酸素

Keywords: Mars, Solar wind, Escape, Oxygen

電離圏ポテンシャルソルバーによる木星内部磁気圏電場の太陽風応答の研究

Study of the solar wind influence on the Jovian inner magnetosphere using an ionospheric potential solver

*寺田 綱一郎¹、寺田 直樹¹、笠羽 康正¹、北 元²、埜 千尋³、中溝 葵³、吉川 顕正⁴、大谷 晋一⁵、土屋 史紀²、鍵谷 将人²、坂野井 健²、村上 豪⁶、吉岡 和夫⁷、木村 智樹⁸、山崎 敦⁶、吉川 一郎⁹

*Koichiro Terada¹, Naoki Terada¹, Yasumasa Kasaba¹, Hajime Kita², Chihiro Tao³, Aoi Nakamizo³, Akimasa Yoshikawa⁴, Shinichi Ohtani⁵, Fuminori Tsuchiya², Masato Kagitani², Takeshi Sakanoi², Go Murakami⁶, Kazuo Yoshioka⁷, Tomoki Kimura⁸, Atsushi Yamazaki⁶, Ichiro Yoshikawa⁹

1.東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻、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.情報通信研究機構 電磁波計測研究所、4.九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門 / 九州大学国際宇宙天気科学・教育センター、5.ジョンズホプキンス大学応用物理研究所、6.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、7.東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、8.国立研究開発法人理化学研究所仁科加速器研究センター、9.東京大学

1.Dep. Geophysics Graduate School of Science Tohoku University, 2.Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology, 4.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University, / International Center for Space Weather Science and Education, Kyushu University, 5.The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, 6.Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 7.Department of Earth & Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 8.Nishina-Center for Accelerator Based Science, RIKEN, 9.The University of Tokyo

木星内部磁気圏はプラズマ共回転が発達している領域で、対流に太陽風が及ぼす影響はほとんどないとする考え方が一般的である。しかし最近、Hisaki衛星搭載の極端紫外線分光器EXCEEDによって、イオプラズマトラス発光分布の朝夕非対称に変動が観測された。この非対称の変動はイオ軌道に $\sim 3\text{--}7\text{[mV/m]}$ の朝夕電場がかかることで説明でき、この電場の起源として太陽風の影響が示唆されている。すなわち、まず太陽風が木星磁気圏に衝突して磁気圏を圧縮する。これにより磁気圏-電離圏電流系が変調され、高緯度電離圏へ流入する沿磁力線電流が増大する。その結果、沿磁力線電流によって形成された電離圏電場が増大し、低緯度領域へと拡大侵入する。これが磁力線を介して磁気圏赤道面に投影されることで、内部磁気圏深部に位置するイオ軌道近傍に朝夕電場が生成されると考えられている。

このシナリオを定量的に評価するツールとして、電離圏ポテンシャルソルバーが最適である。電離圏ポテンシャルソルバーとは、任意の沿磁力線電流分布に対して電離圏全球ポテンシャル分布を求めるシミュレーションコードのことである。我々は電離圏ポテンシャルソルバーを新たに構築し、太陽風起因の朝夕電場が木星内部磁気圏深部（イオ軌道）まで侵入可能かを定量的に調べた。まず、このポテンシャルソルバーの機能を評価するために、これを地球電離圏に適用し、Nakamizo et al. [2012]による地球電離圏全球ポテンシャルソルバーの計算結果と比較してコードの信頼性を確認した。ポテンシャルの低緯度領域への侵入は、電離圏電気伝導度の絶対値（特にサブオーロラ帯での値）とその空間勾配、沿磁力線電流分布との相対位置などに依存しており、我々が求めたポテンシャル分布はNakamizo et al. [2012]のものと微小な差はあるものの、大局的な特徴の再現に成功した。次いで、このコードを木星磁気圏-電離圏電流系に適用した。その際、沿磁力線電流のピーク値は、HST紫外オーロラスペクトル観測に基づく値[Gustin et al., 2004]を用い、その分布は地球の経験則的な分布[Hori et al., 2009]を採用した。また電離圏電気伝導度は、まずは全球一様に地球の10分の1とした[Tao et al., 2009]。この仮定に基づいて得られた木星電離圏ポテンシャル分布を磁気圏赤道面に投影したところ、イオ軌道上での朝夕電場強度はHisaki衛星観測が示唆する $\sim 3\text{--}7\text{[mV/m]}$ と同オーダーないしやや小さな値が得られた。このコードはまだ改良中であり、電離圏電気伝導度の空間分布・勾配、沿磁力線電流の空間分布などはまだ現実に即していない。木星の沿磁力線電流や電気伝導度の与え方は、Galileo探査衛星の観測データや木星超高層大気モデルなどを用いることでより現実に即した分布となるよ

