

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 an 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・金星大気の温度擾乱 (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 NH_3 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、 NH_3 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 NH_3 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 NH_3 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

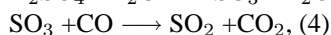
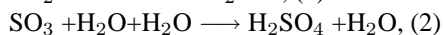
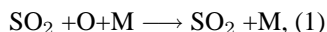
伊藤 一成^{1*}; 黒田 剛史¹; 笠羽 康正¹; 寺田 直樹¹; 池田 恒平²; 高橋 正明³
ITO, Kazunari^{1*}; KURODA, Takeshi¹; KASABA, Yasumasa¹; TERADA, Naoki¹; IKEDA, Kohei²;
TAKAHASHI, Masaaki³

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、その下では弱不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 となることから、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