

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：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400476

研究課題名(和文)木星内部磁気圏におけるプラズマ輸送過程の実証的研究

研究課題名(英文)Transport of plasma mass and energy in the Jovian inner magnetosphere

研究代表者

土屋 史紀(Tsuchiya, Fuminori)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：10302077

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：磁気圏は、地球に代表される「太陽風駆動型」と木星に代表される「自転駆動型」に大別できます。木星磁気圏に自転駆動型の特徴を与える要因は、磁気圏内部に衛星イオというプラズマ源が存在することだと考えられています。本研究ではひさき衛星に搭載された極端紫外線分光撮像装置のデータを用いた実証的な研究を行いました。イオ起源のプラズマが蓄積されることによる磁気圏の不安定化が発生し、そこで解放されたエネルギーが外部磁気圏から内部磁気圏に急速に分配される事、イオの火山活動の活発化によって、エネルギーの分配過程が活発化することが観測により同定され、衛星起源のプラズマが磁気圏を特徴づけていることが明らかになりました。

研究成果の概要(英文)：The innermost Galilean satellite, Io, supplies a large amount of volcanic gases to the Jovian magnetosphere, and the outward transport of ionized gasses is responsible for forming a huge and rotation-dominant magnetosphere. The plasma supply from the satellite has a key role in the characterization of the Jovian magnetosphere. Using a continuous data set of the Io plasma torus obtained from an extreme ultraviolet spectroscopy onboard the HISAKI satellite, it is found that the volcanic eruptions in Io caused significant variations of the plasma population in the inner magnetosphere. Intense short-lived auroral brightenings which represent transient energy releases in the outer part of the magnetosphere occurred frequently during this period. This is the first observational evidence showing that the strength of a plasma source in the inner magnetosphere can control a large-scale radial circulation of mass and energy in a rotation-dominant magnetosphere.

研究分野：惑星磁気圏物理学

キーワード：木星磁気圏 イオ ひさき衛星

1. 研究開始当初の背景

太陽系の惑星の磁気圏は、地球に代表される「太陽風駆動型」と木星に代表される「自転駆動型」に大別できます。木星磁気圏に自転駆動型の特徴を与える要因は、磁気圏内部に衛星イオというプラズマ源が存在することだと考えられています。しかし、衛星イオの存在が木星磁気圏にどのような影響をもたらしているのかを研究するために必要な観測データは未だ十分に得られておらず、木星磁気圏内のプラズマ輸送の物理過程は明らかになっていません。

2. 研究の目的

2013年9月に日本が打ち上げた「ひさき衛星」に搭載された極端紫外線分光撮像装置の観測データを用い、木星磁気圏のプラズマ源とプラズマ輸送の課題に対して実証的なアプローチで研究を行います。極端紫外線分光観測によって、衛星イオ起源のプラズマと、磁気圏の活動度の指標となるオーロラを、同時に長期間観測することにより、衛星イオという木星磁気圏の主要なプラズマ源が、磁気圏内のプラズマの加熱と輸送に対しどのような影響を及ぼすのかを観測的に明らかにします。

3. 研究の方法

プラズマやガスから放射される極端紫外線スペクトルから、プラズマパラメータやガスの密度といった物理量を導出するとともに、特定の観測対象(木星)を長期間連続的にモニタできる、ひさき衛星観測の特徴を最大限に生かし、木星磁気圏の時間応答という観点、すなわち、木星磁気圏のプラズマ源の時間変化が発生した時に、その影響が木星磁気圏内部のプラズマの密度・温度とオーロラ活動にどのような変動をもたらすのか、を観測的に調査します。