う改良する計画である。今学会では、朝夕非対称への太陽風の影響評価を目指して改良を施した結果を報告する。

キーワード：木星、イオプラズマトーラス、朝夕電場

Keywords: Jupiter, Io plasma torus, dawn-to-dusk electric field

表面構造の測色観測による木星大気ダイナミクスの研究

Study on dynamics of Jovian atmosphere by a colorimetric observation of surface structures

*岩崎 和人¹、鈴木 秀彦¹、田部 一志²、弘田 澄人³*Kazuto Iwasaki¹, Hidehiko Suzuki¹, Isshi Tabé², Sumito Hirota³

1.明治大学、2.月惑星研究会、3.かわさき宙と緑の科学館

1.Meiji Univ., 2.Association of Lunar and Planetary Observers of Japan, 3.Kawasaki municipal science museum

木星表面には緯度毎に縞(Belt)、帯(Zone)と呼ばれる特徴的な縞模様が複数存在し、その境界にはオーバルと呼ばれる大小様々なスケールの渦が維持生成されている。オーバルの中には同時期・同緯度で発生したにも関わらず白色や赤褐色といった異なる色を持つものや、オーバル同士の相互作用の結果、みかけの色が変化するものも観測されている。各種構造の色の違いや変動は雲頂高度の違いや、雲に含まれる元素成分の違いなどに起因するなどと言われているが、詳しいメカニズムは未解明である。そこで、本研究では、スケールの長期変動やより小さい渦との相互作用によってその色の変化が報告されている大赤斑(GRS)や、色に経年変化がみられる縞・帯といった木星大気の特徴的な表面構造に着目し、表面構造における「色」の変化から惑星大気ダイナミクスの解明を目指す。刻一刻と激しく変動する木星表面構造の運動と色の変動を定量化するためには、継続的な木星表面の監視が不可欠である。大型望遠鏡を占有し木星の監視を連続的に行うことは限られたマシンタイムの観点から現実的ではないが、木星表面の精緻な構造を捉えたカラー画像に関しては、世界各地のアマチュア天文家によって報告されている膨大なデータを有効に活用できる可能性がある(例えば月惑星研究会のアーカイブ:<http://zetta.jpn.ph/Alpo/latest/index.html>)。これらの画像は、異なる光学系とイメージセンサーによって撮像された上に、画像の処理系の違いも加わり色彩の定量的な相互比較は一般的には困難である。しかし、カラー画像のホワイトバランスを統一調整するための参照スペクトルが同時に存在すれば、世界各地で得られたカラー画像の色彩を直接比較可能な状態に補正することが可能になると考えられる。そこで、本研究では木星の表面構造の任意の部分ピンポイントで分光観測可能な分光システムを開発した。このシステムは、天体望遠鏡等で集光した光の一部をCCDカメラに結像し、大部分を分光器に入射させることにより、イメージと分光データが同時に取得可能である。コリメーターを用いた較正実験により、CCD素子上のどの位置が分光範囲に対応するかを明らかにすれば、惑星表面の空間構造を分解した分光観測が可能である。また、装置自体は小型かつ可搬であり、公共の天文台等の有する天体望遠鏡などへ容易に取り付けが可能である。そこで、本研究では本装置を川崎市宙と緑の科学館の所有する口径40cmの反射望遠鏡と組み合わせ、2015年12月には木星表面構造の分光観測を実施した。本講演では、分光システムの較正実験結果および、木星表面の分光観測結果と色度図を用いた色彩の定量化の手法について紹介する。

