

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：82645  
 研究種目：基盤研究(B) (一般)  
 研究期間：2014～2017  
 課題番号：26287122  
 研究課題名(和文) 太陽系の外惑星領域における磁気圏ダイナミクス

研究課題名(英文) Magnetospheric dynamics of outer planets

## 研究代表者

藤本 正樹 (FUJIMOTO, Masaki)

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

研究者番号：30242811

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 高マッハ数土星磁気圏バウ・ショックを、「その場」観測が可能な宇宙プラズマ中での稀な事例と捉えて、カッシーニ探査機のデータ解析を行った。(2) 巨大な木星磁気圏の活動の駆動源として、衛星イオからのガス供給効果、太陽風効果、の二つが協働して磁気圏活動度を決定している様相を「ひさき」衛星データから明らかにした。(3) 木星磁気圏環境において機能する軽量な高エネルギー粒子観測器を設計し、その機能検証を行い、基本的性能を確認した。

研究成果の概要(英文)：(1) Relativistic electron acceleration in a high Mach number parallel shock: A high Mach number case was found in the Kronian bow shock observations and enabled opportunities of in-situ observations of plasma physics of high Mach number shocks. The high Mach number parallel shock showed relativistic acceleration of electrons. (2) Driver of the Jovian magnetospheric dynamics: Two competing ideas for the Jovian magnetospheric activities are plasma degassing from the innermost satellite of Io and variation in the solar wind. The JAXA Hisaki mission that provides continuous monitoring of the Jovian system enabled us to tell how the two factors collaborate to determine the Jovian auroral activity. (3) High energy particle detector onboard a Jupiter mission: Light-weight in-situ particle instruments that works under the harsh environment of the Jovian magnetosphere has been designed and its performance has been tested.

研究分野：宇宙プラズマ物理

キーワード：木星磁気圏 衝撃波での粒子加速 カッシーニ土星探査機 「ひさき」衛星 検出器信号読み出し系 ASIC  
 小面積真空之層SSD APD

### 1. 研究開始当初の背景

外惑星磁気圏は、魅力的な研究対象である。本研究以前は、地球磁気圏における詳細観測と数値実験を組み合わせることから、宇宙空間を満たすプラズマガスの物理を理解するという研究スタイルを実行していた。研究室に外国人ポスドクを受け入れることとなり、彼らを通じて、木星探査機ガリレオ、土星探査機カッシーニ、さらには、ハッブル宇宙望遠鏡による木星オーロラ観測データが入手可能となった。さらには、JAXA 科学衛星「ひさき」による木星磁気圏ダイナミクスの連続モニターデータも入手可能となった。これらをチャンスと捉え、外惑星磁気圏を対象とする研究を開始した。

### 2. 研究の目的

磁気圏研究者で木星を意識しない者はいないと言っても過言ではないだろう。この研究は、太陽系の外側に位置する木星・土星での太陽風・磁気圏作用の本質に迫るものである。われわれは、最新の研究成果に基づき、「外惑星領域における太陽風・磁気圏相互作用においては、磁気圏境界での磁気リコネクションの効果はマイナーである。そこでは、太陽風動圧の変化が主に磁気圏活動を誘発している。」という作業仮説を持つに至った。本研究は、この視座から研究を展開し、これまでに獲得した地球磁気圏での知見と比較検討することで、「太陽系の外惑星領域における磁気圏ダイナミクス」という大きな描像へと達することを目標とする。同時に、巨大磁気圏における粒子加速過程の解明という、将来目標を意識した観測機器の初期開発も実施する。

### 3. 研究の方法

テーマごとに簡潔に述べる：(1)地球での太陽風観測データと MHD 計算から木星での太陽風動圧を推定、動圧上昇がある期間の Galileo 磁場・粒子データを調査して木星磁気圏の応答を把握(2) Cassini が磁気圏境界を横切った事例から、探査機位置と電子フラックス非等方性とシース磁場をコンパイル、推定される磁気リコネクション位置がシース磁場にどう応答して変化するかを把握。(3) Cassini が観測した事例中で最高のマッハ数(おそらくは太陽系観測史上、最高マッハ数)に類するものに限定して詳細な事例解析。パラメータ選定等に注意し、連携させた粒子シミュレーションを実施。(4)半導体エネルギー検出器からの信号読み出しを高速化するための基礎開発を実施。

