

令和 2 年 6 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02965

研究課題名(和文) 日米最新の人工衛星を使った、木星磁気圏を駆動する物質とエネルギー輸送に関する研究

研究課題名(英文) Study of energy and material transportations in the Jovian magnetosphere based on the database of US and Japanese satellites

研究代表者

吉川 一郎 (Yoshikawa, Ichiro)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：10311169

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：地球と同じく強い固有磁場を持つ木星について研究した。木星の周辺にも磁気圏と呼ばれる領域が存在し、その中を木星の月(イオ衛星)がある。衛星イオには火山活動があり、火山から噴出したガスがイオンになることで、土星の輪のようなトーラスを形成している。そして、この火山の影響により、木星の自転周期が変わったり、木星から遠く離れた領域(木星半径の10-30倍程度の距離だけ、反太陽方向に離れた領域)から運ばれてくる電子の量が増えることが分かった。いずれも、前世紀から研究者が、その成否や存在を疑っていたことである。これらの結果は、日本と米国の人工衛星(ひさきとジュノ)のデータを総合的に解析することにより導いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最近の高等学校の理科(地学)の教科書に記述されている外惑星に関する項目は博物学的なものではなく、物理としては面白くない。今回の我々の成果は、単純な力学に置き換え理解することもでき、物理を得意とする高校生が、将来、宇宙科学や惑星科学を目指すきっかけとなる解りやすい惑星物理学の例を提示した。日本の宇宙惑星科学が欧米に引けを取ることなく存在感を維持するためには、日本の得意技術の精悦化にあることを証明した結果である。

研究成果の概要(英文)：We have studied Jupiter, which has a strong magnetic field similar to the Earth. There is also a region called the magnetosphere around Jupiter, inside which Jupiter's moon (Io satellite) orbits. The satellite Io has volcanic activity, and gas emitted from the volcano becomes ions, forming a torus like Saturn's ring. Then, due to the influence of this volcano, the rotation cycle of Jupiter changes, and the electrons carried from the area far away from Jupiter (area 10-30 times the radius of Jupiter away from Jupiter toward anti-sunward). Since the last century researchers had doubted the truth and existence. Our results were derived by comprehensively analyzing the observation data of satellites made in Japan (Hisaki) and the United States (Juno).

研究分野：惑星探査

キーワード：惑星探査 外惑星 オーロラ 磁気圏 プラズマ 衛星大気 衛星イオ 木星

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

木星磁気圏は、その内部に太陽系最強の粒子加速器を有し、かつ、そのオーロラ強度も太陽系最大であることから、磁気圏・宇宙プラズマ物理を探究する者にとって、それが作動する仕組みを理解したいという欲求には抗し難い魅力がある。これまでの探査機データや地上観測データを使って木星磁気圏の振舞を理解しようとする努力はされてきた。しかし実際は、例えば、ハッブル望遠鏡(HST)の高解像度オーロラ画像の解析からは、数多くの特徴的パターンが見出されてきたが、その時に磁気圏で何が起きていたのかを検証することは、磁気圏内を同時に観測した探査機がなかったことから諦めざるをえなかった。さらに、HSTの観測に限って言えば、ある短い期間において散発的に実施されるものであり、ある現象が出現する条件を明確に示すことも困難である。つまり、木星磁気圏ダイナミクスは、その魅力の高さにも関わらず、それを探究するためのツールはきわめて限られていた。その状況を変えたのが、長期間にわたり連続的な観測を続ける「ひさき」衛星である。

「ひさき」衛星の観測開始は、長く停滞していた外惑星(木星磁気圏)の研究を一変させた。「ひさき」は、惑星の大気・プラズマ撮像分光を定常的に行なう宇宙望遠鏡衛星として、2013年9月に打ち上げられ、現在も地球の周回軌道から観測を続けている。「ひさき」衛星は、太陽系内の天体の大気・プラズマのリモートセンシングを行い、地上からは観ることのできない極端紫外光(EUV)に測器の感度を設定した世界にも類を見ないユニークな計画である。

この計画に各国の宇宙機関が注目し、HSTやチャンドラX線天文衛星と共に木星磁気圏を多波長で観測するキャンペーンにも至った。

「ひさき」衛星は、EUVという特異な波長域で長期にわたり連続的に観測を続けている。その工夫された視野範囲から、木星オーロラとイオ・プラズマトラス(IPT)からの発光を同時に観測することもできる。つまり、長期にわたり、連続的に、外部～中間磁気圏(オーロラ)と内部磁気圏(IPT)とを同時観測することを可能にした衛星である。