キーワード：木星、大気、測色、大赤斑、分光器、色度図

Keywords: Jupiter, atmosphere, colorimetry, GRS, spectroscopy, chromaticity diagram

地上観測に基づく木星デカメータ電波S-burst電波源高度分布の導出と
木星電離圏アルフヴェン共鳴モデルの検証

Derivation of the vertical distribution of Jovian decametric
S-burst sources based on ground-based observations
for verification of the Jovian ionospheric Alfvén resonator model

*佐々木 悠朝¹、熊本 篤志¹、加藤 雄人¹、三澤 浩昭¹

*Yuasa Sasaki¹, Atsushi Kumamoto¹, Yuto Katoh¹, Hiroaki Misawa¹

1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University

Vertical distribution of Jovian decametric (DAM) S-burst was studied based on the analysis of S-burst events simultaneously found in multiple frequency range in the ground-based observation. Using the determined repetition frequencies of the S-burst elements, scale height of the Jovian ionosphere has been estimated from Jovian ionospheric Alfvén resonator (JIAR) model.

JIAR hypothesis was proposed by Ergun et al. [2006] and Su et al. [2006]. According to these studies, eigen-frequencies of JIAR are expected to determine the repetition frequency of S-burst elements. The ionospheric Alfvén resonator (IAR) model has been investigated through the theoretical studies and observations of the Earth's ionosphere. In the IAR model, the fundamental and higher harmonic eigen-frequencies were analytically derived from parameters such as the Alfvén speed at the plasma density peak of the ionosphere, and the scale height of the topside ionosphere [Lysak, 1991; 1993].

In this study, we have observed Jovian decametric S-burst in a frequency range from 20 MHz to 40 MHz with a logperiodic antenna and a wideband receiver since 2012 at Yoneyama observatory of Tohoku University. These observations were performed mainly in Io-B source condition, in which previous studies reported high occurrence probability of intense S-burst events.

We especially focus on a simultaneous S-burst event in two different frequency bands (~23.5 MHz, hereafter DAM1, and ~27.0 MHz, hereafter DAM2) found at 15:56 on 24 November 2014. With assumption that emissions are radiated at the local electron cyclotron frequency, the geometric distance of the DAM1 and DAM2 sources are respectively estimated to be ~1.085 R_J and ~1.040 R_J based on the VIPAL magnetic field model [Hess et al., 2011] and the location of Io UV footprint [Bonfond et al., 2009]. The determined repetition frequencies of DAM1 and DAM2 were 22.3 Hz and 28.5 Hz, respectively.

The two emission sources are considered to be in the same magnetic field line or in the different magnetic field lines which are close to each other. In the both cases, we can assume that the repetition frequencies are equal to the fundamental and high harmonic eigen-frequency of JIAR, and that the ionospheric scale heights for DAM1 and DAM2 are common or quite similar. Therefore the Jovian ionospheric scale height is estimated to be ~1400 km and ~1800 km.

In the presentation, we will discuss the comparison results of the S-burst source altitude derived from the emission frequency and vertical distribution of the standing Alfvén waves in JIAR estimated from the eigen-frequencies of JIAR, also.

木星磁気圏プラズマ変動期における放射線帯電波の観測

Observation of Jupiter's synchrotron radiation in the magnetospheric variation period

*三澤 浩昭¹、土屋 史紀¹、佐藤 慎也¹、北 元¹、関戸 衛²、岳藤 一宏²、川合 栄治²、近藤 哲朗²、長谷川 新吾²

*Hiroaki Misawa¹, Fuminori Tsuchiya¹, Shinya Satoh¹, Hajime Kita¹, Mamoru Sekido², Kazuhiro Takefuji², Eiji Kawai², Tetsuro Kondo², Shingo Hasegawa²