### 4. 研究成果

(1)土星磁気圏の前面バウ・ショックを、「その場」観測が可能な宇宙プラズマ中の高マッハ数のサンプルであるとして、NASA・カッシーニ探査機のデータ解析を行った。そこから、高マッハ数の平行衝撃波においては相対論的電子が加速されているという事象を

発見し、その加速機構に寄与すると考えられる衝撃波面上流での磁場擾乱の解析を行った。(2)巨大な木星磁気圏の活動の駆動源として、(A)その内部にある衛星イオからのガス供給の効果、(B)磁気圏の外側を流れる太陽風の効果、の二つが考えられている。ここでの研究から、この二つの要素が協働して磁気圏活動度を決定している様相が JAXA「ひさき」衛星のデータを解析することで明らかとなった。太陽風動圧が上昇することで磁気圏活動が誘発され得ること、その事象間の時間間隔が長くより多くのイオからのプラズマが磁気圏内に蓄積する程、誘発される活動度が高いこと、が最も重要な発見である。(3)木星磁気圏物理においては、粒子加速機構の観測的理解は最重要課題である。木星環境において機能する軽量な高エネルギー粒子観測器を設計し、その機能検証を行い、基本的な性能が発揮されていることを確認した。カッシーニ探査機データによる高マッハ数衝撃波の研究について、相対論的電子加速を伴う平行衝撃波は2例しか見つからなかった。その希少性だけでなく、最初に見つけた事例を本研究において詳細に研究し、超新星残骸といった天文学的現場において期待される電子加速機構に言及できたことは、その学際的な特性は特筆に値すると考える。太陽風動圧の上昇が木星磁気圏の活動度に与える影響というテーマは、当初は、木星探査機ガリレオのデータ解析で追究する予定であった。「ひさき」が打ち上げられ、そのデータが様相が見えるようになって、ガリレオの「その場」観測(磁気圏内の一点での観測)データよりも「ひさき」による磁気圏全体の状況をモニターするデータのほうが、テーマ探究に適していることがわかった。この方針転換をした後にいくつかの発見があり、かつ、「ひさき」と NASA 木星探査機 JUNO との共同観測テーマも発掘できた。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 9件)

Yoshioka, Kazuo, Tsuchiya, Fuminori, Kimura, Tomoki, Kagitani, Masao, Fujimoto, Masaki, Radial variation of sulfur and oxygen ions in the Io plasma torus as deduced from remote observations by Hisaki, Journal of Geophysical Research. A: Space Physics, Vol.122(3), 2017年、2999-3012、10.1002/2016JA023691、査読有、国際共著  
Kimura, Tomoki, Nicholas, J. D., Gray, R. L., Tao, Chihiro, Murakami, Go, Yamazaki, Atsushi, Badman, S. V., Tsuchiya, Fuminori, Fujimoto, Masaki, Transient brightening of Jupiter's

