

2015年に行われる金星探査機「あかつき」の金星周回軌道再投入について Venus Orbit Insertion of Venus Climate Orbiter "AKATSUKI" in 2015

中村 正人^{1*}; プラネット C プロジェクトチーム¹
NAKAMURA, Masato^{1*}; PLANET-C, Project team¹

¹ 宇宙科学研究所

¹Institute of Space and Astronautical Science

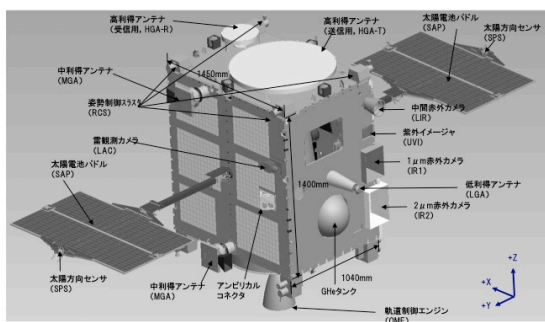
日本の金星探査機あかつきの構想は1990年代からあったが、宇宙科学研究所（当時文部省の国立研究所）の正式ミッションとして認められたのは2001年の事であった。予算不足により開発の着手が2004年にずれ込んだものの、その後の開発は順調で2010年5月に打ち上げられた。その年の12月には金星周回軌道に投入される予定であったが、投入シーケンスの最中に推進系に不具合をおこし、金星を離れて再び太陽を廻る軌道に戻った。後の解析により主エンジンの永久破損が認められ、軌道を制御する能力を大幅に減じられたが、推進系以外の機器は正常に動作しており、非力ながら動いている姿勢制御の為にエンジンを使って2015年末に再び金星周回軌道へ入ろうとしている。

この探査機は米ソ欧州に次いで金星に挑み、科学探査を目的としているが、他国が調べなかった金星特有の現象、金星気象、に的を絞ってこれを明らかにする機器群が搭載されている。金星は自転周期が243地球日と大変遅いのであるが不思議なことに惑星を取り囲む分厚い二酸化炭素の大気は4地球日で惑星を一周している。これを超回転（スーパーローテーション）と呼ぶが、この様に地球と全く異なる気候を金星が持つ理由は地球気象を理解しているはずの気象学では説明出来ない。惑星本体の自転は西向きであり大気の運動も同方向である事から、惑星本体の持つ角運動量を何らかのメカニズムで組み上げていると想像されるが、そのメカニズムについては幾つかの仮説が提唱されていて定量的にどれが正しいかの検証が出来ていない。金星探査機あかつきは観測波長の異なる数台のカメラを搭載し、波長毎に異なる高さの雲や微量気体の動きを追跡して、角運動量が3次的にどの様に運ばれていくかを明らかにする。金星気象の理解は、何時かは地球気象学を越える惑星気象学の構築へと実を結び、我々は地球の気象をもさらに深く理解できるようになるだろう。

本日の講演では本探査計画の目的とそのミッションの始まりから、2010年の失敗、そして2015年の再挑戦の試みに絞って話をします。

キーワード: 金星大気, 惑星探査

Keywords: Venus Atmosphere, Exploration



LASCO/C3 データを用いた金星アルベド年変化の検出 Interannual Variability of Venus Albedo as Inferred from LASCO C3 Data

佐藤 毅彦^{1*}; 榎本 孝之²; 佐藤 隆雄¹
SATO, Takehiko^{1*}; ENOMOTO, Takayuki²; SATO, Takao M.¹

¹JAXA, ²総合研究大学院大学

¹JAXA, ²SOKENDAI

LASCO C3 の視野を通る外合時の金星の明るさを B, V, R, IR の四つのバンドで測定した。データは 1996 年から 2011 年の 15 年分が使用可能である。この研究の動機となったのは、あかつきが 2011 年 3 月に測定した小位相角での金星位相曲線 (Sato et al., 2015) が、それ以前の報告 (Mallama et al., 2006) のものとだいぶ異なっていたことである。LASCO データは、言うまでもなく、地球大気による散乱光を免れているから、太陽の近くに位置する天体の観測には有利である。C3 の視野は 30 太陽半径であり、この範囲を通過する金星については位相角 11 度までの明るさを測定することが可能である。

金星は極めて明るい天体であるから、淡い太陽コロナを捉えるための LASCO のノミナル積分時間 (数百秒) では完全に露光オーバーとなり、結果として検出素子のサチュレーション、電荷転送方向への大きなブルーミングを生じている。われわれは、このようなデータから明るさを積分する方法を開発した。その正当性は、C3 視野中を通る明るい星 (IR バンドでアルデバランとアンタレス) により精度を評価し、測光は ± 10 パーセント程度に安定していることが確認できた。両星が赤色巨星で脈動変光を示すことも考慮すれば十分に高い精度といえる。

金星データの解析の結果、2003 年の外合と 2005 年の外合の間に何か変化があったらしいことが分かった。つまり 1996 から 2003 年データは系統的に、2005 から 2011 年データに比べて 20 パーセントほど明るかったのである。興味深いことに、Mallama et al.(2006) の位相曲線には前者のグループのデータが含まれ、あかつきの観測は後者の時期に含まれている。講演ではデータ測定の詳細や、このような変化の原因の推測について議論を行う。

キーワード: 金星, アルベド, 年変化, SOHO, LASCO, C3

Keywords: Venus, Albedo, Interannual variation, SOHO, LASCO, C3

「ひので」衛星によって観測された金星大気の消散係数と「あかつき」衛星によるリム撮像観測に向けて
The study of Venus transit for the extinction in the atmosphere of Venus and the plan for limb imaging by Akatsuki

金尾 美穂^{1*}; 中村 正人¹; 清水 敏文¹; 大月 祥子²; 今村 剛¹
KANAOKI, Miho^{1*}; NAKAMURA, Masato¹; SHIMIZU, Toshifumi¹; OHTSUKI, Shoko²; IMAMURA, Takeshi¹

¹ 宇宙科学研究所, ² 専修大学

¹JAXA/ISAS, ²Senshu University

「ひので」衛星に搭載された SOT/BFI が 2012 年の金星日面通過時に、金星リムに沿って検出した、太陽光球面からの可視光領域における電磁放射についての解析を引き続き行っている。掩蔽によって地球近傍で観測される電磁放射束の強度は、太陽光球からの電磁放射束の強度、大気中における屈折角度、大気中での消散といったいくつかの要素によって決定される。

同時に観測した太陽光球面の明るさを用いて平均的なリムダークニング曲線を決定し、太陽の放射束強度とする。望遠鏡の視野立体角の、金星大気による広がりや焦点効果を考慮するため、入射太陽光に対する屈折角度の高度プロファイルを計算する。屈折角度は、観測される電磁放射が由来する光球面上での位置の特定にも使用する。

金星大気中の消散は、大気分子による吸収と散乱、雲粒とヘイズによる散乱によって決定づけられる。雲粒によるミー散乱は前方散乱が強く、日面通過のジオメトリーにおける放射伝達方程式に対し放射源関数を無視でき、ビーア・ブーゲー・ランバートの法則を仮定した消散係数の導出が可能である。雲粒とヘイズの密度を高度方向の空間分解 10 km 以上、数密度 1/cc の精度で決定づけたい。雲頂高度における雲模様の濃淡が明瞭に撮像できる紫外光を吸収する物質は、雲粒子や二酸化硫黄と関連が指摘されている。観測波長 388.3nm における大気の消散係数の高度-緯度方向の 2 次元分布を導出し、雲粒とヘイズの数密度の空間分布を議論する。

現在運用中の金星探査衛星「あかつき」は、本年度金星周回軌道への投入が予定されている。軌道上の近点と遠点の間に期間に行うリム観測によって、消散係数をより高い空間分解能で把握し時間発展を捉えることができる。雲粒とヘイズの数密度の 3 次元マップの取得を目的として光学観測機器を用いた撮像計画の検討を行う。

キーワード: 金星大気, ひので, 太陽掩蔽, あかつき, エアロゾル

Keywords: The atmosphere of Venus, Hinode, The solar occultation, Akatsuki, Aerosol

金星昼面 4.7 μm 大気光の地上観測 Ground-based observation of 4.7 μm Venusian airglow

岩上 直幹^{1*}; 細内 麻悠¹; 狩野 咲美¹; はしもと じょーじ²
IWAGAMI, Naomoto^{1*}; HOSOUCHI, Mayu¹; KANO, Sakimi¹; HASHIMOTO, George²

¹ 東京大学, ² 岡山大学
¹ Univ of Tokyo, ² Okayama Univ

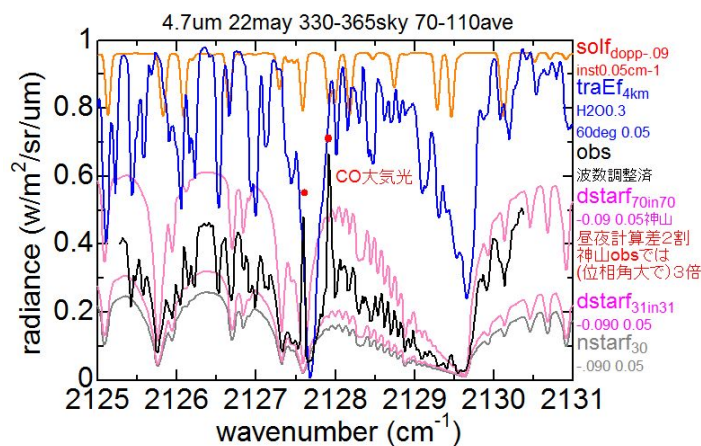
当初、NASA/IRTF へ向けた 2014 年 5 月観測提案は「1.7 μm での 60km 波動検出と欧州 VEX/VMC での 70km UV 波動の比較から大気超回転駆動メカを探る」だった。VEX との同時観測の理解を得ていたのだが、直前になって振られてしまい、「自前でなんとかせねば・・・」ということになった。その結果 5 μm での分光撮像というアイデアがでてきた。

3 μm を超えると雲粒のアルベドが低くなるため雲は黒体となり、かつ深さ 1 が高度 70km 付近で実現するため、70km 波動をみていることになる。こうして 1.7 μm 観測の合間に 5 μm 観測を挟んで実施することになった。5.04 μm はガス線の干渉が最小になると思われる波長、4.7 μm は Kouyama がすばるでフィルタ撮像した波長で、比較用に測定した。

5.04 μm では想定通りスペクトルが再現できたが、4.7 μm では空引き後に輝線が 2 本残るという予想外のことが起こった。図において上から太陽 (橙) 地球吸収 (青) 金星昼計算 (神山条件: 桃) 観測 (黒) 金星昼計算 (5 月条件: 桃) 金星夜計算 (5 月条件: 灰) だが 2127.6 と 2127.9 cm^{-1} に輝線が見えている。2127.7 cm^{-1} に強い地球 CO 吸収線があるので始めは空引きの残差かと思ったが、ドップラーシフトの方向が逆だし空引き前のスペクトルにもディスク上のみで見えているので金星固有と判った。

しかし HITRAN で探しても対応線はなく、「分子でなけりゃ原子か?」とか「ひょっとして新発見?」とか考えていたのだが、検索したらあっさり「金星 4.7 μm 大気光」がわかり、20 年前から知られていたことが判った。(1,0) 帯 P4 線と (2,1) 帯 R2 線で後者が hotband だったため判断が混乱した。前者は光学的に厚いが、後者は薄いので雲上 CO 分布の定量ができる。

キーワード: 金星, 赤外大気光, 地上
Keywords: venus, IR airglow, ground-based



1 金星年内で変化する惑星スケール紫外模様の伝搬周期 The cyclical nature of the propagation of planetary-scale UV feature changes within one Venus year

今井 正亮^{1*}; 高橋 幸弘¹; 渡部 重十¹; 渡邊 誠¹; 神山 徹²

IMAI, Masataka^{1*}; TAKAHASHI, Yukihiro¹; WATANABE, Shigeto¹; WATANABE, Makoto¹; KOUYAMA, Toru²

¹ 北大・理院・宇宙, ² 産総研

¹Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, ²Information Technology Research Institute

Our ground-based Venus observations from mid-August 2013 to the end of June 2014 reveal that the periodical variation in the UV brightness changes within one Venus year and the traveling velocity is dominantly increased. Pioneer Venus spacecraft previously observed the periodical variation of UV brightness with the period 4-5 days, which caused by that the travel of planetary scale UV features [Del Genio and Rossow, 1982, 1990]. They suggested that the period of brightness variation corresponds to the propagation of planetary waves and it changes on a time scale of 5-10 years. Periodicity change can be argued as the vacillation of dynamical states and investigating the source of planetary waves is required to understand the Venus super-rotation.