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.情報通信研究機構

1.Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University,

2.National Institute of Information and Communications Technology

Rapid variation of relativistic electrons in Jupiter's radiation has been inferred with the time scale of a day or less from the observation of Jupiter's synchrotron radiation (JSR) at 327MHz. The Galileo Jupiter orbiter data showed this rapid variation has some relation with the (recurrent) magnetic reconfiguration events (MRE) in the outer magnetosphere, however, the causality of the rapid variation of JSR and MRE have not been known yet. One plausible causality for MRE is proposed to be enhancement of mass loading originally brought by enhancement of plasma originated from Io. In the middle of Jan. to May, 2015, obvious Io plasma enhancement has been identified by the ground-based optical observation (Yoneda et al., 2015) and also the Hisaki spacecraft observation. This phenomena gives us a good opportunity to directly confirm the relation between the occurrence of rapid variation of Jupiter's radiation belt and enhancement of the Iogenic plasma. We have made a quasi regular JSR observation at 2.3GHz for about three weeks in March, 2015 using the Kashima 34m radio telescope with a new observation method to eliminate artificial radio noises. We will report the result of this JSR observation and discuss variation characteristics.

キーワード：木星、シンクロトロン電波、放射線帯、磁気圏変動

Keywords: Jupiter, synchrotron radiation, radiation belt, magnetospheric variation

イオプラズマトーラス発光非対称からの木星内部磁気圏における朝夕電場の評価

Estimation of dawn-to-dusk electric field in the Jovian inner magnetosphere from emission asymmetry in the Io plasma torus

*荒川 峻¹、村上 豪²、三澤 浩昭¹、土屋 史紀¹、北 元¹

*Ryo Arakawa¹, Go Murakami², Hiroaki Misawa¹, Fuminori Tsuchiya¹, Hajime Kita¹

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

これまでの地上観測・探査機による観測によりイオプラズマトーラスの発光強度分布に朝夕非対称が存在することが知られており、その原因として朝から夕方方向にかかる約4mV/mの電場の存在が考えられている。2013年9月に打ち上げられたHISAKI衛星により、プラズマトーラスの長時間連続観測が可能となり、発光強度の朝夕非対称性が太陽風動圧に応答して時間変動していることが明らかとなった。これは自転効果が強い木星磁気圏の内部に太陽風の影響が及んでいる事を示す結果として注目されている。本研究では、HISAKI衛星により観測された発光強度の朝夕非対称性から朝夕電場の強度を定量的に導出する事を目的に、発光強度の朝夕非対称性を生む原因について検討を行った。

内部磁気圏に朝夕電場がかかることによって、イオプラズマトーラスプラズマの流線は等L値から朝側へシフトし、プラズマは夕方側でより木星に近づく軌道をとる。第一断熱不変量の保存から電子の温度は朝側より夕方側で高くなるため、夕方側でのイオンの電子衝突励起の効率が高くなり、発光強度が上昇する。本研究では、これらの過程を以下の手順で定量的に検討した。(1)共回転電場に朝夕電場が印加された時のプラズマの運動方程式をルンゲクッタ法で計算し、粒子軌道を求める。電子の速度分布として熱的(5eV)と高温(50eV)の2温度分布を採用し、それぞれの成分について断熱効果による温度変化を計算する。(2)単位磁束管内のプラズマの総量の保存を仮定し、朝側と夕方側での磁場強度の変化による電子密度変化を計算する。(3)熱的および高温電子の密度の典型値として2000/ccと20/ccを採用し、(1)と(2)で評価した電子温度、密度の変化によるイオンの電子衝突励起の体積放射率(イオン種：S++(68nm))の変化を原子データベース(CHIANI)を用いて計算する。(4)プラズマの軌道の変化に伴い、プラズマの分布が朝夕で非対称になり、その結果朝夕で地球からの視線方向の積分長が変化するので、この効果も考慮し、プラズマトーラスの朝側、夕方側の発光強度の比を計算する。(1)から(4)の手順を、朝夕電場強度が0から10mV/mの範囲で実行し、電場と発光強度の朝夕非対称の対応を導出した。

発光強度の非対称に寄与している効果を調べるために、熱的電子の温度と密度、高温電子の温度と密度、視線方向の積分長の5つの要素について、朝夕電場による変化と発光強度非対称への依存性を調べた。その結果、熱的電子の温度変化が最も発光強度の非対称に寄与しており、高温電子の寄与はほとんどないことが分かった。これは極端紫外線の波長域では、イオンの体積放射率の電子温度依存性が20eV以上で弱くなることが原因である。