4. 研究成果

2015年の1-2月に衛星イオで火山活動が一時的に活発となる、という貴重な機会に巡り合うことができました。この時期のひさき衛星の観測から、火山活動の活発化に伴って、(1)イオ起源の二酸化硫黄ガスの解離により生じる酸素原子量が増大した事、(2)原子のイオン化に伴い、内部磁気圏のプラズマ量が増大した事、(3)プラズマが磁気圏外側の領域に徐々に輸送され、これがオーロラ活動を活発化させた事、(4)オーロラ活動の活発化とともに、磁気圏内で解放されたエネルギーは急速に内部磁気圏に輸送され、内部磁気圏のプラズマ加熱を引き起こすこと、が明らかとなりました。これらは、木星のような回転駆動型の磁気圏でのエネルギー開放に、磁気圏内部のプラズマ源の大きさが寄与していることを示す初めての観測結果であり、衛星起源のプラズマが木星磁気圏の性質を特徴づけていることが明らかになりました。

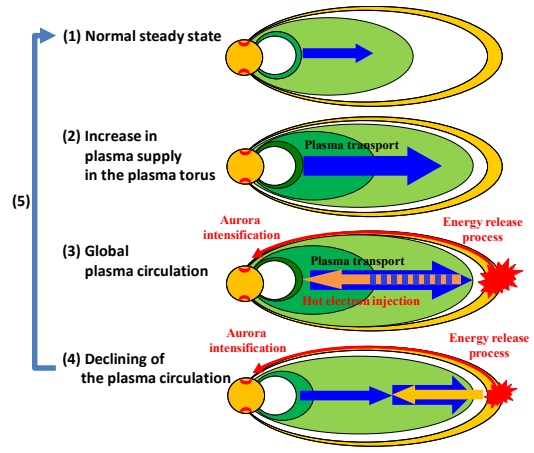


図1: イオの火山活動の変化が磁気圏の動的性質に及ぼす影響

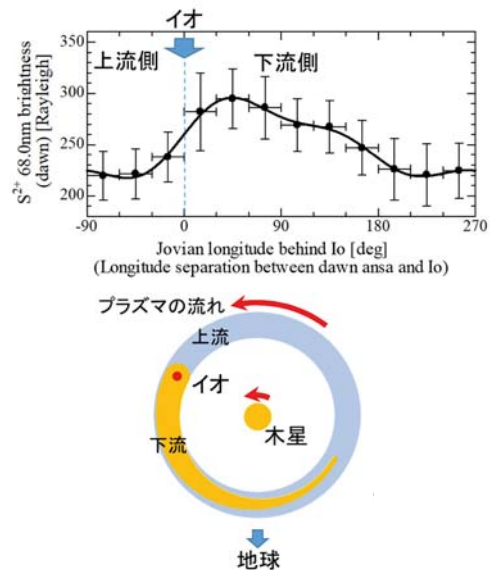


図2: (上) 衛星イオの軌道に沿った二価の硫黄イオン発光強度の空間分布。イオの下流側で発光強度が増大していることが分かる。(下) 発光強度の空間分布の模式図。

更に、ひさき衛星が2014年に観測したデータを用いて、衛星イオと木星磁気圏との相互作用の結果発生する電子加熱現象を調査しました。2週間分のデータを用いた統計的な解析から、衛星イオの周辺では数100GWの電子加熱が定常的に発生し、これが内部磁気圏での電子加熱の10-20%を担っていることが明らかとなりました。衛星と磁気圏の電磁的な相互作用の研究を、ひさき衛星の観測を用いて実施可能であることが分かり、今後、この切り口での研究を更に発展をさせていきたいと考えています。

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21件)