Used instrument is an imager with 365 nm narrow-band filter installed on 1.6m Pirka telescope, which is operated by Hokkaido University, and we measured the UV brightness from equatorial to mid-latitude regions in both hemispheres. Our observations cover about one Venus year and have superiority for investigating the monthly change as compared to the Pioneer Venus observations.

We have two observational periods when the brightness has the prominent periodical variation. Latter season is considered to keep the periodicity for about two months. In August 2013, we detected about 5.2 days periodical brightness variation in equatorial and both northern and southern mid-latitude region. Bright and dark pattern had a prominent periodical and symmetric structure about the equator and we consider it is derived from a high contrast Y-feature such as previously observed by the Galileo spacecraft. On the other hand, after the mid-September 2013, there was no prominent and periodical brightness variation in the most of the observation time. In this season, the periodical and symmetric brightness structure has a cycle of being clear and unclear, and it suggests the Y-feature has a few weeks variation. From mid-September 2013 to the end of March 2014, periodical variation seems to be lost or one more accelerate and decelerate cycle should exist. In the last two months (from the beginning of May to the end of June 2014), however, it has 3.5 days period and perhaps last for about two months. Our study points out the possibility of the change of dynamical states occur in one Venus year.

Keywords: Venus, Pirka telescope, Super-rotation, UV feature

ミリ波 10mSPART 電波望遠鏡による太陽系地球型惑星の中層大気モニタリング Millimeter-Wave Band Monitoring Observations of the Terrestrial Planets in the Solar System with 10-m SPART Telescope

前澤 裕之^{1*}

MAEZAWA, Hiroyuki^{1*}

¹ 大阪府立大学大学院理学系研究科

¹ School of Science, Osaka Prefecture University

For understanding the influence of the activities of central stars on the middle and lower atmospheres of terrestrial planets in the solar system and of exoplanets, we have been performing monitoring observations of millimeter-waveband spectral lines of carbon monoxide (^{12}CO : $J=1-0$ 230.538 GHz, $J=2-1$ 115.2712018 GHz; ^{13}CO : $J=2-1$ 230.3986765 GHz) in the middle atmospheres of Mars and Venus with a 10-m telescope, Solar Planetary Atmosphere Research Telescope (SPART), since it was launched in 2011. SPART employs highly sensitive 100- and 200-GHz double-band superconducting SIS heterodyne detectors and a 1-GHz-band digital fast-Fourier-transform spectrometer with a frequency resolution of 67 kHz. The heterodyne spectroscopy with high frequency resolution is a powerful tool to trace the weak and narrow spectral lines of minor constituents in the middle atmosphere of planets.

The results obtained with SPART suggest that the disk-averaged mixing ratio of carbon monoxide derived at an altitude of approximately 80 km in Venus has steadily decreased since 2012. The X- and M-class solar events that reached Venus also seem to have decreased from 2012 to 2014. To study the electron production rate induced by solar energetic particles incident at different altitudes of the planetary middle atmospheres, we also developed an analytical model, using which ionization losses are numerically calculated on the basis of the Bethe-Bloch formula. The ionization of carbon dioxide induced by solar-energetic-particle events is considered to increase the production rate of CO. With a basic model under conditions of typically great solar-proton events with incident-proton energies of less than 1 GeV, it was found that the ionization rate reaches its maximum at an altitude of 80-90 km in the Venusian atmosphere. These results suggest that the decrease in CO in the Venusian middle atmosphere may be deeply related to the solar activities.

In this conference, we will present these results and the status of the SPART project.

赤外レーザーヘテロダイン分光器を用いて得られる風速・温度場等の導出精度 Scientific capabilities and measurement sensitivities of the IR heterodyne spectroscopy

中川 広務¹; 佐川 英夫²; 青木 翔平³; 笠羽 康正¹; 村田 功^{1*}; 高見 康介¹

NAKAGAWA, Hiromu¹; SAGAWA, Hideo²; AOKI, Shohei³; KASABA, Yasumasa¹; MURATA, Isao^{1*};

TAKAMI, Kosuke¹

¹ 東北大学, ² 京都産業大学, ³ イタリア宇宙航空機構

¹Tohoku University, ²Kyoto Sangyo University, ³Istituto Nazionale di AstroFisica

我々東北大学では独自望遠鏡(60cmと1.8m鏡)によるハワイ・ハレアカラ山頂での惑星連続観測のために、波長分解能100万を越える超高分解能赤外レーザーヘテロダイン分光器の開発を進めてきた。装置の特筆すべき特徴は、(i)7から10ミクロン帯においてシステム雑音温度3000Kを下回る低ノイズ・高感度を達成、(ii)デジタル分光器を赤外レーザーヘテロダインとして初めて採用し高分解能・大ダイナミックレンジ・高い安定性を達成、(iii)常温駆動量子カスケードレーザを複数搭載し様々な分子を観測可能、が挙げられる。

その高い波長分解能は、(1)分子吸収プロファイルを十分に分解することができるため分子や温度の鉛直プロファイルの取得、(2)輝線から風速や温度を高精度計測、(3)微量成分や同位体などの高精度計測、を可能とする。加えて、サブミリ・ミリ波などの電波ヘテロダイン観測に比べて高空間分解能故に、金星や火星の全球的な空間分布を調べることも可能である。2014年9月にハワイ・ハレアカラ山頂に移設された東北大学60cm望遠鏡に実装され、11月には火星中間圏のCO₂ non-LTE emissionの検出に成功した。2015年3月からの本格始動を間近に控え、本発表では本装置の性能・得られる物理パラメータの導出精度などについて、放射伝達モデルを用いて評価した結果をご報告する。用いた放射伝達モデルは、NICTで開発されたAtmospheric TeraHertz Radiation Analysis and SimUlation (AMATERASU)であり、ベースとなっているのはBaron et al. (2008)やMendrok et al. (2008)に記載のあるMicrowave Observation and Lines Estimation and REtrieval (MOLIERE)である。

R12 970.5472cm⁻¹のCO₂吸収プロファイルをリトリバルすることで、火星・金星の風速・温度場を導出した。火星では地表から高度30kmまで、金星では高度65kmから95kmまでを温度10K以下の精度で導出可能であることがわかった。その鉛直分解能は10km程度と期待される。一方、風速においては、火星では高度10kmから30km付近を高度2層に分離導出でき、金星では高度75kmから90km付近を高度2層に分離導出できるものと期待される。その風速誤差は、積分時間を十分にとれば20m/s程度まで改善できることがわかった。また、CO₂ non-LTE emissionからは、中間圏(火星では75km高度、金星では110km高度)の風速を精度10m/s程度で、温度を精度10K程度で導出することが可能である(関連発表参照)。これらより、下層大気と上層大気がどのように結合しているかを理解するのに重要な中間圏のダイナミクスやその時間変動擾乱を知ることができる。特に、火星では下層で発生する大気波動を介して下層から上層へ物質・運動量が上方輸送される様子や大気散逸への影響、金星では雲層での大気波動がどのように超高層に影響を及ぼすかなどの理解につながるものと期待される。

今年4月から8月にかけて金星観測実施、9月・12月から2月にかけて火星観測を実施し、各惑星のダイナミクスや微量成分の様々なスケールの時空間変動を明らかにしていく予定である。

キーワード: 赤外, ヘテロダイン, 分光, 金星, 火星

Keywords: infrared, heterodyne, spectroscopy, Venus, Mars

地上観測による木星南極域に広がる波構造の時間変化 Time variation of wave structure in Jupiter's south polar region observed with ground-based telescope

合田 雄哉^{1*}; 高橋 幸弘¹; 渡辺 誠¹
GOUDA, Yuya^{1*}; TAKAHASHI, Yukihiko¹; WATANABE, Makoto¹

¹ 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻

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

A Rossby wave plays an important role in atmospheric phenomena on planets. For example, stratospheric sudden warming in the Earth is caused by a Rossby wave. The south polar wave at about 67° S in Jupiter is considered as one of signatures of Rossby wave. Previous observations, such as by Cassini ISS in 2000 or the Hubble Space Telescope (HST) from 1994 to 1999 [Barrado-Izaguirre *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 in System III. 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.

We determine whether or not the wave observed at the edge of the stratospheric haze in south polar region is caused by Rossby wave. Using a methane absorption band filter at 889 nm installed at Multi-Spectral Imager (MSI) of the 1.6 m Pirka telescope, we investigated the meridional and vertical wavenumbers and phase velocity of the observed wave structure and zonal wind speed.

In this presentation, we introduce the results of analysis on the time variation of the wave structure in Jupiter's south polar region in 2011 to 2015 observed by the ground-based telescope. Each result is separated by two weeks to a few months in the periods that we can observe Jupiter. Our results show the wavy structure spreading in longitudinal direction at 67° S. However, our results are different from previous studies in two points. First, we cannot detect an apparent longitudinal motion of the wave structure in our observation periods. Second, there always exist darker areas by about two percent than surrounding longitude in the period of 2011 – 2014. In particular, longitude of about 50° and 130° in System III are always dark. These dark regions at 889 nm suggest that the cloud top altitude at 67° S is lower than pressure altitude of 360 mbar. We think there are another atmospheric structures, such as a local eddy or cloud convection, in Jupiter's south polar region other than those caused by a Rossby wave at 67° S. Our results may suggest that a combination of a planetary Rossby wave and local structure that is less than longitudinal width of 15° exists at about 67° S.

キーワード: 木星, ヘイズ, ロスビー波, 極域, 地上望遠鏡

Keywords: Jupiter, haze, Rossby wave, polar area, ground-based telescope

ニュートン冷却を散逸過程とする強制浅水乱流における赤道西風形成のメカニズムについて
Mechanism for the formation of equatorial superrotation in forced shallow-water turbulence with Newtonian cooling

齋藤 泉^{1*}; 石岡 圭一¹
SAITO, Izumi^{1*}; ISHIOKA, Keiichi¹

¹ 京都大学大学院理学研究科
¹ Graduate School of Science, Kyoto University

木星や土星で観測される縞状の構造とそれに伴って吹く卓越した東西ジェットを説明するモデルとして、惑星大気表面の薄い層における大規模運動を考えるものがある。回転球面上の強制浅水乱流はそのようなモデルの一つで、縞状の構造の出現に加えて、低緯度ほど大きな振幅の東西ジェットや、極付近で顕著になる渦的な運動などの再現に成功している (Scott and Polvani, 2007)。ただこのモデルでは、赤道において木星や土星で見られるような強い西風を再現できないことが問題であった。これに対し Scott and Polvani (2008) は、強制浅水乱流において、散逸過程としてレイリー摩擦ではなくニュートン冷却を採用することで、ロバストな赤道西風を形成することに成功した。

本研究では、上記の赤道西風が以下のメカニズムにより生じることを明らかにした。まず、ニュートン冷却が導入されることにより球面浅水系の固有モードであるハフモードの構造が変形し、等位相線が緯度方向に西向きか東向きに傾く。この構造変形によって各ハフモードは帯状平均流の加速を起こす。ランダムな強制によって励起されるハフモードによって生じる時間発展初期の帯状流加速を、弱非線型の理論に基づいた統計解析により評価した。理論は赤道西風が生じることを予言しており、赤道西風の加速には主にロスビーモード (ニュートン冷却によって位相が西に傾く) が寄与している。理論によって予言される帯状平均流の時間発展は、非線型シミュレーションより得られた、アンサンブル平均した帯状平均流の時間発展と定量的に一致していた。

(本研究は論文として出版済である。詳細は Saito and Ishioka (2015) を参照頂きたい。)

参考文献:

Scott, R. K. and L. M. Polvani, 2007: Forced-dissipative shallow-water turbulence on the sphere and the atmospheric circulation of the giant planets. *J. Atmos. Sci.*, 64, 3158-3176.