本研究で求められた朝夕電場とプラズマトーラスの発光強度の朝夕非対称の対応関係を用い、HISAKI衛星の観測結果から朝夕電場強度を推定した。HISAKI衛星により観測された2014年1月1日、14日の朝側と夕方側の発光強度の比はそれぞれ、1.49、1.13であった。これから推定される朝夕電場強度はそれぞれ3.4mV/m、1.0mV/mとなった。HISAKI衛星の観測結果から電場強度を推定するにあたっては、より現実に近いモデルが必要である。このためには、プラズマトーラスの動径方向の空間構造と、放射による電子の冷却効果を考慮する必要がある。これらが今後の課題である。

キーワード：イオプラズマトーラス、朝夕電場、朝夕非対称性

Keywords: Io plasma torus, Dawn dusk electric field, Dawn dusk asymmetry

土星オーロラ電波放射の南北非対称活動：強度の季節変動

North-south asymmetry of Saturn's auroral radio emissions: The seasonal variation of their fluxes

*佐々木 歩¹、笠羽 康正¹、木村 智樹²、埜 千尋³、Lamy Laurent⁴、Cecconi Baptiste⁴

*Ayumu Sasaki¹, Yasumasa Kasaba¹, Tomoki Kimura², Chihiro Tao³, Laurent Lamy⁴, Baptiste Cecconi⁴

1.東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻 太陽惑星空間物理学講座 惑星大気物理学分野、2.国立研究開発法人理化学研究所仁科加速器研究センター、3.情報通信研究機構 電磁波計測研究所 宇宙環境インフォマティクス研究室、4.LESIA, Observatoire de Paris

1.Dep. Geophysics Graduate School of Science Tohoku University, 2.Nishina-Center for Accelerator Based Science, RIKEN, 3.Space Weather and Environment Informatics Laboratory Applied Electromagnetic Research Institute, 4.LESIA, Observatoire de Paris

土星は、Saturn Kilometric Radiation (SKR) と呼ばれる強力な電波放射を3-1200kHzで南北両極のオーロラ発光領域上空から放射している。この電波は、沿磁力線加速されたオーロラ降下電子からサイクロトロンメーザー不安定性によって励起され、放射源におけるその場のサイクロトロン周波数で放射される。放射源が、背景磁場に対して強い放射異方性を持ちながら、磁場に固定されて土星と共回転している特性から、土星の自転周期が評価されてきた。また、土星磁場の向き(地球と同様)に従い、北側からは右旋円偏波(RH)、南側からは左旋円偏波(LH)で放射されるため、円偏波度を用いて南北要素を分離可能である。この性質を利用したCassini探査機による土星南半球夏季の観測(2004-2010)から、自転に伴うSKR日変動周期が時間変動すること [Kurth et al., 2008]、この周期は南北で差があり南(夏側)でより長いこと [Gurnett et al., 2009]、春分点(2009年9月)付近に向かって南北間の周期差が縮小したこと [Gurnett et al., 2010] 等の活動特性が発見された。この電波周期の南北非対称・季節変動に関連して、Kimura et al. (2013)では、南北SKR強度の長期変動を追跡し、南半球夏～秋季にかけてLH成分(南半球・夏側)がRH成分(北半球・冬側)よりも平均的に強いことを見出した。これらの統一的原因として、土星の極域沿磁力線電流量・降下電子量・オーロラ活動量に対する極電離圏電気伝導度(太陽放射に照らされる夏側がより高い)による制御、及びその季節変動・太陽紫外線放射量への応答が示唆されるものの、結論は確立されていない。なお、2010年以降の北半球夏季には、南半球夏季に見られた南北日変動周期の相違が不明瞭であり [Provan et al., 2014; Fischer et al., 2015]、この事実は極域電離圏電気伝導度に原因を委ねるアイディアに反している。