1. Tao, C., Kimura, T., Tsuchiya, F., Muirakami, G., Yoshioka, K., Yamazaki,

- A., S. V. Badman, Misawa, H., Kita, H., Kasaba, Y., Yoshikawa, I., Fujimoto, M. (2018) Variation of Jupiter's Aurora Observed by Hisaki/EXCEED: 3. Volcanic Control of Jupiter's Aurora, *Geophysical Research Letters*, 査読有, doi:10.1002/2017GL075814
2. Koga, R., Tsuchiya, F., Kagitani, M., Sakanoi, T., Yoneda, M., Yoshioka, K., Kimura, T., Murakami, G., Yamazaki, A., Yoshikawa, I., Smith, H. T. (2018) The time variation of atomic oxygen emission around Io during a volcanic event observed with Hisaki/EXCEED, *ICARUS*, 査読有, doi:10.1016/j.icarus.2017.07.024
 3. Kimura, T., Y. Hiraki, C. Tao, F. Tsuchiya, P. A. Delamere, K. Yoshioka, G. Murakami, A. Yamazaki, H. Kita, S. V. Badman, K. Fukazawa, I. Yoshikawa, M. Fujimoto (2018) Response of Jupiter's Aurora to Plasma Mass Loading Rate Monitored by the Hisaki Satellite During Volcanic Eruptions at Io, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, doi: 10.1002/2017JA025029
 4. Yoshioka, K., F. Tsuchiya, T. Kimura, M. Kagitani, G. Murakami, A. Yamazaki, M. Kuwabara, F. Suzuki, R. Hikida, I. Yoshikawa, and M. Fujimoto, F. Bagenal (2017) Radial variation of sulfur and oxygen ions in the Io plasma torus as deduced from remote observations by Hisaki, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, doi:10.1002/2016JA023691
 5. Kasaba, Y., T Imamura, F Tsuchiya, N Terada, Y Miyoshi, Y Kasai and Y Saito (2017) Planetary plasma and atmospheres explored by space missions in Japan: Hisaki, Akatsuki, and beyond, *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, doi:10.1088/1742-6596/869/1/012094
 6. Tsuchiya, F., K Yoshioka, T Kimura, G Murakami, C Tao, H Kita, I Yoshikawa, A Yamazaki, Y Kasaba (2017) Three-year of observations of Jupiter's aurora and Io plasma torus variabilities by earth orbiting extreme-ultraviolet spectroscopy HISAKI, *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, doi:10.1088/1742-6596/869/1/012069
 7. Kimura, T., J. D. Nichols, R. L. Gray, C. Tao, G. Murakami, A. Yamazaki, S. V. Badman, F. Tsuchiya, K. Yoshioka, H. Kita, D. Grodent, G. Clark, I. Yoshikawa, and M. Fujimoto (2017) Auroral explosion at Jupiter observed by the Hisaki satellite and Hubble Space Telescope during approaching phase of the Juno spacecraft, *Geophysical Research Letters*, 査読有, doi:10.1002/2017GL072912
 8. Yoshikawa, I., F Suzuki, R Hikida, K Yoshioka, G Murakami, F Tsuchiya, C Tao, A Yamazaki, T Kimura, M Fujimoto (2017) Volcanic activity on Io and its influence on the dynamics of Jovian magnetosphere, observed by EXCEED/Hisaki in 2014, *Progress in Earth and Planetary Science*, 査読有, doi:10.1186/s40623-017-0700-9
 9. Murakami, G., K. Yoshioka, A. Yamazaki, F. Tsuchiya, T. Kimura, C. Tao, H. Kita, M. Kagitani, T. Sakanoi, K. Uemizu, Y. Kasaba, I. Yoshikawa, and M. Fujimoto (2016) Response of Jupiter's inner magnetosphere to the solar wind derived from extreme ultraviolet monitoring of the Io plasma torus, *Geophysical Research Letters*, 査読有, doi:10.1002/2016GL071675
 10. Yoshikawa, I., K. Yoshioka, G. Murakami, F. Suzuki, R. Hikida, A. Yamazaki, T. Kimura, F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Sakanoi, K. Uemizu, C. Tao, H. Nozawa, Y. Kasaba, and M. Fujimoto (2016) Properties of hot electrons in the Jovian inner magnetosphere deduced from extended observations of the Io Plasma Torus, *Geophysical Research Letters*, 査読有, doi:10.1002/2016GL070706
 11. Badman, S. V., B. Bonfond, M. Fujimoto, R. L. Gray, Y. Kasaba, S. Kasahara, T. Kimura, H. Melin, J. D. Nichols, A. J. Steffl, C. Tao, F. Tsuchiya, A. Yamazaki, M. Yoneda, I. Yoshikawa, and K. Yoshioka (2016) Weakening of Jupiter's main auroral emission during January 2014, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, doi:10.1002/2015GL067366
 12. Kimura, T., R. Kraft, R. Elsner, G. Branduardi-Raymont, R. Gladstone, C. Tao, K. Yoshioka, G. Murakami, A. Yamazaki, F. Tsuchiya, M. F. Vogt, A. Masters, H. Hasegawa, S. V. Badman, E. Roediger, Y. Ezo, I. Yoshikawa, M. Fujimoto, and S. S. Murray (2016) Jupiter's X-ray and EUV auroras monitored by Chandra, XMM-Newton, and Hisaki satellite, 査読有, doi:Journal of Geophysical Research, 10.1002/2015JA021893
 13. Kita, H., T. Kimura, C. Tao, F. Tsuchiya, H. Misawa, T. Sakanoi, Y. Kasaba, G. Murakami, K. Yoshioka, A.