Scott, R. K. and L. M. Polvani, 2008: Equatorial superrotation in shallow atmospheres. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L24202.

Saito, I. and K. Ishioka, 2015: Mechanism for the formation of equatorial superrotation in forced shallow-water turbulence with Newtonian cooling. *J. Atmos. Sci.*, in press, now available in Early Online Release form.

キーワード: 木星, 帯状構造, 強制浅水乱流, 赤道西風ジェット, ニュートン冷却, ハフ関数

Keywords: Jupiter, zonal pattern, forced shallow-water turbulence, equatorial superrotation, Newtonian cooling, Hough mode

高速回転する薄い球殻内の熱対流により引き起こされる表層縞状構造の消滅 Disappearance of surface banded structure produced by thermal convection in rapidly rotating thin spherical shells

佐々木 洋平^{1*}; 竹広 真一²; 石岡 圭一³; 中島 健介⁴; 林 祥介⁵
SASAKI, Youhei^{1*}; TAKEHIRO, Shin-ichi²; ISHIOKA, Keiichi³; NAKAJIMA, Kensuke⁴;
HAYASHI, Yoshi-yuki⁵

¹ 京都大学大学院理学研究科数学・数理解析専攻, ² 京都大学数理解析研究所, ³ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ⁴ 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, ⁵ 神戸大学理学研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Mathematics, Kyoto University, ²Research Institute for Mathematical Sciences, Kyoto University, ³Department of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University, ⁴Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, ⁵Department of Earth and Planetary Sciences, Kobe University

木星と土星の表層の流れは、赤道周辺の幅の広い順行ジェットと中高緯度で交互に現われる互いに逆向きの幅の狭いジェットが特徴的である。この表層のジェットが深部領域の対流によって生成されているのか、表層の流体運動の結果なのかは未だに明らかになっていない。流体層の厚さが惑星半径に比して十分小さい「浅い」モデル、すなわち、鉛直方向の静水圧近似の仮定の下で深部からの熱流と太陽加熱によって大気の運動が駆動されるモデルでは、中高緯度の交互に表われる幅の狭いジェットは再現されるものの、赤道域のジェットは必ずしも順行方向とはならない。一方で、流体層の厚さが惑星半径に匹敵する「深いモデル」、すなわち高速回転する球殻中の熱対流モデルでは、赤道域の順行するジェットは容易に生成されるものの、中高緯度の交互に表われるジェットの生成が困難である。

この問題に対して Heimpel and Aurnou (2007) はこれまでに考えられていた深いモデルよりも薄い球殻領域内の深部対流運動を考え、レイリー数が十分大きく内球接円筒での対流が活発な場合に、赤道域の順行流と中高緯度の交互に現われる狭いジェットが共存する状態を数値的に再現した。しかしながら、彼らの研究では経度方向に 8 回対称性を仮定しており、全球の 1/8 の領域の運動しか解いていない。このような領域の制限は流れ場全体の構造に影響を与えている可能性がある。例えば、2 次元乱流的なエネルギーの upward cascade が十分に作用し、互い違いの縞状ジェットが生成されないかもしれない。また、生成される帯状流が不安定となって縞状ジェットが壊されてしまうかもしれない。さらに積分時間が 1600 回転 (0.024 粘性拡散時間) と短いため、統計的定常状態に達しているか定かではない。また、2 次元球面強制乱流の研究によると、長時間積分ののち縞状ジェットが融合消滅し、2, 3 本にまで減ってしまうことが知られている (Obuse et al. 2010) ので長時間積分してみる必要がある。そこで本研究では、Heimpel and Aurnou (2007) の数値実験を全球に拡張して長時間積分を実行し、赤道域および中高緯度領域の帯状流が形成されるか否かを吟味した。

モデルは回転する球殻中のブシネスク流体の方程式系から構成される。方程式系に現われる無次元数である プランドル数を 0.1, エクマン数を 3×10^{-6} , 球殻の内径外径比を 0.85, 修正レイリー数を 0.05 に固定した。境界条件は、温度固定、応力無し条件である。初期には回転系での静止状態にランダムな温度擾乱を加えた。7500 回転まで時間積分したところ、Heimpel and Aurnou (2007) の結果と整合的な赤道ジェットと中高緯度の縞状構造が出現した。しかしながら、さらに時間積分を進めると、中高緯度が全体に西風加速され縞状構造が消滅していき、12800 回転にいたると南北中高緯度に幅広の帯状流がそれぞれ 1 本ずつ出現した。中高緯度の幅広な帯状流の形成は、対流運動で駆動された回転軸方向に一樣な 2 次元渦が地形性ロスビー波として外側へと伝播し、東風角運動量を抜き去ることで西風加速が生じていると考えられる。ただし、中高緯度の幅広ジェットが出現した状態でもいまだに運動エネルギーが増加しつづけているので、統計的定常状態を得るためにさらなる時間積分が必要である。

謝辞: 本研究の数値計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータ (ES2) を用いた。

参考文献: Heimpel, M., Aurnou, J. (2007) *Icarus*, 187, 540–557.
Obuse, K., Takehiro, S., Yamada, M. (2010) *Phys. Fluids*, 22, 056601.

キーワード: 巨大ガス惑星大気, 縞状構造, 赤道加速ジェット流, ロスビー波, 木星, 土星

Keywords: atmospheres of the gas giant planets, banded structure, equatorial prograde jet, Rossby waves, Jupiter, Saturn

金星と火星の大気圏の変化と海水圏形成の最新研究 Recent study of atmosphere change and proposed global water system on Venus and Mars

三浦 保範^{1*}
MIURA, Yasunori^{1*}

¹ 客員 (国内外大学)
¹ Visiting Univ.(In & Out)

はじめに：

地球型惑星の大気と海水は、地球データを元に考察されている。その理由は地球には大量のデータベースが地球人によって作成されているので、それを容易に応用できるからである。本件では海水のない金星や火星の大気海水について新しい面（室内実験）から議論する。

大気圏形成の特徴：

惑星の大気存在は、内部から放出されて惑星全球に広く分散するため、大気ガスの継続的な供給が内部表層からあれば、後は惑星の大きさによってその重力で保持できるかに依存する。金星や火星は赤道面に火山が生成しているため、惑星の回転で継続的に内部の揮発性分子が放出されていた、または現在も継続していると考えられる [1]。

海水圏形成の特徴：

惑星の海水存在は、内部に局部的に水分子イオンなど揮発性元素の存在から、過去に全球の海水圏が存在した理由に使われている。しかし、流体（水や二酸化炭素）の相図からわかるように、液体相は固体と気体各相に介在される場合だけ安定的に生成し残存できる [2, 3]。そのため、大気層のない天体惑星には海水圏は存在できない。大気圏のある惑星（金星・火星）には、理論的に海水圏ができる環境があるが、局地的な内部流体だけでは全球の海水圏が形成維持できる量になるかは別の困難な問題がある。

大気圏組成の変化の課題：

創世期の惑星の大気組成は二酸化炭素ガスが主体で、その大気組成を変化させるとその惑星の将来の居住的活動利用に重要な課題である。冷たい炭酸ガス（火星）は熔融や固化が可能であるので現実的に大気変化できる。しかし高温の炭酸ガス（金星）はその変化が一般に容易でないので大気変化も困難である。惑星運動と地球の人工的（工場廃棄物）ガス処理法を利用すると、今後工夫次第で全球に可能である [4]。

海水圏の形成の可能性：

地球の固体密度が地球型惑星で最大なのは、内部固体内部の揮発性元素が活動的に放出分離して大気・海水圏を形成したからでもある。金星も固体密度が高いが、大気圏だけの形成である。そのため、金星と火星に海水圏を形成するには、継続段階的な作成法と内部局部揮発性元素を急速に地中から放出して急冷流体にして全球で循環する動的惑星化法がある。地球の惑星間巨大衝突時の全球的な流体形成保持法は後者の自然的な形成過程である。金星と火星において、惑星活動と人工的な科学技術法 [4] の駆使などにより、全球的な海水圏を作る有効的な提案ができる。

まとめ：

- 1) 海水のない金星や火星の大気・海水の形成について室内実験をもとに新提案できる。
- 2) 金星や火星は、惑星の回転で内部の揮発性分子が放出されたものである。
- 3) 大気圏のある惑星（金星・火星）には、全球海水圏ができる環境がある。
- 4) 冷たい炭酸ガス（火星）と高温の炭酸ガス（金星）の全球変化は手法と過程で可能である。
- 5) 金星と火星に全球海水圏を人工的に形成するには、惑星活動と適切な反応過程で提案可能である。

参考文献：[1] Miura Y. (2011): International Venus Workshop・VEXAG Meeting #9 (Chantilly, Virginia). #1, 2.
[2] Miura Y. et. al. (1996) Antarctic Meteorites XX1(Tokyo), 107-110.
[3] Miura Y. (2015): LPSC2016 (LPI), #1811, 1666.
[4] Miura Y. (2009): Patent application.