我々は、最近に至る「北半球夏季」条件も網羅してSKR南北非対称性の特徴を解明すべく、周波数積分した南北SKR強度の季節変動について、南半球夏～春分点(2004-2010)の解析 [Kimura et al., 2013] を北半球夏(2015 夏)まで拡張した。この先行研究手法の延長期間への適用には、Cassini土星周回軌道の偏りが問題となる。土星SKRの放射は、朝側領域でより強い。また、極域の放射源位置と電波指向性の影響で近距離(10 R_s 以内)や高緯度・反対半球側(北側放射では磁気緯度+30~-5deg以外、南側放射は同+5~-30deg以外)では観測強度が低下する。Kimura et al. (2013)では、Cassiniが「朝側領域(ローカルタイム(LT): 2~10h)、RH(北側)・LH(南側)に対しそれぞれ磁気緯度+30~-5deg・+5~-30deg、さらに土星からの距離10-100 R_s (R_s は土星半径)」に所在するときを絞り、強度を距離1AUへ規格化して解析した。しかし、2010年以降のCassini軌道は遠土点(UT)がそれまでの朝側から夕側へと移行しており、また軌道傾斜角も2015年に至るまで大きいため、同様の制限を設けると適用可能データが著しく減少する。このため、本研究では、磁気緯度及び土星距離に関してはKimura et al. (2013)と同条件を用いるものの、LTに対する制約を外して全LTを平均した南北SKR強度及びピークフラックスを比較調査した。但し、前者は北と南で異なるLTを見ることができるのでLT依存性の影響が避けられない。そのため並行して、Visibility effectの回避しやすい後者において緯度+5degに絞り、南北同時観測データだけを拾い出した結果でも検証した。結果、前者に関して2004-2007年はLH成分(南半球・夏側)が~+40dB、2009-2012年では両極のSKR強度はほぼ同程度、2013年以降にはRH成分(北半球・夏側)が~+20dBほど大きくなる様子が見られ、明確な南北逆転を見いだした。この結果は「夏半球でオーロラ活動がより増大」というKimura et al. (2013)の結果と整合する。また、ピークフラックスについてはVisibility effectを回避するために+35日幅でrunning median値を取り変動を見た所、2009年までは平均的にLH成分が優

勢、2010~2012年の間は判然とせず、2013年以降はRH成分がやや優勢となり、強度比較と同傾向が見えた。ただし、2004年（南半球夏）では南北強度？ピークフラックス？比は10倍以上あるのに比べ、2015年（北半球夏）では0.2~0.4倍程しか差がなく、この原因はまだ不明である。本講演では、これらの傾向とSKR南北周期強度や太陽紫外線強度・太陽風活動度との相関についても触れる。（なお、Cassiniは2017年9月に運用終了予定である。）

キーワード：土星、土星キロメートル電波放射、南北比、季節変動、カッシーニ

Keywords: Saturn, SKR(Saturn kilometric radiation), North-south activity ratio, seasonal variation, Cassini

ハレアカラ60cm望遠鏡による土星衛星エンケラドストラス内酸素原子発光の観測
[OI]630.0nm emission in the Enceladus torus obtained with Haleakala T60/Vispec