ここでIPTの観測の意義について、あらためて述べる。IPTは衛星イオが宇宙空間に放出する火山ガスが電離して形成されるプラズマガスのトラスであり、木星の赤道面上、木星中心から6木星半径の距離の辺りに存在する。IPTを構成する火山ガスイオンはEUV波長域に輝線をもつ。特に、「ひさき」のような高波長分解能から得られたデータを使ったプラズマ診断からは、IPTを取り巻くプラズマ環境を読み出すことが可能となる。

## 2. 研究の目的

強い固有磁場は磁気圏のサイズが大きいことを意味し、かつその内部にプラズマ源がありながら高速に自転する磁力線という構図は、内部から中間磁気圏にわたる広い範囲の活動が共回転に誘発されるはずである。太陽風に起因する擾乱は極わずかであり、共回転に逆らうような物質/エネルギーの動径方向の輸送は不可能であろう。しかし、太陽風の動圧変動に木星磁気圏が呼応した報告も少なくない。そもそも、動径方向の輸送なしにはエネルギー収支も合わない。惑星望遠鏡「ひさき」と、最近、木星軌道に投入されたジョノ探査機による観測データをつきあわせ、回転支配型磁気圏に働く輸送の謎を解く。

## 3. 研究の方法

日本の惑星望遠鏡「ひさき」の観測画像と米国の木星ジュノ探査機のデータを使うことにより、IPTと木星オーロラの変動を同時に観ることができ、木星内部磁気圏内のエネルギーの流れを理解する。イオの火山が活発化するとき、IPTを貫き木星とともに自転する磁力線に供給されるプラズマ量は増える。「木星磁気圏活動の起源は惑星自転にある」という立場をとるとき、イオ火山の活発化は磁気圏ダイナミクスの様相を大きく変える要因と考えられる。このことを理解するには、火山活動の最初から最後まで磁気圏の様相を記載したデータを解析することが求められるが、これまでの探査機による散発的な観測からはそのようなデータセットは得られていなかった。このようなデータセットを見つけ出し、問題を解決す

る

「ひさき」衛星が得た EUV スペクトル画像にプラズマ診断のコードを用い、電子温度を導出する。米国ジュノ探査機の直接観測データを併用することにより、太陽風、木星遠尾部と内部磁気圏との間の物質・エネルギーの循環プロセスを明らかにする。木星探査機ジュノの研究者チームとの共同研究を効率よく確実に進めるために、「ひさき」の高次データベースを整備し、米国ジュノ探査機のデータ解析チームとの共同解析を進める。

#### 4. 研究成果

衛星イオの火山噴火とそれが磁気圏に及ぼす影響について明らかにした。すなわち、火山ガスの電離によるIPTのプラズマ密度の増加、IPTから内部磁気圏の外（中間磁気圏）へのプラズマ輸送、オーロラの活発化、そして、内部磁気圏へのエネルギー注入の増大に至る一連の動きを明らかにした。IPTのプラズマ密度の増加からオーロラの活発化まで約20日間を要し、内部磁気圏から外側領域へのプラズマ輸送が拡散的なダイナミクスに支配されている事が示された。

そして、この動径方向のプラズマ輸送がIPTの放射エネルギーに関する問題を解く手がかりになると結論づけた。ボイジャー探査機やカッシーニ探査機の木星フライバイ時に計測されたIPTからの放射光強度のエネルギー源について長年議論されてきた。つまり、IPT放射の主たるエネルギーは、火山ガスに起源をもつプラズマが高速に回転する木星磁場に捕捉されたときに得られるが、これだけでは計測された放射エネルギーを説明できない。

「ひさき」衛星は、衛星イオと木星磁場の相互作用に起因する電子加熱現象も捉えたが、これはIPTの放射エネルギー全体の1割程度の寄与であり、やはり放射エネルギーの総量の説明には足りない。しかしながら、共回転が支配する磁気圏の内側にエネルギーや物質を外から注入することは不可能であると考えられていた。このような状況の中、「ひさき」衛星によるプラズマの動径分布の導出や突発的に起こるIPTとオーロラの順次活発化の発見から、IPTの放射エネルギーの一部は内部磁気圏の外から拡散的に運ばれてきたエネルギー（高温電子）であるという証拠をつかみ、長年の問題に終止符を打った訳である。