- Yamazaki, I. Yoshikawa, and M. Fujimoto (2016) 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.*, 査読有, doi:10.1002/2016GL069481
14. Tao, C., T. Kimura, S. V. Badman, G. Murakami, K. Yoshioka, F. Tsuchiya, N. André, I. Yoshikawa, A. Yamazaki, D. Shiota, H. Tadokoro, M. Fujimoto (2016) Variation of Jupiter's Aurora Observed by Hisaki/EXCEED: 1. Observed 1 Characteristics of the Auroral Electron Energies Compared with observations performed using HST/STIS, 査読有, doi:Journal of Geophysical Research, 10.1002/2015JA021271
 15. Tsuchiya, F., M. Kagitani, K. Yoshioka, T. Kimura, G. Murakami, A. Yamazaki, H. Nozawa, Y. Kasaba, T. Sakanoi, K. Uemizu, I. Yoshikawa (2015) Local electron heating in the Io plasma torus associated with Io from HISAKI satellite observation, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, doi:10.1002/2015JA021420
 16. Yoneda, M., M. Kagitani, F. Tsuchiya, T. Sakanoi, S. Okano (2015) Brightening event seen in observations of Jupiter's extended sodium nebula, *ICARUS*, 査読有, doi:10.1016/j.icarus.2015.07.037
 17. Tao, C., T. Kimura, S. V. Badman, G. Murakami, K. Yoshioka, F. Tsuchiya, N. André, I. Yoshikawa, A. Yamazaki, M. Fujimoto (2015) Variation of Jupiter's Aurora Observed by Hisaki/EXCEED: 2. Estimations of Auroral Parameters and Magnetospheric Dynamics, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, doi:10.1002/2015JA021272
 18. Kimura, T., S. V. Badman, C. Tao, K. Yoshioka, G. Murakami, A. Yamazaki, F. Tsuchiya, B. Bonfond, A. J. Steffl, A. Masters, S. Kasahara, H. Hasegawa, I. Yoshikawa, M. Fujimoto and J. T. Clarke (2015) Transient internally driven aurora at Jupiter discovered by Hisaki and the Hubble Space Telescope, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, doi:10.1002/2015GL063272
 19. Yoshioka, K., Murakami, G., Yamazaki, A., Tsuchiya, F., Kimura, T., Kagitani, M., Sakanoi, T., Uemizu, K. Kasaba, Y., Yoshikawa, I., Fujimoto, M. (2014) Evidence for global electron transportation into the jovian inner magnetosphere, *Science*, 査読有, doi:10.1126/science.1256259
 20. Yoshikawa, I., K. Yoshioka, Go. Murakami, A. Yamazaki, F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Sakanoi, T. Kimura, M. Kuwabara, K. Fujiwara, T. Hamaguchi, H. Tadokoro (2014) Extreme Ultraviolet Radiation measurement for planetary atmospheres/magnetospheres from the Earth-orbiting spacecraft (Extreme Ultraviolet Spectroscope for Exospheric Dynamics: EXCEED), *Space Science Reviews*, 査読有, doi:10.1007/s11214-014-0077-z
 21. Yamazaki, A., F. Tsuchiya, T. Sakanoi, K. Uemizu, K. Yoshioka, G. Murakami, M. Kagitani, Y. Kasaba, I. Yoshikawa, N. Terada, T. Kimura, S. Sakai, K. Nakaya, S. Fukuda, and S. Sawai (2014) Field-Of-View guiding camera on the HISAKI (SPRINT-A) satellite, *Space Science Reviews*, 査読有, doi:10.1007/s11214-014-0106-y
- [学会発表] (計 17 件)
1. Tsuchiya, F., K. Yoshioka, M Kagitani, T Kimura, G Murakami, A Yamazaki, H Misawa, Y. Kasaba, I Yoshikawa, T Sakanoi, R Koga, A Ryo, F Suzuki and R Hikida, Effect of plasma density around Io on local electron heating in the Io plasma torus, AGU fall meeting, 2017
 2. Tsuchiya, F., T Kimura, K. Yoshioka, M Yoneda, R Koga, M Kagitani, G Murakami, C Tao, H Misawa, A Yamazaki, I Yoshikawa, Y. Kasaba, and HISAKI science team, Enhancement of Jovian magnetospheric plasma circulation due to mass supply change from the satellite Io, Magnetospheres of outer planets 2017, 2017
 3. Tsuchiya, F., K. Yoshioka, T. Kimura, G Murakami, C Tao, M Kagitani, M Yoneda, R Koga, H Kita, I Yoshikawa, A Yamazaki, Y Kasaba, Three-year of observations of Jupiter's aurora and Io plasma torus variabilities by extreme-ultraviolet spectroscope HISAKI and future directions, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017 (招待講演)
 4. 土屋史紀、古賀亮一、米田瑞生、吉岡和夫、木村智樹、村上豪、吉川一郎、山崎敦、衛星イオから木星磁気圏へのプラズマ供給過程、太陽惑星系宇宙プラズマ中の重イオンに関する研究集会, 2017 (招待講演)