aurora observed by the Hisaki satellite and Hubble Space Telescope during approach phase of the Juno spacecraft, *Geophysical Research Letters*, Vol. 44(10), 2017年, 4523-4531, 10.1002/2017GL072912, 査読有、国際共著  
Nicholas, J. D., Badman, Sarah V., Bagenal, F., Bolton, S. J., Bonfond, B., Bunce, E. J., Clark, J. T., Connemy, J. E. P., Cowley, S. W. H., Ebert, R. W., Fujimoto, Masaki, Response of Jupiter's auroras to conditions in the interplanetary medium as measured by the Hubble Space Telescope and Juno, *Geophysical Research Letters*, Vol. 44(15), 2017年, 7643-7652, 10.1002/2017GL073029, 査読有  
Yoshikawa, Ichiro; Yoshioka, Kazuo; Murakami, Go; Suzuki, Fumiharu; Hikida, Reina; Yamazaki, Atsushi; Kimura, Tomoki; Tsuchiya, Fuminori; Kagitani, Masato; Sakanoi, Takeshi; Uemizu, Kazunori; Tao, Chihiro; Nozawa, Hiromasa; Kasaba, Yasumasa; Fujimoto, Masaki, Properties of hot electrons in the Jovian inner magnetosphere deduced from extended observations of the Io Plasma Torus, *Geophysical Research Letters*, 査読無し, Volume 43, Issue 22, 2016年, 11,552-11,557, 10.1002/2016GL070706  
Kita, Hajime; Kimura, Tomoki; Tao, Chihiro; Tsuchiya, Fuminori; Misawa, Hiroaki; Sakanoi, Takeshi; Kasaba, Yasumasa; Murakami, Go; Yoshioka, Kazuo; Yamazaki, Atsushi; Yoshikawa, Ichiro; Fujimoto, Masaki, Characteristics of solar wind control on Jovian UV auroral activity deciphered by long-term Hisaki EXCEED observations: Evidence of preconditioning of the magnetosphere?, *Geophys. Res. Lett.*, 査読無し, Volume 43, Issue 13, 2016年, 6790-6798, 10.1002/2016GL069481  
Masters, A.; Sulaiman, A. H.; Sergis, N.; Stawarz, L.; Fujimoto, M.; Coates, A. J.; Dougherty, M. K., Suprathermal Electrons at Saturn's Bow Shock, *The Astrophysical Journal*, 査読無し, Volume 826, 2016年, 論文番号 48, 全7ページ, 10.3847/0004-637X/826/1/48, Kimura, T.; Badman, S. V.; Tao, C.; Yoshioka, K.; Murakami, G.; Yamazaki, A.; Tsuchiya, F.; Bonfond, B.; Steffl, A. J.; Masters, A.; Kasahara, S.; Hasegawa, H.; Yoshikawa, I.; Fujimoto, M.; Clarke, J. T., Transient internally driven aurora at Jupiter

discovered by Hisaki and the Hubble Space Telescope, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 42 卷 2015 年, 1662, 1668, 国際共著, 10.1002/2015G L063272, 2015. H. Sulaiman, A. Masters, K. Dougherty, D. Burgess, M. Fujimoto, and G.B. Hospodarsky, Quasiperpendicular High Mach Number Shocks, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, 115 卷, 2015 年, 125001-1, 5, 国際共著, 10.1103/PhysRevLett.115.125001  
Masters, A., M. Fujimoto, H. Hasegawa, C. T. Russell, A. J. Coates, and M. K. Dougherty, Can magnetopause reconnection drive Saturn's magnetosphere?, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 41 卷, 1862&#8211;1868, doi:10.1002/2014G L059288

〔学会発表〕(計 13 件)

北元, 木村 智樹, 埜 千尋, 土屋 史紀, 山崎 敦, 吉岡 和夫, 三澤 浩昭, 坂野井 健, 笠羽 康正, 吉川 一朗, 藤本 正樹, Characteristics of solar wind control on Jovian UV auroral activity obtained from Hisaki EXCEED and ground-based observation, JpGU-AGU 共同大会 2017, 2017 年  
Masaki FUJIMOTO, Kenya SHIMIZU, Iku SHINOHARA, Temperature Anisotropy Enables Reconnection to Be Triggered in a Thick Current Sheet, AOGS, 2017 年  
Kenya Shimizu Masaki Fujimoto Iku Shinohara, Triggering of explosive reconnection in a thick current sheet by temperature anisotropy boosted tearing mode, AGU (国際学会), 2016 年 12 月 12 日 ~ 2016 年 12 月 16 日, サンフランシスコ  
Tooru Sugiyama Masaki Fujimoto, Co-evolution of upstream waves and accelerated ions at parallel shocks, AGU (国際学会), 2016 年 12 月 12 日 ~ 2016 年 12 月 16 日, サンフランシスコ  
Adam Masters Ali Sulaiman Nick Sergis Lukasz Stawarz Masaki Fujimoto Andrew J Coates Michele Karen Dougherty, Cassini Observations of Saturn's High-Mach Number Bow Shock, AGU (国際学会), 2016 年 12 月 12 日 ~ 2016 年 12 月 16 日, サンフランシスコ  
Jonathan D Nichols John T Clarke Glenn S Orton Stanley W H Cowley Emma J Bunce Tom Stallard Sarah Victoria Badman Denis C Grodent Bertrand Bonfond Katerina Radioti Jean-Claude M C Gerard Randy Gladstone Fran Bagenal John E P Philip W Valek Robert W Ebert David J McComas Barry Mauk Ichiro