キーワード: 金星, 火星, 大気圏, 海水圏, 組成変化, 高温二酸化炭素
Keywords: Venus, Mars, Air system, Sea water system, Compositional change, Hot carbon dioxides

金星昼側電離圏における磁気リコネクションのMHDシミュレーション An MHD simulation study of magnetic reconnection in the dayside Venusian ionosphere

阪本 仁^{1*}; 寺田 直樹¹; 笠羽 康正¹
SAKAMOTO, Hitoshi^{1*}; TERADA, Naoki¹; KASABA, Yasumasa¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku University

金星や火星は惑星スケールの固有磁場を持たない惑星であるが、太陽風との直接相互作用の結果、その電離圏や磁気圏尾部で磁気リコネクションが発生すると考えられている。近年、非磁化惑星における磁気リコネクションは、Mars Global Surveyorの磁場と電子の観測によって、火星の高度400kmにおける発生頻度分布等が明らかにされつつある [Halekas et al., 2009] が、軌道の制約で他の高度域における発生頻度はよくわかっていない。また、磁気リコネクションが非磁化惑星電離圏の構造とダイナミクス決定において果たす役割も、両者の繋がりが観測で捉えられていないため不明な点が多い。これらの理解には観測的な研究だけでなく理論的な研究も求められており、我々は金星や火星の昼側電離圏における惑星間空間磁場 (IMF) の回転に起因する磁気リコネクションを二次元多成分磁気流体力学 (MHD) シミュレーションにより調査している。

IMFの回転にともなう磁気リコネクションは、いくつかの金星・火星電離圏周辺の未解明現象に関連する可能性があることが、その観測確率や空間分布等から推測される。一つ目の現象は、金星や火星の電離圏からの“プラズマ雲”の放出である [Brace et al., 1981; Crider et al., 2004]。この現象は、IMFの向きが変化する時に観測確率が高くなることが報告されており [Ong et al., 1991]、“プラズマ雲”はIMFの回転にともなう磁気リコネクションの結果として放出された可能性がある。二つ目の現象は、磁力線がロープのようにねじれた“フラックスロープ”と呼ばれる磁場の微細構造の存在である [Russell and Elphic, 1979; Cloutier et al., 1999]。フラックスロープは、太陽風の動圧が低いときに、電離圏の下部で最もよく観測される [Elphic et al., 1983]。この成因について、電離圏界面におけるケルビン-ヘルムホルツ不安定性 [Wolff et al., 1980] や、下部電離圏における非線形効果 [Kleeorin et al., 1994] など様々な説が提唱されている。なかでも Dreher et al. [1995] は、数値シミュレーションを用いて、IMFの回転にともなう磁気リコネクションが成因であるという説を唱えている。

本発表では、金星昼側電離圏における磁気リコネクションの時間発展や、形成されるプラズモイドの空間構造の、二次元多成分MHDシミュレーションによる再現状況を報告する。具体的には、リコネクションが発生する高度、リコネクションの進行の時間スケール、形成されるプラズモイドの空間スケール等について述べる。ここまでの結果では、Lundquist数が 10^6 以上の高度240km以上において、電流シート内の多点で磁気リコネクションが発生し、プラズモイドが形成された。またインフローの状態と速い抵抗性リコネクションの成長時間 [Loureiro et al., 2007] が、リコネクションの発生高度を決める重要な要素になることが明らかになった。ある高度より上部では、電流シートの両側からプラズマが流入しており、リコネクションが起こりやすい状態になっていたが、それより下部の領域では金星電離圏固有の強い下向きの流れによって電流シートの下部からの流入が抑制され、リコネクションレートが低下していた。加えて、リコネクションが確認されなかった下部領域では、典型的な磁場の輸送時間と同程度かそれより短いことも明らかになった。この研究を進めることで、金星や火星の昼側電離圏におけるリコネクション事象がプラズマ雲放出やフラックスロープの原因たりうるか検証する。

キーワード: 金星, 電離圏, 磁気リコネクション

Keywords: Venus, ionosphere, reconnection

紫外線望遠鏡による系外惑星観測計画の検討状況 UV Space Telescope for extrasolar planetary systems

亀田 真吾^{1*}; 池澤 祥太¹; 村上 豪²; 成田 憲保³; 生駒 大洋⁴; 関根 康人⁴; 吉川 一朗⁴; 杉田 精司⁴
KAMEDA, Shingo^{1*}; IKEZAWA, Shota¹; MURAKAMI, Go²; NARITA, Norio³; IKOMA, Masahiro⁴;
SEKINE, Yasuhito⁴; YOSHIKAWA, Ichiro⁴; SUGITA, Seiji⁴

¹立教大学, ²JAXA, ³国立天文台, ⁴東京大学

¹Rikkyo University, ²JAXA, ³NAOJ, ⁴The University of Tokyo

1995年に系外惑星が発見されてから数多くの観測が行われ、検出された惑星の数は現時点で1800を超えている。そのうちの多くの惑星は太陽系における水星軌道よりも内側を周回しており、主星からの強い紫外線放射で大気が加熱され大規模な大気散逸が起きていると推測される。また、一部の惑星では大気組成に関する情報が得られている。地球から見て主星の前を惑星が通過する際に、主星の光を遮蔽するトランジット現象を利用して、数多くの惑星が検出されている。大気を持たない惑星においては、トランジット時における主星光の減光率は波長に依存しないが、大気を持つ惑星の場合、大気中に含まれる原子・分子が、特定の波長の光を吸収・散乱するため、分光観測によって大気組成に関する情報が得られる。

HD209458bは、その直径が木星半径の1.4倍であるのに対し、公転軌道半径が0.047AUとなっており、ホットジュピターと呼ばれる惑星である。この惑星については、ナトリウム、水素、マグネシウム、H₂Oなどの大気成分が検出されている。水素はハッブル望遠鏡によるLy α 線の観測により検出されており、トランジット時の減光率から惑星半径の3倍まで光学的に厚い水素大気が広がっていることが示されている。このことから、この惑星では太陽系では起きていないような非常に激しい大気散逸現象が起きていることが分かる。他にも大規模な大気散逸現象が予想される惑星が複数見つかった。

このような現象を捉えるために、トランジット時に紫外から赤外域までの幅広い領域において分光観測を実施する必要があるが、数年のうちに運用停止を迎えるハッブル宇宙望遠鏡以外に紫外域の観測が行える望遠鏡は存在しない。またNASAやESAで提案されている将来計画においても観測波長域は可視-赤外であり、ロシアが多目的の大型紫外宇宙望遠鏡(1.7m)の開発を進めているものの、打ち上げ年度は未定である。そこで、我々は系外惑星系観測に特化した小型の紫外宇宙望遠鏡の検討を進めている。本発表では、本計画の科学目標と海外の動向を紹介し、検討状況の報告を行う。

キーワード: 系外惑星, 紫外線, 宇宙望遠鏡

Keywords: exoplanet, ultraviolet, space telescope

水星ナトリウム大気の長期時間変動 Long-term temporal variation of Mercury's sodium exosphere

安田 竜矢^{1*}; 亀田 真吾¹; 鍵谷 将人²; 米田 瑞生²; 岡野 章一²
YASUDA, Tatsuya^{1*}; KAMEDA, Shingo¹; KAGITANI, Masato²; YONEDA, Mizuki²; OKANO, Shoichi²

¹立教大学, ²東北大学

¹Rikkyo University, ²Tohoku University

水星は極めて希薄な大気を持つ。水星大気に対してこれまでに、水星探査機 Mariner 10 と MESSENGER による観測、および地上観測が行われてきた。これらの観測により、大気中に H、He、O、Na、Mg、K、Ca が存在することが知られている。これらの原子は太陽光のエネルギーを受けて共鳴散乱により発光する。これらの中でもナトリウムは発光強度が高く、地上観測に適しているため多くの観測が行われてきた。水星のナトリウム大気の生成過程は、太陽光による表面原子の脱離、太陽風イオンによるスパッタリング、微小隕石の衝突による水星表面や隕石中の原子の気化などが考えられている。これらの過程は複合して起こると考えられているが、主な生成過程は未だ明らかにされていない。

本研究ではハワイ・ハレアカラ観測所の口径 40cm のシュミット・カセグレン式望遠鏡、高分散エシェル分光器、および CCD カメラを使用して水星ナトリウム大気光の分光観測を行い、水星大気中のナトリウム原子数の日ごとの変動を調べた。水星は太陽に最も近い惑星であるため、観測に適した時間は限られている。私たちは水星と太陽の離角が 15 度以上の時期に、日の出前または日没後の 30 分から 1 時間程度の時間内に観測を行った。地上から観測できる大気光は昼側全体ではなく一部であり、観測できる大気光の割合は位相角によって変化する。そのため一定の大気温度を仮定した大気モデルをもとに、位相角ごとに観測可能な大気光の割合を計算し、昼面全体のナトリウム原子数を推定した。

惑星間空間の微小隕石はある平面（ダスト対称面）に集中して対称に分布することが知られているが、水星近傍における詳細な分布は知られていない。私たちは大気生成に対する微小隕石衝突の寄与を検証するために、Kelsall et al. [1998] による隕石分布モデルを単純化して用い、大気中のナトリウム原子数との相関が最大になるときのモデルのパラメータを求めた。その際、ダスト対称面の軌道傾斜角と昇交点黄経は、Helios1,2 による黄道光の観測により求められた値を用いた。その結果、相関係数 $r=0.856$ の強い相関が示された。この結果は微小隕石の衝突が大気生成に大きく寄与していることを示唆している。

微小隕石の衝突は惑星表面下から物質を拡散し新しい表面を露出させる効果（ガーデニング効果）を持ち、また隕石自体にナトリウム原子を含むため、水星表面にナトリウム原子が供給されると考えられている。これらの効果により、微小隕石衝突は表面原子を気化して放出させるだけでなく、他の過程による大気生成を増加させる過程としても重要であると考えられる。

キーワード: 水星, 外気圏

Keywords: Mercury, exosphere

オフセットダイポールを含む水星磁気圏における重イオンの運動論 Heavy ion kinetics in Mercury magnetosphere with offset dipole

八木 学^{1*}; 関 華奈子²; 松本 洋介³; Delcourt Dominique⁴; Leblanc Francois⁴
YAGI, Manabu^{1*}; SEKI, Kanako²; MATSUMOTO, Yosuke³; DELCOURT, Dominique⁴; LEBLANC, Francois⁴

¹ 東北大学惑星プラズマ・大気研究センター, ² 名古屋大学太陽地球環境研究所, ³ 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

¹PPARC, Tohoku University, ²STEL, Nagoya University, ³Chiba University, ⁴CNRS

Based on observations by MESSENGER, Mercury magnetosphere is thought to be a miniature of the Earth 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. 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. We performed four solar wind conditions of the northward IMF, and the results showed that the global configurations such as the location of magnetopause depend heavily on the dynamic pressure, while the solar wind electric field contributes little to the magnetospheric configuration. On the other hand, the results of statistical trajectory tracings of exospheric sodium ions depend not only on the dynamic pressure but also on the solar wind electric field. In the results, we identified two efficient acceleration processes and formation of the sodium ring which is formed by the accelerated ions drifting around the planet by magnetic gradient of the dipole field. When the solar wind dynamic pressure is low, acceleration by magnetospheric convection is efficient in the vicinity of Mercury. When the dynamic pressure is high, entry of the accelerated ions picked-up in the magnetosheath into the magnetosphere becomes dominant. The entry point of sodium ions changes due to the variation of the solar wind electric field, which causes a difference in the sodium ring's shape for the same solar wind dynamic pressure cases. Recent observation by MESSENGER revealed the weaker dipole field of Mercury than the past estimation based on Mariner 10 as well as large offset of dipole which could change the global configuration of Mercury magnetosphere and behavior of sodium ions. In the presentation, we will also discuss the ongoing simulation including the above configuration of intrinsic magnetic field of Mercury especially focus on how will this affect the distribution of sodium ions and its acceleration mechanisms.

キーワード: 水星磁気圏, 磁気流体, テスト粒子, ナトリウムイオン, オフセットダイポール
Keywords: Mercury magnetosphere, MHD, test particle, sodium ion, offset dipole

高解像度土星磁気圏シミュレーションにおける渦構造の形成 Formation of vortex configuration in the high resolution simulation of Kronian magnetosphere

深沢 圭一郎^{1*}

FUKAZAWA, Keiichiro^{1*}

¹ 京都大学学術情報メディアセンター

¹ Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University

In a series of our simulation studies we have found turbulent convection and vortices formed at Saturn's dawn and dusk magnetopause in simulations when IMF was northward. We interpreted these vortices as resulting from the Kelvin Helmholtz (K-H) instability. The resolution of simulation is important parameter for formations of vortex and turbulent convection to catch the small configuration of convection which can be a trigger of vortex. Recently we can perform the higher resolution simulation (0.06Rs) of our previous simulation (0.3 or 0.1Rs) thanks to the evolution of computer technologies. In this study we run the simulation of Kronian magnetosphere with various IMF conditions to see the configuration of vortex and magnetospheric convection.