5. Tsuchiya, F., K. Yoshioka, T. Kimura, G. Murakami, C. Tao, H. Kita, I. Yoshikawa, A. Yamazaki, Y. Kasaba, Three Years of Observations of Jupiter's Aurora and Io Plasma Torus Variabilities by Earth Orbiting Extreme-Ultraviolet Spectroscope HISAKI, The International Conference Frontiers in Theoretical and Applied Physics (FTAPS 2017), 2017
 6. 土屋史紀, 木村智樹, 埜千尋, 吉岡和夫, 田所裕康, 鍵谷将人, 村上豪, 山崎敦, 吉川一朗, ひさきサイエンスチーム, ひさき衛星による木星オーロラ・プラズマトラスの極端紫外線観測, 「プラズマ科学における分光計測の高度化と原子分子過程研究の新展開」 「原子分子データ応用フォーラムセミナー」合同研究会, 2016 (招待講演)
 7. Tsuchiya, F., M. Kagitani, M. Yoneda, R. Koga, T. Kimura, K. Yoshioka, G. Murakami, C. Tao, H. Misawa, A. Yamazaki, I. Yoshikawa, Y. Kasaba, T. Sakanoi, and HISAKI science team, Io's volcanic influence on the Jovian magnetosphere: Observational evidence from the HISAKI observation, AGU fall meeting, 2016
 8. Tsuchiya, F., K. Yoshioka, T. Kimura, G. Murakami, M. Yoneda, R. Koga, M. Kagitani, H. Nozawa, C. Tao, H. Misawa, T. Sakanoi, Y. Kasaba, A. Yamazaki, I. Yoshikawa, Io's volcanic influence on the Jovian magnetosphere: HISAKI observation, JPGU 2016, 2016
 9. Tsuchiya, F., K. Yoshioka, T. Kimura, G. Murakami, M. Yoneda, R. Koga, M. Kagitani, H. Nozawa, C. Tao, T. Sakanoi, Y. Kasaba, A. Yamazaki and I. Yoshikawa, Io's volcanic influence on the Io plasma torus: HISAKI observation, Symposium on Planetary Science 2016, 2016
 10. 土屋史紀, 米田瑞生, 古賀亮一, 吉岡和夫, 木村智樹, 村上豪, 野澤博正, 鍵谷将人, 坂野井健, 笠羽康正, 吉川一朗, 衛星イオからのイオン散逸とイオ下流域での電子加熱 -ひさき衛星観測-, 太陽惑星系宇宙プラズマ中の重イオンに関する研究集会, 2016 (招待講演)
 11. Tsuchiya, F., K. Yoshioka, T. Kimura, G. Murakami, M. Yoneda, R. Koga, M. Kagitani, T. Sakanoi, Y. Kasaba, A. Yamazaki, I. Yoshikawa, Io's volcanic influence on the Io plasma torus: HISAKI observation in 2015, AGU fall meeting, 2015
 12. Tsuchiya, F., M. Kagitani, K. Yoshioka, H. Nozawa, T. Kimura, G. Murakami, A. Yamazaki, Y. Kasaba, T. Sakanoi, I. Yoshikawa, Local electron heating in the Io plasma torus associated with Io observed by the HISAKI satellite, ISAS Workshop: Magnetospheric Plasmas 2015, 2015
