

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。

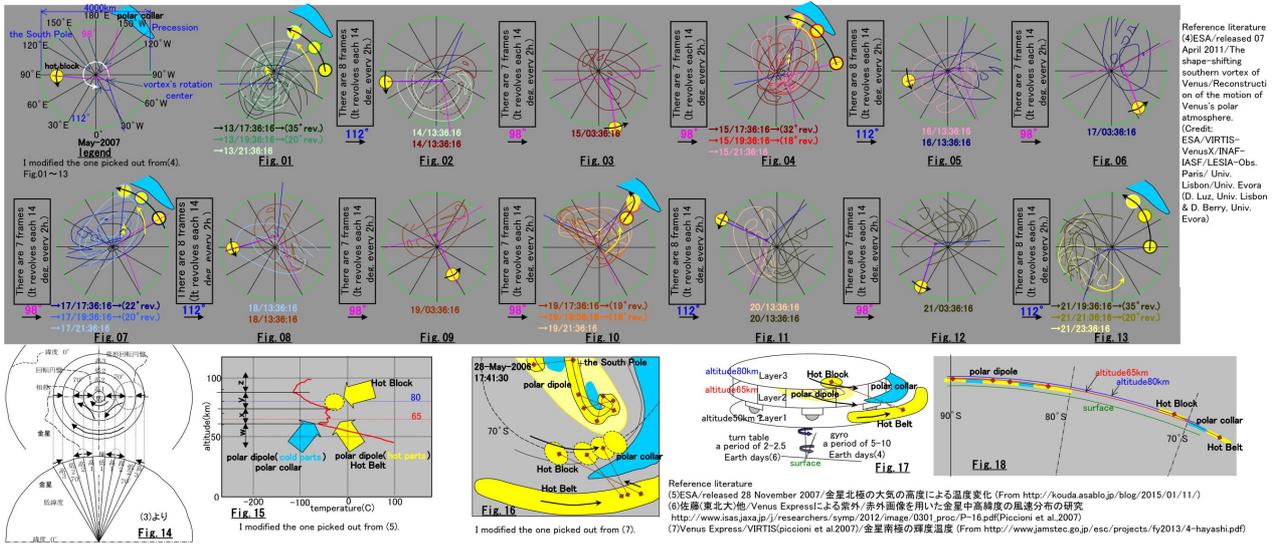
(f)(g)(h)を同時に満たすモデルを構築したい(Fig.17)。高度65kmを中心としたLayer2はcold partsとhot partsが並存し、polar dipole(6)が形成される。この渦は温度構造を利用して自律的に流れを産出し全体的に旋回流となることで回転エネルギーを保持する。これがSRの主要な駆動力(回転円盤1)である。高度80kmを中心としたLayer3はLayer2の上に載り同じ動きをする。縁近くにHot Blockがありpolar collarの先端に接近したときHot Belt(回転円盤1により回されている)との間で引き合いを起こす(回転円盤2)。このとき回転は一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・化学的狀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、金星大気のみより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 一朗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軌道は遠土点が多いため、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と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ー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ーラス中の酸素原子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°C)、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60 μ m x 長さ10mmのもの100 μ m x 10mmの2種類を使用した。それぞれ300x2秒角、300x3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 $\pm 1.5Rs$ 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、解析方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ー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