As the results of simulations the vortex does not appear in the no IMF and weak northward IMF condition. Adding the mean magnitude of northward IMF, we obtained the vortex along the magnetopause in the dawn and dusk. The difference of overall configuration between the weak and normal northward IMF is formation of vortex and other configurations very resemble. From these results we will discuss the formation condition of vortex in the Kronian magnetosphere and their configurations.

キーワード: 土星磁気圏, 数値シミュレーション

Keywords: Kronian magnetosphere, numerical simulation

LWA1で観測された木星電波モジュレーションレーンの微細構造 Fine structure of Jupiter's decametric modulation lanes observed by LWA1

今井 一雅^{1*}; 島内 良章¹; 今井 雅文²; Clarke Tracy³; Higgins Charles A.⁴

IMAI, Kazumasa^{1*}; SHIMANOUCI, Yoshiaki¹; IMAI, Masafumi²; CLARKE, Tracy³; HIGGINS, Charles A.⁴

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

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

The Long Wavelength Array (LWA) is a low-frequency radio telescope designed to produce high-sensitivity, high-resolution images in the frequency range of 10-88 MHz. The Long Wavelength Array Station 1 (LWA1) is the first LWA station completed in April 2011, and is located near the VLA site in New Mexico, USA. LWA1 consists of a 256 element array, operating as a single-station telescope.

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. At frequencies in the vicinity of 22 MHz, most modulation lane patterns have frequency-time slopes between +100 and +180 kHz/sec for Io-B storms and between -90 and -200 kHz/sec for Io-A and Io-C storms. The lanes generally display a strong periodicity in time, with periods ranging from about 1 to 5 sec and an average of about 2 sec.

We refer to the modulation lanes possessing frequency-time slopes and periodicity within the above ranges as the major component. There is a minor modulation lane component, representing a considerably smaller fraction of the total number observed, for which the frequency-time slopes are of opposite sign than for the major component or are of the same sign but of smaller absolute value. For these cases the lanes are usually broader and their separations in time are longer.

There are significant differences of characteristics between the major and the minor components of modulation lanes. Minor component lanes are apparently of somewhat different origin from major component lanes. We show the fine structure of the major and minor modulation lanes observed by the LWA1. The origin of minor modulation lanes is discussed.

キーワード: 木星電波, デカメートル波, モジュレーションレーン, 微細構造

Keywords: Jupiter radio, decametric wave, modulation lane, fine structure

木星デカメータ電波スペクトルに基づく氷衛星地下海探査の実現可能性 Feasibility of the exploration of the subsurface ocean of Jupiter's icy moon by Jovian decametric radiation spectra

熊本 篤志^{1*}; 笠羽 康正¹; 三澤 浩昭¹; 土屋 史紀¹

KUMAMOTO, Atsushi^{1*}; KASABA, Yasumasa¹; MISAWA, Hiroaki¹; TSUCHIYA, Fuminori¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹Tohoku University

Subsurface liquid ocean of the Jupiter's icy moons, which is suggested by several studies, is one of the most important targets in the Jovian exploration missions. We propose a new method for determination of the depth of the boundary between the icy crust and liquid ocean below the icy crust by using interference patterns found in the spectrogram of the Jovian decametric radio emissions (DAM). If we can operate a wave receiver onboard the icy moon orbiter, we can obtain spectrograms of the DAM propagated from Jupiter. Because the emissions directly from Jupiter can be interfered with the emissions reflected at the icy moon's surface and subsurface boundaries, we will find interference patterns in the measured spectrograms. In case of the Moon, the lunar orbiter SELENE detected the interference patterns in the spectrograms of auroral kilometric radiation (AKR) [Ono et al., 2010]. Because the interference occurs between AKR directly from the earth and AKR reflected at the lunar surface, the amplitude of the interference patterns are almost constant. In case of Jupiter's icy moons, DAM directly from Jupiter, DAM reflected at the icy crust surface, and DAM reflected at the boundary between icy crust and liquid ocean are interfered with each other. Due to slight phase difference between DAM emissions reflected at the surface and subsurface boundaries, the amplitude of the interference patterns will be modulated. The depth of the liquid ocean can be determined the frequency width of the modulation. Assuming that the frequency of DAM is ~25 MHz, the permittivity of the icy crust is 3, permittivity of the liquid ocean is 87, loss rate in the icy crust is 1 dB/km, and the depth of the ocean is 5 or 10 km, spacecraft and receiver's specifications needed for measurement of the interference patterns in the spectrogram are as follows: (1) Spacecraft height below 200 km, (2) Receiver bandwidth of <1 kHz, and (3) Receiver level resolution of <5 dB. In addition, the following two issues have to be considered in actual application of this method: (a) DAM itself has band structures in the spectrogram due to anisotropy of the emission at the source. (b) The roughness of the surface and subsurface boundaries have to be within the wavelength (~10 m) in order that the interference occurs.

キーワード: 木星の氷衛星, 地下海, 木星デカメータ電波, 干渉

Keywords: Jupiter's icy moon, Subsurface ocean, Jovian decametric radiation, Interference

惑星観測を目指した極周回成層圏望遠鏡 FUJIN The Circumpolar Stratospheric Telescope FUJIN for Observations of Planets

前田 惇徳^{1*}; 田口 真²; 荘司 泰弘³; 中野 壽彦⁴; 高橋 幸弘⁵; 今井 正堯⁵; 合田 雄哉⁵; 吉田 和哉⁶; 坂本 祐二⁶

MAEDA, Atsunori^{1*}; TAGUCHI, Makoto²; SHOJI, Yasuhiro³; NAKANO, Toshihiko⁴; TAKAHASHI, Yukihiro⁵; IMAI, Masataka⁵; GOUDA, Yuya⁵; YOSIDA, Kazuya⁶; SAKAMOTO, Yuji⁶

¹立教大学大学院理学研究科, ²立教大学理学部, ³大阪大学大学院工学研究科, ⁴大分工業高等専門学校機械工学科, ⁵北海道大学大学院理学院, ⁶東北大学大学院工学研究科

¹Graduate School of Science, Rikkyo University, ²Department of Science, Rikkyo University, ³Graduate School of Engineering, Osaka University, ⁴Mechanical Engineering, Oita National College of Technology, ⁵Graduate School of Science, Hokkaido University, ⁶Graduate School of Engineering, Tohoku University

惑星の大気圏やプラズマ圏で起こる変動現象を研究するためには、長時間の連続観測が重要である。惑星観測は、探査機による観測や地上観測（地上望遠鏡や飛翔体搭載望遠鏡）により水星、金星、火星、木星などの惑星について様々な観測が行われ、数々の知見が得られている。惑星探査機は惑星の近くで高い空間分解能で観測できるというメリットがあるが、軌道上の位置変化のため常に同じ方向、条件で観測することができず、単一の探査機では10年スケールの長期変動は検出できない。また、軌道周期と重なる時間スケールの変動現象の検出にも不向きである。一方、地上観測は惑星に対して一定の方向から長時間連続観測ができ、大口径の望遠鏡の利用によって探査機搭載カメラに迫る空間解像度が達成できる。探査機の観測は数年の短期集中観測であるが、探査機が観測していない期間を地上観測によって補完することで、そして地上の様々な天文台で観測されたデータを集めると、数10年スケールでの変動現象の検出が可能である。探査機による観測データからのアウトプットを最大限に引き出すためにも、地上観測の重要性は増していると言えるだろう。そこで、我々は気球を用いて極域成層圏に浮かべた光学望遠鏡による惑星連続観測を目指したFUJINプロジェクトを提案し、遂行している。FUJINプロジェクトの2号機FUJIN-2はスウェーデン・キルナのESRANGEからの極周回フライトへ向けて開発中である。2016年7~8月のウィンドウに放球され、2~3週間のフライトの後、スカンジナビア半島内で回収される計画である。

今までのFUJINミッションの研究対象はこれまで金星がメインだったが、金星は相変化をするため、観測時期を自由に選べない気球実験では、計画が立てづらい。そこで、FUJIN-2は今の期間を除きほぼ1年間同じような条件で観測できる木星を主研究対象とした。可視近赤外領域において最も深いメタン吸収バンド（波長~890nm）で木星を撮像し、木星極域に広がる明るいヘイズ領域に見られる波動構造と背景風速度を導出することで、波動構造がロスビー波であることを判別するために必要なパラメーターの取得を目指す。また木星の積乱雲を検出し、ゾーンやベルトなどの大規模構造との位置関係を調べることで、積乱雲の形成条件を明らかにする。

極周回フライトの電力解析を行った。FUJIN-2は日照中は公称最大出力540Wの太陽電池パネルで発電し、日陰中はリチウムイオンバッテリーから電力を賄う。FUJIN-2のフライト条件下では、搭載される太陽電池パネルは2016年7月1日から2週間の連続フライトでは日照中に330W以上の発電が可能であると見積もられている。日照中の余剰電力でリチウムイオンバッテリーを充電することを考慮すると、日照中は330W、日陰中は191Wの電力を観測機器に供給可能である。

フライト時、デカップリング機構(DCP)とコントロールモーメントジャイロ(CMG)を使用して姿勢制御を行う。現在までに試作したCMGをフライト環境(高度32km)における実力値を推定するために、成層圏環境での動作試験をした。この試験結果より、必要な電力が18W、6600RPMに達するまで120分の時間が必要であるという結果が得られた。フライト環境のみを考えれば、現在の設計で十分対応が可能である。しかし、大気圧下でCMGを回転させると風損により800RPMまでしか速度が上がらないので、フライホイールを収納する気密容器を取り付け、内部を排気することで地上試験時も成層圏環境の能力が発揮できるように設計した。

望遠鏡の主鏡、副鏡の光学性能を評価するためにハルトマンテストを行う。ハルトマンテストに用いる一定の間隔で穴を開けたハルトマン板を設計、作成した。平行光を得るために恒星を望遠鏡視野内に導入する予定である。この試験結果より光学系の光軸及び望遠鏡の最適な状況を決定する。また成層圏での撮像能力を評価するために、成層圏環境でのハルトマンテストを実施する予定である。

現在、ゴンドラ制御系(CMG及びDCP)、モーター駆動回路、CCDカメラインターフェース部、フード及び回転機構、電源系気密容器を製作している。今後の開発スケジュールは、まず、望遠鏡の光軸を調整し、解像度を確認する。全てのサブシステムがそろったところで、成層圏環境を模擬した熱真空試験を行う。この試験結果により、ヒーター電力を見積もり、最終的な消費電力を決定する。2016年3月までに各種試験を終了し、観測へ向けて機材を搬出する。

キーワード: FUJINプロジェクト, 木星, 極域成層圏, 連続観測, 気球, FUJIN-2

PCG32-P02

会場:コンベンションホール

時間:5月26日 18:15-19:30

Keywords: FUJIN project, Jupiter, the polar stratosphere, continuous observations, balloon, FUJIN-2

赤外レーザーヘテロダイナミクス分光による地球型惑星中間圏の風速場/温度場計測の誤差評価 Mesospheric wind/temperature measurements in the terrestrial planetary atmosphere using the IR heterodyne spectroscopy

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
TAKAMI, Kosuke^{1*}; NAKAGAWA, Hiromu¹; SAGAWA, Hideo²; AOKI, Shohei³; KASABA, Yasumasa¹; MURATA, Isao¹