 13. Tsuchiya, F., M. Kagitani, K. Yoshioka, H. Nozawa, T. Kimura, G. Murakami, A. Yamazaki, Y. Kasaba, T. Sakanoi, I. Yoshikawa, Local electron heating around Io observed by HISAKI/EXCEED, AOGS 2015, 2015
 14. 土屋史紀, 鍵谷将人, 米田瑞生, 古賀亮一, 坂野井健, 笠羽康正, 吉岡和夫, 木村智樹, 村上豪, 山崎敦, 吉川一朗, ひさき衛星がとらえた 衛星イオの火山活動変動, 衛星系研究会 2015: 衛星系系と噴火現象, 2015 (招待講演)
 15. Tsuchiya, F., M. Kagitani, K. Yoshioka, H. Nozawa, T. Kimura, G. Murakami, A. Yamazaki, Y. Kasaba, T. Sakanoi, I. Yoshikawa, Local electron heating in the Io plasma torus associated with Io observed by the HISAKI satellite, Magnetospheres of outer planets 2015, 2015
 16. Tsuchiya, F., M. Kagitani, K. Yoshioka, H. Nozawa, T. Kimura, G. Murakami, A. Yamazaki, Y. Kasaba, T. Sakanoi, I. Yoshikawa, Local electron heating around Io observed by the HISAKI satellite, JPGU 2015, 2015
 17. Tsuchiya, F., K. Yoshioka, T. Kimura, G. Murakami, M. Kagitani, A. Yamazaki, Y. Kasaba, T. Sakanoi, I. Yoshikawa and H. Nozawa, Local electron heating in the Io plasma torus associated with Io: the HISAKI observation, AGU fall meeting, 2014
- [その他]
- ホームページ等
- ISAS ニュース, 宇宙科学最前線・「ひさき」特集,
http://www.isas.jaxa.jp/feature/special_issues/hisaki/
 - 木星を取り囲む高温のプラズマリング
～惑星分光観測衛星「ひさき」がイオからの大気流出と加熱現象～
<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2016/05/award20160512-01.html>
 - The influence of Io on Jupiter's Magnetosphere
<http://www.issibern.ch/teams/iojupitermagnet/>
 - JSPS Sakura project
<http://c.gp.tohoku.ac.jp/sakura/>
6. 研究組織

(1) 研究代表者

土屋 史紀 (TSUCHIYA, Fuminori)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：10302077

(2) 連携研究者

吉岡 和夫 (YOHIOKA, Kazuo)
東京大学・領域創成科学研究科・講師
研究者番号：70637131

八木 学 (YAGI, Manabu)
理化学研究所・計算科学研究センター・特別研究員
研究者番号：90647679

笠羽康正 (KASABA, Yasumasa)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：10295529

(3) 研究協力者

木村 智樹 (KIMURA, Tomoki)
埜 千尋 (TAO, Chihiro)