また、IPT放射光の朝夕非対称性と太陽風動圧の間に相関があることを明らかにし、太陽風擾乱の影響が内部磁気圏深部にまで到達しているという予想外の観測証拠をつかんだ。IPTの朝夕非対称性（朝方に比べて夕方側の増光）は磁気圏内の朝夕方向の電場増加で説明できるが、それは、太陽風と磁気圏境界面との粘性効果による尾部方向流れの増加、あるいは、region-2電流の増加のいずれかによると解釈される。今後、木星磁気圏の更なる観測でそのメカニズムが同定されることが期待される。

木星中心から 100R<sub>J</sub> 以遠の磁気圏尾部では MHD で記述されるダイナミクスがエネルギーとプラズマの輸送を支配していると考えられる。尾部で解放されたエネルギーが MHD 的な流れによって共回転領域の外縁まで運ばれた後、「ひさき」衛星が捉えた現象に如何にしてつながるかは未解明の問題である。ジュノ木星探査機とのさらなる共同観測や将来の木星探査計画 JUICE による詳細な観測が磁気圏尾部におけるエネルギー解放から始まる内部磁気圏深部へのエネルギーや物質の輸送に関する理解を深めてくれるであろう。「ひさき」衛星は木星をはじめとする巨大惑星の将来の磁気圏探査に明確な方向を与えたと云えるであろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 13件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kita H., Misawa H., Bhardwaj A., Tsuchiya F., Murakami G., Tao C., Kimura T., Yoshioka K., Yamazaki A., Kasaba Y., Yoshikawa I., Fujimoto M.	4. 巻 872
2. 論文標題 Short-term Variation in the Dawn?Dusk Asymmetry of the Jovian Radiation Belt Obtained from GMRT and Hisaki EXCEED Observations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L24 ~ L24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0427	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Suzuki F., Yoshioka K., Hikida R., Murakami G., Tsuchiya F., Kimura T., Yoshikawa I.	4. 巻 123
2. 論文標題 Corotation of Bright Features in the Io Plasma Torus	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 9420 ~ 9429
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JA025363	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yoshioka K., Tsuchiya F., Kagitani M., Kimura T., Murakami G., Fukuyama D., Yamazaki A., Yoshikawa I., Fujimoto M.	4. 巻 45
2. 論文標題 The Influence of Io's 2015 Volcanic Activity on Jupiter's Magnetospheric Dynamics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 10,193 ~ 10,199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018GL079264	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tsuchiya F., Yoshioka K., Kimura T., Koga R., Murakami G., Yamazaki A., Kagitani M., Tao C., Suzuki F., Hikida R., Yoshikawa I., Kasaba Y., Kita H., Misawa H., Sakanoi T.	4. 巻 123
2. 論文標題 Enhancement of the Jovian Magnetospheric Plasma Circulation Caused by the Change in Plasma Supply From the Satellite Io	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 6514 ~ 6532
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JA025316	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hikida R., Yoshioka K., Murakami G., Kimura T., Tsuchiya F., Yamazaki A., Yoshikawa I., Iwagami N.	4. 巻 123
2. 論文標題 Identification of Extreme Ultraviolet Emission Lines of the Io Plasma Torus Observed by Hisaki/EXCEED	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Planets	6. 最初と最後の頁 1723 ~ 1731
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JE005629	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Koga Ryoichi, Tsuchiya Fuminori, Kagitani Masato, Sakanoi Takeshi, Yoneda Mizuki, Yoshioka Kazuo, Yoshikawa Ichiro, Kimura Tomoki, Murakami Go, Yamazaki Atsushi, Smith H. Todd, Bagenal Fran	4. 巻 123
2. 論文標題 Spatial Distribution of Io's Neutral Oxygen Cloud Observed by Hisaki	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 3764 ~ 3776
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2018JA025328	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tao Chihiro, Kimura Tomoki, Tsuchiya Fuminori, Muirakami Go, Yoshioka Kazuo, Yamazaki Atsushi, Badman Sarah V., Misawa Hiroaki, Kita Hajime, Kasaba Yasumasa, Yoshikawa Ichiro, Fujimoto Masaki	4. 巻 45
2. 論文標題 Variation of Jupiter's Aurora Observed by Hisaki/EXCEED: 3. Volcanic Control of Jupiter's Aurora	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 71 ~ 79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL075814	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kimura T., Hiraki Y., Tao C., Tsuchiya F., Delamere P. A., Yoshioka K., Murakami G., Yamazaki A., Kita H., Badman S. V., Fukazawa K., Yoshikawa I., Fujimoto M.	4. 巻 123
2. 論文標題 Response of Jupiter's Aurora to Plasma Mass Loading Rate Monitored by the Hisaki Satellite During Volcanic Eruptions at Io	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 1885 ~ 1899
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JA025029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Koga Ryoichi, Tsuchiya Fuminori, Kagitani Masato, Sakanoi Takeshi, Yoneda Mizuki, Yoshioka Kazuo, Kimura Tomoki, Murakami Go, Yamazaki Atsushi, Yoshikawa Ichiro, Smith H. Todd	4. 巻 299