¹ 東北大学, ² 京都産業大学, ³ イタリア宇宙航空機構

¹Tohoku University, ²Kyoto Sangyo University, ³Istituto Nazionale di AstroFisica

地球型惑星の中間圏は下層の濃い大気と上方の宇宙へと散逸していく大気の接続領域となっている。また、地上からの伝搬してくる重力波がこの領域で碎波し、運動量とエネルギーの受け渡しが行われ、風速、温度の擾乱が起り、変化が激しい特徴を示す領域でもある。このように、惑星中間圏の研究は大気の上下結合、すなわち下層大気の活動が大気散逸にどのように影響を与えるのかを理解するのに非常に重要であるが、未解明なことが多く存在している。火星では、超高層で CO₂⁺ や O₂⁺ など、重イオンの散逸量が理論値を大幅に上回る量が観測されており [Carlsson et al.,2006]、このような重いイオンを下層から上層に上方伝播させるメカニズムが不明である。金星では、スーパーローテーションと昼夜間対流の遷移領域の様相が未だ不明となっている。下層大気中で発生した大気波動が運動量、エネルギー、物質の輸送に大きく寄与していることが先行研究によって指摘されているものの、定量的な理解が進んでいない。その理由として、下層と上層を繋ぐ結合領域である中間圏の観測が不足している事が挙げられる。中間圏の風速や温度場を高精度に観測する事が出来れば、大気波動がどのように大気上下結合に影響を与えているか知る事が出来る。

中間圏の風速、温度の算出する一つの方法として、中間圏で発光する CO₂ の non-LTE emission から求める方法があるが、従来の分光法では波長分解能が不足して emission が見えず、解析が不可能である。これを観測するためには、高い波長分解能が必要であるため観測例が少ない。サブミリ・ミリ波観測による CO 観測から風速、温度を導出する先行研究が報告されているが、ビームサイズが大きく空間分解能が不足している。本研究では CO₂ の non-LTE emission を観測するため、超高分解能の赤外レーザーヘテロダイナミクスを用いる。このヘテロダイナミクス分光は理想的な波長分解能は ~ 10⁷ に達し、サブミリ・ミリ波観測よりはるかに高い空間分解能、60cm 望遠鏡 10μm で ~3.5" を持つ。

本発表ではケルン大学で開発された赤外ヘテロダイナミクス分光器 Tuneable Heterodyne Infrared Spectrometer (THIS) のデータを用いて、金星の風速・温度場の導出方法とその導出精度について議論する。使用するデータは、アリゾナ州キット・ピーク国立太陽観測所の望遠鏡に THIS を取り付け、2009年6月4日の金星朝側周縁南緯 33° を積分時間 20 分で観測したものである。高度 110km 付近の CO₂ non-LTE emission から、風速はドップラーシフト量、温度は半値幅から直接的に導出することができる。その結果、風速 ±11m/s、温度 184±12K の精度で導出できることが明らかになった。誤差は emission line をガウスフィットし、 $\chi^2 \leq 1$ として求めた。得られた誤差は火星・金星大気の大気擾乱 (火星で 5-35K、金星で 5-40K [Deming and Mumma, 1983]) を観測するのに十分な精度であり、波長分解能から期待される風速誤差 (±10m/s) と近い値である。導出された温度は Pioneer Venus プローブ ([Clancy et al.,2008]) によって得られたその場観測の結果と良い一致を示す。

本研究で確立した導出方法を 2015 年 3 月からハワイ、ハレアカラ山頂にて本格稼働する東北大学独自の赤外ヘテロダイナミクス分光器によって得られる火星、金星スペクトルに適用することで、地球型惑星大気中間圏の解明に貢献していく予定である。

キーワード: 中間圏, 赤外, ヘテロダイナミクス, 誤差, 火星, 金星

Keywords: mesosphere, infrared, heterodyne, error, Mars, Venus

Cassini 探査機搭載 ISS データを用いた木星対流圏エアロゾルの推定 Jovian tropospheric aerosols inferred from the Cassini ISS limb-darkening data

佐藤 隆雄^{1*}; 佐藤 毅彦²; 榎本 孝之³; 笠羽 康正⁴
SATO, Takao M.^{1*}; SATOH, Takehiko²; ENOMOTO, Takayuki³; KASABA, Yasumasa⁴

¹ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ³ 総合研究大学院大学, ⁴ 東北大学
¹Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ²Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ³The Graduate University for Advanced Studies, ⁴Tohoku University

木星表層の雲には、東西に延びる帯状構造 (白色に見える部分を zone, 茶褐色に見える部分を belt とよぶ) や大赤斑に代表される渦構造等の特徴がある。これらの模様の違いは、雲層構造やエアロゾルの光学的特性の違いを反映している。これらの物理情報をリモートセンシング手法から得るためには、エアロゾルによる多重散乱を扱う必要があり、その散乱特性 (散乱位相関数) の理解が必要不可欠となる。

我々は、Cassini 探査機に搭載された Imaging Science Subsystem (ISS) の木星フライバイ観測データ (観測期間: 2000 年 - 2001 年 3 月, 太陽位相角: $0^\circ - 140^\circ$) を用いて、エアロゾルの散乱位相関数を推定してきた。この研究では、2 波長 (BL1: 有効波長 455 nm, CB2: 有効波長 750 nm) で観測された典型的な zone (the South Tropical Zone: STrZ) と belt (the north component of the South Equatorial Belt: SEBn) 領域について解析を行った。簡便のため、エアロゾルの散乱には Mie 散乱理論を適用できると仮定した。この仮定のもとに得られたエアロゾルの屈折率は $n_r = 1.85$ となり、表層雲を構成していると考えられてきた NH₃ 氷の実験値 ($n_r = 1.42$) より、はるかに大きい値となった。この結果は、NH₃ 氷が分光観測によって見つかっていないという先行研究を支持するものである。

一方で、対流圏に浮かぶエアロゾルは非球形粒子であると考えられてきた。球状粒子の散乱を記述する Mie 散乱理論の適用については、常に議論をよぶ問題である。そこで我々は、いくつかの非球形粒子の散乱位相関数と Cassini 探査機データから得られた Mie 散乱位相関数を比較することで、Mie 散乱理論のもとに得られた結果のどこまでがロバストな結果であるのか評価した。非球形粒子として回転楕円体を仮定し、さまざまな屈折率、有効半径、長軸短軸比の組み合わせに対して、それらの散乱位相関数を計算した。散乱位相関数の導出には、T-matrix 法を用いた。これによると、表層雲の候補である NH₃ 氷 ($n_r = 1.42$) に近い屈折率 ($n_r = 1.45$) をもつ回転楕円体の散乱位相関数は、有効半径や長軸短軸比に関係なく、Cassini 探査機データから得られた Mie 散乱位相関数に比べ、後方散乱が弱いことが分かった。このような散乱位相関数の形状では、観測データを再現することは不可能である。一方、高屈折率 ($n_r = 1.85$) である回転楕円体の散乱位相関数の中には、散乱の強さ、位相関数の形状ともに、Cassini 探査機データから得られた Mie 散乱位相関数に類似するものがあり、実際に観測データを再現できるか試行する価値がある結果を得た。このことから、非球形粒子にまで目を向けた場合でも、表層雲は純粋な NH₃ 氷からなるわけではない、と言えるだろう。

本発表では、実際に非球形粒子の散乱位相関数を用いたモデル計算結果と観測データの比較も含めて、議論する。

キーワード: 木星, 雲構造, 放射伝達, Cassini 探査機

Keywords: Jupiter, cloud structure, radiative transfer, Cassini

NIIHAMA カメラ及び SOLAR-C 望遠鏡による金星の赤外偏光撮像観測 Infrared imaging-polarimetric observations of Venus with NIIHAMA and SOLAR-C on Haleakala

榎本 孝之^{1*}; 佐藤 毅彦²; 米田 瑞生³; Kuhn Jeff⁴
ENOMOTO, Takayuki^{1*}; SATOH, Takehiko²; YONEDA, Mizuki³; KUHN, Jeff⁴

¹ 総合研究大学院大学, ² 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部, 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, ⁴ ハワイ大学天文学研究所

¹SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), ²Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, ³Planetary Plasma and Atmospheric Research Center, Graduate School of Science, Tohoku University,

⁴Institute for Astronomy, University of Hawaii

To best utilize the polarization data from Venus, as a useful tool to study its atmosphere and aerosols, one needs to cover enough either a range of phase angles or spectra by observations. While most of previous studies were based on "phase curves" in a few visible wavelengths, we are motivated to perform multi-wavelength polarimetry in the infrared at a few selected phase angles. To acquire infrared imaging-polarimetric data of Venus, preparative works were done at the Institute for Astronomy (IfA), University of Hawaii, Maui.

From recent our visible-wavelength observations (2012 - 2014) using HOPS (Hida Optical Polarimetry System), we found that the optical thickness of polar hazes of Venus are now in thinning phase. Since polarization is dominated by the main cloud, it is difficult to significantly derive the optical thickness of decreasing hazes without affected by the errors due to an assumption that main cloud parameters are same as Hansen and Hovenier (1974). Additionally because the previous observations take long time to obtain polarization data varying with phase angle changes of Venus, it is a problem that variation of polarization can contain its temporal variations.

Considering the polarization of the infrared light scattered by H₂SO₄ droplets with radius of 1.05 microns, standard Venusian cloud model (Esposito, 1980), the sign of polarization shall vary from negative to positive at middle phase angle range, between 60 and 80 deg. At this phase angle range, polarization degrees caused by single scattering vary like J: negative, H: neutral, K: positive (astronomical bands, central wavelength (microns) J: 1.25, H: 1.65, K: 2.2). Actually according to test calculations taking into account multiple scattering, disk-averaged polarization degree at phase angle 80 deg. J: -3%, H: -0.5% K: +2% are expected. In case that observed signs of polarization are different from that of expected, parameters such as radius of cloud particle can be different from standard cloud model. For example if main cloud particles are larger (~ 1.5 microns), these signs can vary like J: negative, H: negative, K: neutral. Inversely if the particles are smaller (~ 0.6 microns) J: neutral, H: positive, K: positive. From combination of these signs, we can know microphysical properties of the clouds with single observation run. Because especially phase angle around 80 deg. is near greatest elongation, which means that observation is much easier compared with other phase angles, we are planing to perform observations at that time.

To realize our idea, preparative works, optical design of SOLAR-C telescope with a polarizer (Savart plate) inserted into the optical system and test observations, were done from September through December 2014, and in February 2015 at IfA. The test observations were carried out by using NIIHAMA camera attached to SOLAR-C, off-axis gregorian telescope of diameter 45cm, at the top of Haleakala altitude about 3000m. The Savart plate separates the light into two beams whose vibrating plane is orthogonal each other. We could verify that the separation distance is about 200 pixels on images (pixel scale ~ 0.45 arcsec./pixel) by the observations. For precise measurements of polarization degrees, calibration of polarization generated by primary mirror of SOLAR-C is future work.