*小野 紘夢¹、坂野井 健¹、鍵谷 将人¹

*Hiromu Ono¹, Takeshi Sakanoi¹, Masato Kagitani¹

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

1.Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University

土星から3.9土星半径(Rs)の距離を公転する衛星エンケラドスは、その南極域に存在する'Tiger Stripe'と呼ばれる裂け目から水蒸気を中心としたプルームを噴出しており、それが土星磁気圏を構成する粒子の主なソースとなっている。このプルームのために、土星磁気圏内は中性粒子に富んでおり、その密度はプラズマ密度の約10倍と言われる。しかしながら、その中性粒子の空間分布・時間変動等についてはモデル計算での議論が中心となっており、継続した観測データによる議論は行われていない。そこで、本研究では、土星磁気圏内粒子の空間分布・時間変動を観測データより議論することを目的とし、専有望遠鏡を用いてエンケラドストラス中の酸素原子630.0nm発光の連続観測を試みた。酸素原子は、主要な中性粒子の一つであり、太陽光共鳴散乱および電子衝突励起により630.0nmで発光することが知られている。我々は、ハワイ・ハレアカラ観測所東北大学60cm望遠鏡及び可視分光器Vispecを用いて、2015年7月13日から2015年9月18日まで観測を行った。Vispecの検出器は1024pixx1024pixCCD(冷却温度-90℃)、観測波長帯は約629[nm]~632[nm]、波長分散は 5.98×10^{-3} [nm/pix]であった。スリットは、幅60μm×長さ10mmのもの100μm×10mmの2種類を使用した。それぞれ300×2秒角、300×3秒角の視野に相当し、前者のスリットは土星に対し赤道に沿って東西方向に、後者のスリットはエンケラドス軌道を中心に南北方向にスリットを当てて用いた。露光時間は1フレーム20分とし、東西方向データ38フレーム、南北方向データ36フレーム、計74フレーム、総露光時間24時間の分光データを取得した。9月1日から9月18日に得られた南北スリット方向の観測から、土星の東側3.9Rsの距離において赤道面から南北±1.5Rsの範囲での酸素原子発光の平均発光強度を求める解析を行った。その結果、本観測の検出可能な上限の発光量である2.4[R]を上回る発光は確認されなかった。今後の解析手法の改善により、さらに3倍程度検出限界を上げられる見込みがあり、解析手法の改善をすすめている。2009年に行われた先行研究では、 4.0 ± 2.0 [R]の明るさであったことから、今後この期間の発光強度の変動について議論することができると期待される。酸素原子発光の変動の原因の一つとして、先行研究との観測ジオメトリの違いが挙げられる。地球からみた土星は15年周期で見かけの環の傾き(Ring-Opening-angle, ROA)が変化していき、2009年には地球からみてほぼ水平(ROA=4.5[deg.])であったのに対して、本観測においてはROA=24.4[deg.]であった。そのため観測の視線方向先に存在する酸素原子の柱密度及びトラスの空間方向の広がり異なり、観測発光量も変化するものと思われる。また太陽活動度の変化やエンケラドスプルームの活動度の変化等も原因の候補として挙げられる。本発表では、これらの要因について、先行研究(兎玉ほか、2009)の観測と比較し発光強度変動の原因について議論する。

キーワード：土星磁気圏、エンケラドス、地上観測

Keywords: Saturn's inner magnetosphere, Enceladus, groundbased-observation

テスト粒子シミュレーションを用いた500eV-50keV磁気圏電子とEnceladus衛星起源H₂O分子の弾性衝突

Test-particle simulation of elastic collisions between magnetospheric 500eV-50keV electrons and neutral H₂O molecules originated from Enceladus

*田所 裕康¹、加藤 雄人²

*Hiroyasu Tadokoro¹, Yuto Katoh²

1.武蔵野大学、2.東北大学

1.Musashino University, 2.Tohoku University

Water group neutrals (H₂O, OH, and O) in Saturn's inner magnetosphere play the dominant role in loss of energetic electrons and ions because of abundance of the neutrals [e.g., *Paranicas et al.*, 2007; *Sittler et al.*, 2008]. The observations of injected plasmas in the inner magnetosphere suggest that these particles do not survive very long time due to the neutral cloud originated from Enceladus [e.g., *Paranicas et al.*, 2007; 2008]. Thus, the previous studies suggested that the neutral cloud contributes to loss processes of plasma in the inner magnetosphere. However, little has been reported on a quantitative study of the electron loss process due to electron-neutral collisions.

In the present study, we examine the variation of energetic electron pitch angle distribution at the magnetic equator and loss rate of precipitated electrons into Saturn's atmosphere through pitch angle scattering due to elastic collisions with neutral H₂O along Saturn's dipole magnetic field line around Enceladus. We conduct one dimensional test-particle simulation for monoenergetic electrons along Saturn's dipole magnetic field line around Enceladus when the co-rotating electron flux tube passes the dense H₂O region in the vicinity of Enceladus (~6.4 minutes). The initial electron pitch angle distribution is assumed to be isotropic.

Tadokoro et al., [2014] examined the variation of 1keV electron pitch angle distribution due to elastic collisions with the dense region of H₂O originated from Enceladus. The examination of elastic collisions with other electron energy is required to understand the electron loss process due to elastic collision. We show the loss rates through pitch angle scattering of electrons with 500 eV -50keV.

キーワード：エンケラドス、土星、電子-中性衝突

Keywords: Enceladus, Saturn, electron-neutral collision