2. 論文標題 The time variation of atomic oxygen emission around Io during a volcanic event observed with Hisaki/EXCEED	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Icarus	6. 最初と最後の頁 300 ~ 307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2017.07.024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Koga Ryoichi, Tsuchiya Fuminori, Kagitani Masato, Sakanoi Takeshi, Yoneda Mizuki, Yoshioka Kazuo, Kimura Tomoki, Murakami Go, Yamazaki Atsushi, Yoshikawa Ichiro, Smith H. Todd	4. 巻 299
2. 論文標題 The time variation of atomic oxygen emission around Io during a volcanic event observed with Hisaki/EXCEED	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ICARUS	6. 最初と最後の頁 300 ~ 307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.icarus.2017.07.024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshikawa et al.	4. 巻 69
2. 論文標題 Volcanic activity on Io and its influence on the dynamics of the Jovian magnetosphere observed by EXCEED/Hisaki in 2015	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 11-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-017-0700-9m	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kimura et al.	4. 巻 44
2. 論文標題 Transient brightening of Jupiter's aurora observed by the Hisaki satellite and Hubble Space Telescope during approach phase of the Juno spacecraft.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 4523-4531
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL072912	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshioka et al.	4. 巻 122
2. 論文標題 Radial variation of sulfur and oxygen ions in the Io plasma torus as deduced from remote observations by Hisaki	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research	6. 最初と最後の頁 2999-3012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2016JA023691	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nichols et al.	4. 巻 44
2. 論文標題 Response of Jupiter's auroras to conditions in the interplanetary medium as measured by the Hubble Space Telescope and Juno	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 7643-7652
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL073029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Yoshioka, K., F., Tsuchiya, M. Kagitani, T. Kimura, G. Murakami, I. Yoshikawa, A. Yamazaki, R. Hikida, and M. Fujimoto
2. 発表標題 Plasma and energy transport in Jupiter's inner magnetosphere as deduced from Hisaki observation
3. 学会等名 MOP meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木文晴, 吉岡和夫, 吉川一朗
2. 発表標題 木星磁気圏の光学観測データに対するLassoを利用した変動周期のスパース推定
3. 学会等名 「STE現象報告会」「MTI 研究集会」「IUGONET 研究集会」「宇宙空間からの地球超高層大気観測に関する研究会」「科学とデータ研究集会」合同研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koga, R., Tsuchiya, F., Kagitani, M., Sakanoi, T., Yoshikawa, I., Yoshioka, K., Murakami, G., Yamazaki, A., Kimura, T., Smith, H. T.
2. 発表標題 Atomic oxygen densities and source rate in Io's neutral cloud derived from the Hisaki observation
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koga, R., Tsuchiya, F., Kagitani, M., Sakanoi, T., Kimura, T., Yoshikawa, I., Yoshioka, K., Yamazaki, A., Murakami, G., Smith, H. T.
2. 発表標題 Spatial Distribution of Io's Neutral Oxygen Cloud During Volcanically Quiet and Active Periods in 2014-2015
3. 学会等名 Conference on Magnetospheres of the Outer Planets 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古賀亮一, 坂野井健, 鈴木達也, 平原靖大, 土屋史紀, 鍵谷将人, 木村智樹, 吉川一朗, 吉岡和夫, 村上豪, 山崎敦
2. 発表標題 ひさきとALMAの観測によるイオ大気生成・散逸過程の研究
3. 学会等名 ALMA Workshop Connecting Solar System and Protoplanetary Disks with ALMA
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsuchiya et al.
2. 発表標題 Effect of plasma density around Io on local electron heating in the Io plasma torus
3. 学会等名 American Geophysical Union, Fall Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Yoshioka et al.
2. 発表標題 he Extreme Ultraviolet spectrometer on bard the Hisaki satellite
3. 学会等名 American Geophysical Union, Fall Meeting 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	藤本 正樹 (Fujimoto Masaki)  (30242811)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授  (82645)	
研究分担者	土屋 史紀 (Tsuchiya Fuminori)  (10302077)	東北大学・理学研究科・助教  (11301)	