キーワード: 金星, エアロゾル, 偏光撮像観測

Keywords: Venus, Aerosols, Imaging-Polarimetry

金星昼面 $5 \mu\text{m}$ 分光撮像観測 Sun spectro-imaging on the Venus dayside

狩野 咲美^{1*}; 岩上 直幹¹; 細内 麻悠¹; 鈴木 文晴¹

KANO, Sakimi^{1*}; IWAGAMI, Naomoto¹; HOSOUCI, Mayu¹; SUZUKI, Fumiharu¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

金星大気上層においては高速の東風が吹いており、雲層の上面にあたる高度 70km においてその速度は自転速度の約 60 倍に達する。この特異な現象はスーパーローテーションと呼ばれ、その生成・維持メカニズムについていくつか存在する仮説のひとつとして、波動の鉛直伝播によって角運動量が上層大気へ蓄積し大気加速が引き起こされていることが推定されている。金星大気現象の詳細を明らかにするために、まず波動の鉛直伝播を捉えることは重要である。スーパーローテーションでは、高度 50-70km の雲層が重要な加速域であると考えられており、これまで、昼面紫外光観測によって高度 70km の、夜面赤外放射観測によって高度 50km の情報が得られてきた。我々が 2014 年に IRTF/CSHELL によって行った赤外分光撮像観測の目的は、これまでに観測例の少ない高度 60km の情報を得ることに加え、別高度との同時観測を行うことであった。高度 60km については、 $1.07 \mu\text{m}$ 域における二酸化炭素の吸収等価幅から昼面の雲高偏差分布を得た。また高度 70km については、 $5.04 \mu\text{m}$ 域の輝度値から昼面・夜面の雲温分布を捉えることが出来た。この研究では特に後者の観測結果について、東西方向波数 1 の惑星波が常在するという仮定からその周期を求め、波動構造を導き出す分析を行った。

キーワード: 金星, スーパーローテーション

Keywords: Venus, super-rotation

金星 GCM への硫酸雲の導入 Implementation of sulfuric acid cloud into a Venus GCM

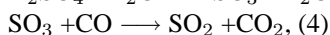
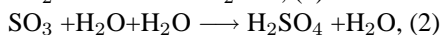
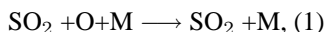
伊藤 一成^{1*}; 黒田 剛史¹; 笠羽 康正¹; 寺田 直樹¹; 池田 恒平²; 高橋 正明³
ITO, Kazunari^{1*}; KURODA, Takeshi¹; KASABA, Yasumasa¹; TERADA, Naoki¹; IKEDA, Kohei²; TAKAHASHI, Masaaki³

¹ 東北大学理学研究科, ² 国立環境研究所, ³ 東京大学大気海洋研究所

¹Graduate School of Science, Tohoku University, ²National Institute for Environmental Studies, ³Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo

金星は高度 50-70km を硫酸雲に覆われている。金星大気大循環モデル (Venus General Circulation Model) を用いた硫酸雲分布の再現の試みは、Lee et al. [2010] と我々のグループ (e.g. Kato et al. 2014) において凝縮・蒸発過程と沈降過程を取り入れた雲パラメタリゼーションによってなされてきた。ただし、これらにおいては化学過程が考慮されていないため、Knollenberg and Hunten [1980] で提唱されている金星硫酸雲サイクルは成り立たず、現実的なプロセスに基づく雲分布の再現を行ってはいない。

本研究は、化学過程を VGCM に導入することで、より現実的な金星硫酸雲の生成・消滅を再現し、雲の循環・分布について観測と定性的・定量的比較が可能な数値モデルの開発を行うものである。ベースとして使用したモデルは、Kato et al. [2014] 同様、CCSR/NIES/FRCGC AGCM をもとに開発された VGCM [Ikeda, 2011] であり、水平分解能 T21 (グリッド間隔: 緯度経度双方で約 5.6°)、鉛直 52 層 (大気上端高度: 約 95km) に設定した。雲の生成・消滅は、各タイムステップで硫酸雲と硫酸蒸気の混合比の和が硫酸飽和蒸気混合比を上回った量がすべて雲になり、下回った場合全て蒸発し硫酸蒸気になると仮定して導入した。生成された雲の粒径は、現モデルにおいては Haus and Arnold [2010] に基づく 4 種類のモード比 (水平方向に一定、高度分布を仮定する) に配分される。すなわち、雲粒子径の拡大・縮小は本モデルでは再現しておらず、生成された粒子の移流を追跡するに留まる。また、本来結果として得られる雲分布は大気の熱放射・吸収の量・空間分布に影響を与えるが、現モデルにおいてはまだ「一定量・一定高度」(従来コードのまま) としている。硫酸に関わる大気成分の変遷および硫酸粒子の揮発に伴う化学過程として、現モデルでは以下の (1) - (4) を導入した。



これらの化学過程を導入した VGCM を用いて、15 金星日間の計算を行った結果、平衡状態に達した雲分布が得られた。この数値モデルにおいて、雲循環は、主に低緯度域の高度約 65km で化学反応によって SO₂ からの雲の生成、子午面循環によって移流、主に高緯度域で下降し高度 50km 付近で蒸発という過程で構成され、金星雲循環 [Knollenberg and Hunten, 1980; Imamura and Hashimoto, 1998] を初めて現実的に再現した金星 GCM となった。また、雲分布においては、観測された雲頂高度の高緯度への減少を定性的に再現した。ただし、極域 (75 度以上) の光学的厚さが観測に比べ薄くなる傾向にある。また、(1) - (4) に関連する物質分布においては、H₂O、SO₂ は高度 60km 以上で化学モデル [Krasnopolsky, 2012] の値より過大となったため、次のステップにおいては H₂O、SO₂ に関する化学反応も考慮する必要がある。

今後、放射・散乱過程を生成された雲分布と一致させる予定である。これにより、より現実的な温度場や循環の再現が期待される。2016 年に開始されるであろう Akatsuki による雲の大規模分布やその変動を定性的・定量的に考察可能となる重要なツールとしたい。

キーワード: 金星, 硫酸雲, GCM

Keywords: Venus, sulfuric acid cloud, General Circulation Model

金星下層大気構造についての研究 Study about the structure of Venusian lower atmosphere

安藤 紘基^{1*}; 今村 剛¹; 高木 征弘²
ANDO, Hiroki^{1*}; IMAMURA, Takeshi¹; TAKAGI, Masahiro²

¹宇宙航空研究開発機構, ²京都産業大学
¹ISAS/JAXA, ²Kyoto Sangyo University

金星は、高度 50-70 km に渡って存在する分厚い硫酸の雲によって全球的に覆われている。雲層より上の領域における大気構造は、Pionner Venus や Venus Express といった昨今の衛星ミッションにおける光学観測や望遠鏡による地上観測によって数多く研究されてきた。一方、雲層より下の大気構造については、過去の Venera ミッションや Pioneer Venus ミッションにおけるプローブ観測によって温度や風速が調べられているが、プローブではある特定の場所しか調べることができず、空間情報に乏しいという欠点がある。また、光学観測や地上観測を用いても金星の分厚い雲によって阻まれしうため、それらから雲層より下の大気構造を把握することは困難である。故に、金星雲層より下の大気構造についての知見は、皆無に等しいというのが現状である。これを打開できる手段の一つとして、気温の高度分布を高精度（温度測定誤差 ~ 0.1 K）かつ高分解能（鉛直分解能 ~ 1 km）で測定できる電波掩蔽観測が挙げられる。そして本研究では、欧州宇宙機関 ESA が打ち上げた金星周回衛星 Venus Express における電波掩蔽観測のデータを解析することで、金星雲層より下の鉛直温度分布を計算し、これまで見る事が出来なかった金星雲層より下の大気構造を明らかにすることが最大の目的である。

データは 2006 年から 2010 年までに得られたものを用いた。得られた温度分布を緯度 10°ごとに分類し、それぞれの緯度帯で高度幅 1km ごとに平均する。尚、半球依存性やローカルタイム依存性については考慮しない。解析の結果、低・中緯度と高緯度で明確な差が見られた。前者では高度 50-60km に中立安定層があり、その下では弱安定な大気構造をしていた。これは過去のプローブ観測と整合的な結果である。一方、高緯度では中立安定層が高度 40-60km にまたがって存在していることが分かった。本発表では、高緯度がなぜ他の緯度帯と異なる大気構造をしているのか大気大循環モデル (AFES) と比較しながら理論的考察を与える。

キーワード: 金星大気, Venus Express, 電波掩蔽, 大気大循環モデル
Keywords: Venus atmosphere, Venus Express, Radio occultation, GCM

電波ホログラフィ法による金星大気の電波掩蔽データの解析 Radio holographic analysis of Venus' radio occultation data

宮本 麻由^{1*}; 今村 剛²; 安藤 紘基²; 津田 敏隆³; 青山 雄一⁴

MIYAMOTO, Mayu^{1*}; IMAMURA, Takeshi²; ANDO, Hiroki²; TSUDA, Toshitaka³; AOYAMA, Yuichi⁴

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 宇宙科学研究本部, ³ 京都大学生存圏研究所, ⁴ 国立極地研究所

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, ²Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science, ³Research Institute for Sustainable Humanosphere, ⁴National Institute of Polar Research

重力波は浮力を復元力とする波動で、運動量やエネルギーを鉛直輸送して大気大循環を駆動すると考えられている。また上方伝搬と共に波の振幅が大きくなると、対流不安定やシア不安定といった局所的な不安定を介して碎波し、それに伴う乱流は物質やエネルギーや運動量の拡散に重要な役割を果たすと考えられている。地球大気では、ラジオゾンデやレーダーにより鉛直波長が数十 m~数 km の重力波が観測され、小スケールの波の構造まで良く理解されている。一方、他の惑星では地球と同様の気象観測は機会が限られるため、主に電波掩蔽観測によって得られる高度方向の温度分布から、波に伴う温度擾乱を取り出して重力波の性質が議論されている。しかし従来の電波掩蔽データの解析においては電波を1本の光線として扱う幾何光学解法が用いられているため、屈折率の勾配が大きい領域を通過した電波は、複数経路の電波と重なり地上で同時に受信されてしまうため、分離できない。また、電波の回折効果により鉛直分解能が1 km 程度に制限されるため、これでは幅広い重力波スペクトルのうちのごく一部分しかとらえておらず、地球以外の惑星における重力波の伝搬・散逸過程はほとんど理解されていない。

そこで我々は、近年の地球大気における GPS 掩蔽観測で用いられている電波ホログラフィ法 (Jensen et al., 2003) という、受信信号の振幅と位相の時系列全体を同時にスペクトル解析して分解能を上げる解法を金星大気に応用した。このことにより、鉛直波長 100 m 程度という高分解能な金星大気の温度の鉛直分布が得られた。

次に、得られた温度の鉛直分布から重力波に伴うと思われる温度擾乱を抽出し、それらの鉛直波数スペクトルを求めた。また、温度の鉛直分布からは大気安定度の鉛直分布も求めた。本発表では鉛直波数スペクトルの高度や経度・緯度ごとの比較や、安定度の鉛直分布における不安定層の分布について調べ、重力波の伝搬特性と碎波の性質について議論する。

キーワード: 金星, 重力波, 電波掩蔽, 電波ホログラフィ法

Keywords: Venus, Gravity wave, Radio occultation, Radio holographic analysis

電波掩蔽法による月電離層計測における地球電離層の影響について Effect of the terrestrial ionosphere for the lunar radio occultation observation

菊池 冬彦^{1*}; 河野 宣之²; 松本 晃治¹
KIKUCHI, Fuyuhiko^{1*}; KAWANO, Nobuyuki²; MATSUMOTO, Koji¹

¹ 国立天文台 RISE 月惑星探査検討室, ² 国立天文台

¹RISE project office, National Astronomical Observatory of Japan, ²National Astronomical Observatory of Japan

The existence of the lunar ionosphere is an open question of the Moon. The lunar ionosphere was found by radio occultation observations of spacecraft, such as Luna 19, Luna 20, and SELENE (Vasilyev et al., 1974; Vyshlov et al., 1976; Imamura et al., 2012). However, the estimated electron densities of several hundreds to 1000 cm⁻³ are much larger than theoretical estimation (Daily et al., 1977). Although several kinds of theories have been proposed to explain the existence of the lunar ionosphere (Daily et al., 1977, Savich 1976, Stubbs et al., 2011), inadequate quality and quantity of the present data prevent to qualify the origin of the lunar ionosphere.

Principal factor of inadequate data is the terrestrial ionosphere. The amplitude for fluctuation of total electron content (TEC) of the terrestrial ionosphere is similar or larger than the TEC of the lunar ionosphere. The cause of the lunar ionosphere cannot be derived without removal of the terrestrial ionosphere.