Yoshikawa, Masaki Fujimoto,  
Jupiter's auroras during the Juno  
approach phase as observed by the  
Hubble Space Telescope, AGU (国際学  
会)2016年12月12日~2016年12月16  
日、サンフランシスコ  
Go Murakami, Kazuo Yoshioka, Atsushi  
Yamazaki, Fuminori Tsuchiya, Tomoki  
Kimura, Chihiro Tao, Masato Kagitani,  
Takeshi Sakanoi, Kazunori Uemizu,  
Yasumasa Kasaba, Masaki Fujimoto,  
Solar wind influence on the Jovian  
inner magnetosphere observed by H  
isaki/EXCEED, AGU 2015(国際学会),  
2015年12月14日~2015年12月18日、  
サンフランシスコ  
Go MURAKAMI, Kazuo YOSHIOKA, Tomoki  
KIMURA, Atsushi YAMAZAKI, Fuminori  
TSUCHIYA, Masato KAGITANI, Chihiro  
TAO, Ichiro YOSHIKAWA, Masaki  
FUJIMOTO, 6 Variations of  
Dawn-Dusk A symmetry in Io Plasma  
Torus Detected by HISAKI/EXCEED, AOGS  
2015(国際学会), 2015年08月02日~  
2015年08月07日、シンガポール  
Kazuo YOSHIOKA, Go MURAKAMI, Tomoki  
KIMURA, Atsushi YAMAZAKI, Fuminori  
TSUCHIYA, Masato KAGITANI, Takeshi  
SAKANO I, Yasumasa KASABA, Masaki  
FUJIMOTO, Ichiro YOSHIKAWA,  
Plasma Dynamics in the Jovian Inner  
Magnetosphere; Observation from the  
EUV Spectroscopy, EXCEED, AOGS 2015  
(国際学会), 2015年08月02日~2015  
年08月07日、シンガポール  
天野 孝伸 ; 星野 真弘 ; 齋藤 義  
文 ; 藤本 正樹; 無衝突衝撃波探査衛  
星のサイエンス, JpGU 2015, 2015年05  
月24日~2015年05月28日、幕張  
Satoshi Kasahara, et al., incl. M.  
Fujimoto, In-situ observations of  
magnetic reconnection in the Jovian  
nightside magnetosphere, AGU (招待講  
演), 2014年12月15日~2014年12月  
19日、Moscone Center/ San Francisco  
Masaki Fujimoto, Distinguished  
Lecture: Comparative Magnetospheric  
Study: Now the Time, AOGS(招待講演),  
2014年07月28日~2014年08月01日、  
札幌ロイトンホテル  
KITAGAWA, Hirotaka; KASAHARA,  
Satoshi; TAO, Chihiro; KIMURA,  
Tomoki; FUJIMOTO, Masaki, Dependence  
of Jovian Magnetopause Location on  
Solar Wind Dynamic Pressure, JpGU,  
2014年04月28日~2014年05月02日、  
パシフィコ横浜

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 正樹 (FUJIMOTO, Masaki)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教  
授

研究者番号: 30242811

(2) 研究分担者

齋藤 義文 (SAITO, Yoshifumi)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・  
教授

研究者番号: 30260011

(3) 研究分担者

篠原 育 (SHINOHARA, Iku)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・  
准教授

研究者番号: 20301723

(4) 研究分担者

笠原 慧 (KASAHARA, Satoshi)

東京大学大学院理学系研究科・准教授

研究者番号: 00550500