Imamura et al. (2012) removed the terrestrial ionosphere by a polynomial fitting method. If we assume the lunar ionosphere exists under a certain altitude (for example 30 km), the time series of observed TEC can be divided to two parts depending on whether the radio signal paths the lunar ionosphere or not. Before the occultation starts, named A-part, only the terrestrial component of the TEC is included in the observed TEC. On the other hand, both of the terrestrial and lunar components are included in the occultation period, named B-part. To remove the terrestrial component of B-part, the observed TEC of A-part is fitted by polynomial function and extrapolated to B-part. The lunar TEC had been estimated by this method in SELENE mission. However, the polynomial approach was ineffective when the fluctuation of the terrestrial ionosphere was large (Imamura et al., 2012).

In this presentation, the effect of the terrestrial ionosphere for the radio occultation observation is estimated by using SELENE-derived terrestrial TEC data. The error of the polynomial fitting and extrapolation of above method is evaluated, and the possibility of the detection of the lunar ionosphere is discussed. The optimal configuration of the radio occultation observation is also considered for future exploration. Appropriate orbital elements are discussed to collect sufficient data set. We focus on a solar zenith angle dependency of observation that is a key parameter to derive a mechanism for generating the lunar ionosphere. Furthermore, we start to search the lunar ionosphere by using other data set of SELENE. That is the VLBI data obtained in VRAD mission. Both of S-band and X-band signals from sub satellite of SELENE, Vstar, were received at four ground stations of VERA. The result will be shown in the presentation.

[1] Vasilyev, M. B. et al., Radio transparency of circumlunar space using the Luna-19 station, *Cosmic Res.*, 12, 102-107, 1974.

[2] Vyshlov, A. S. et al., Some results of cislunar plasma research, *Solar-Wind Interaction with the Planets Mercury, Venus, and Mars*, NASA, 81-85, 1976.

[3] Imamura, T. et al., Radio occultation measurement of the electron density near the lunar surface using a subsatellite on the SELENE mission, *J. Geophys. Res.* 117, 2012.

[4] Daily, W. D. et al., Ionosphere and atmosphere of the moon in the geomagnetic tail, *J. Geophys. Res.*, 82, 5441-5451, 1977.

[5] Savich, N. A., Cislunar plasma model, *Space Res.*, 16, 941-943, 1977.

[6] Stubbs, T. J. et al., A dynamics fountain model for lunar dust, *Adv. Space Res.*, 37, 59-66, 2006.

キーワード: 月, 電離層, 電波掩蔽

Keywords: Moon, ionosphere, radio occultation

地球外気圏に関する観測的研究 The Terrestrial Exosphere observed by Space Satellites

桑原 正輝^{1*}; 吉岡 和夫²; 村上 豪²; 土屋 史紀³; 木村 智樹²; 亀田 真吾⁴; 佐藤 允基⁴; 吉川 一朗¹
KUWABARA, Masaki^{1*}; YOSHIOKA, Kazuo²; MURAKAMI, Go²; TSUCHIYA, Fuminori³; KIMURA, Tomoki²;
KAMEDA, Shingo⁴; SATO, Masaki⁴; YOSHIKAWA, Ichiro¹

¹ 東京大学, ² 宇宙科学研究所, ³ 東北大学, ⁴ 立教大学

¹ Univ. of Tokyo, ² ISAS/JAXA, ³ Tohoku Univ., ⁴ Rikkyo Univ.

地球外気圏とは地球の大気層の最も外側の領域であり、粒子のスケールハイトよりも平均自由行程が長く、粒子同士の衝突がほとんど無視できる領域である。地球外気圏を構成する原子の中で最も多く存在するのは水素であり、次に多い原子はヘリウムである。地球外気圏の粒子は太陽光を共鳴散乱することで、地球全体を包む紫外線グローを形成する。この紫外線グローはジオコロナと呼ばれている。

1972年に打ち上げられた Apollo-16 は紫外線カメラを用いて、月面から観測視野 $10R_E$ 程度で、初のジオコロナの撮像を行った。その後 1998年に打ち上げられた火星探査機のもみ衛星に搭載された紫外分光器 UVS の観測ではジオコロナは $20R_E$ 程度まで広がっていることが確認された。よって、Apollo-16 の観測ではジオコロナの全体を捉えきれていなかったと言える。また、この観測以来ジオコロナの撮像は行われていなかった。

地球周回衛星による低高度のジオコロナの観測も行われてきた。最近では TWINS 衛星に搭載されている Lyman alpha detectors (LADs) の観測により、 $3-8R_E$ までの範囲に存在する水素原子の総量が、磁気嵐の発生に伴い 6-17% 増加するという現象が確認された。しかし、この増加過程は未だ明らかになっていない。

2013年9月にイプシロンロケットにより打ち上げられた HISAKI/EXCEED で地球周回軌道からジオコロナの観測が行われている。2014年2月に大規模な磁気嵐が確認されており、その間水素ライマン α 線の光量の増加が観測された。本研究では磁気嵐の発生に伴う水素原子の増加過程を調べ、HISAKI/EXCEED による観測結果と比較した。その結果、外気圏の水素原子の増加を引き起こす物理過程は熱圏の膨張による寄与とプラズマ圏のイオンとの電荷交換衝突反応による寄与であるという結論を得た。

2014年12月に打ち上げられた超小型深宇宙探査機 PROCYON ではジオコロナ撮像装置 LAICA (Lyman Alpha Imaging Camera) による水素原子の共鳴散乱光 (121.6nm) の撮像を行っている。この観測では月以遠に達する軌道からの撮像であるため、広い観測視野でジオコロナの全球分布を捉えることができる。私は LAICA の地上校正試験を行い、波長 121.6nm に対する感度が 1.1×10^{-3} cps/Rayleigh/pix であることを確認した。そして、打ち上げ後の 2015年1月5日に地球からの距離が約 1300 万 km となるところから、Apollo-16 以来 42 年ぶりにジオコロナの撮像に成功した。このときの観測視野は約 $110R_E$ で、これほどまで広範囲の撮像例は過去に無く、ジオコロナの全球分布を 1 枚の画像として取得した初めての観測と言える。

キーワード: 外気圏, プラズマ圏, 磁気圏, 磁気嵐, ジオコロナ, ライマン α

Keywords: exosphere, plasmasphere, magnetosphere, magnetic storm, geocorona, lyman alpha

MHD シミュレーションを用いた火星電離圏イオンの流出経路に関する研究 A global MHD simulation study of the ion outflow channels from the Martian ionosphere

前田 紗和^{1*}; 寺田 直樹¹; 笠羽 康正¹
MAEDA, Sawa^{1*}; TERADA, Naoki¹; KASABA, Yasumasa¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Tohoku University

火星は惑星スケールの固有磁場を持たない非磁化惑星であり、火星の超高層大気と太陽風が直接相互作用することが知られている。その結果、惑星が保有する大気が剥ぎ取られる現象（大気の宇宙空間への流出）が発生する。過去には Phobos2 によって惑星起源イオンの加速および流出が観測されており、約 3×10^{25} ions/s の割合で酸素イオンが流出していると見積もられた [Lundin et al., 1989]。また、Mars Express (MEX) に搭載された Ion Mass Analyzer (IMA) によって、 CO_2^+ などの重い電離圏起源イオンが大量に流出していることが報告された [Carlsson et al., 2006]。

大気の流出過程には様々なものがあり、太陽風との直接相互作用によるものとしては、イオンピックアップ過程、スパッタリング過程、磁気異常からの流出過程、そして電離圏イオンの流出過程が提唱されている。その中でも、低エネルギー ($< \sim 10\text{eV}$) の電離圏イオンの流出過程は、観測が技術的に困難であることなどによって特に不確定な部分が多い。そこで、我々は全球的な magnetohydrodynamic (MHD) シミュレーションの結果 [e.g., Terada et al., 2009] を用いて三次元可視化を行い、低エネルギーの電離圏イオンの流出経路および、その加速機構を解析した。MHD シミュレーションはプラズマを流体として扱う手法であるが、低エネルギーイオンの運動はラーマ半径が小さいことから流体近似が比較的成り立つとして計算した。三次元可視化を行った結果、昼側電離圏から伸びる流線が火星の磁気極付近を經由し、夜側の赤道面付近で東西に分かれ、そのまま四つの渦を形成するという様相が得られた。その渦は電離圏界面付近で速度が大きくなっており、そのまま宇宙空間へと伸びていく。本研究ではまず、その流線をたどり、昼側電離圏起源のイオンが夜側のどの領域で加速されているかを判定した。そして、いくつかの流線を抜き出し、その流線に沿って速度や磁場やプラズマの圧力の数値を出力し、運動方程式の各項を定量的に評価することによって、昼側電離圏起源のイオンが抽出流線上のどの位置でどの項によって加速を受けているかを調べた。

本発表では、これらの MHD シミュレーションに基づいた火星電離圏イオンの流出経路と加速機構の解析結果について報告する。

キーワード: 火星, 電離圏, 大気流出, MHD シミュレーション

Keywords: Mars, ionosphere, atmospheric outflow, MHD simulation

火星電離圏界面におけるケルビン-ヘルムホルツ不安定の数値シミュレーション A simulation study of the Kelvin-Helmholtz instability at the Martian ionopause

相澤 紗絵^{1*}; 寺田 直樹¹; 笠羽 康正¹
AIZAWA, Sae^{1*}; TERADA, Naoki¹; KASABA, Yasumasa¹

¹ 東北大学大学院理学研究科

¹Dep. Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku Univ.

火星は固有磁場を持たないため、太陽風と惑星電離圏が直接相互作用をする環境にある。このような環境下において、惑星電離圏界面では惑星電離圏と磁化太陽風プラズマの間に密度不連続と速度シアが形成される。これに伴い、電離圏界面にケルビン-ヘルムホルツ (KH) 不安定が励起されうる [Amerstorfer et al., 2010] が、これが電離圏イオンの流出過程の一端を担っている可能性が指摘されている。さらに KH 不安定は惑星磁気圏界面においてその速度シアの向きとイオンの旋回方向の関係から、朝夕非対称を引き起こすと考えられている [Nagano, 1978]。非磁化惑星においては同様の理由から太陽風対流電場方向に非対称を引き起こすと考えられている。

Terada et al. [2002] はグローバルハイブリッドシミュレーションを用いて、金星電離圏界面における KH 不安定が、太陽風対流電場方向への電離圏イオンの加速を介して非対称に発達することを指摘した。KH 不安定の初期成長はイオンの有限ラーマ半径 (FLR) 効果、重力安定化効果や電離圏界面の境界層の厚みなどにより決定される。しかし、グローバルシミュレーションでは様々な効果の寄与がまとめて計算されるため、各々の効果による寄与を切り分けて見積もることは困難であった。また、過去の研究では火星電離圏界面のパラメータ範囲において、FLR 効果が KH 不安定の線形成長や非線形発展に及ぼす影響は見積もられていなかった。

本研究では、理想 MHD シミュレーションに FLR 効果や重力安定化効果を加えることで、火星電離圏界面のパラメータ範囲において各々の効果がどれほど KH 不安定の線形成長や非線形発展に寄与するか、また火星からの大気散逸率にどれほど寄与するかを見積もることを目的としている。そのためまずは FLR 効果に着目し、火星電離圏界面パラメータにおいて FLR 効果を Huba [1996] に沿って組み込んだ場合と組み込んでない場合について KH 不安定の線形成長や非線形発展がどう変化するかを比較を行った。本発表では得られた初期結果について報告する。

キーワード: ケルビン-ヘルムホルツ不安定, 有限ラーマ半径効果

Keywords: the Kelvin-Helmholtz instability, the finite Larmor radius effect