

平成 30 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03730

研究課題名(和文)電子ハイブリッド・MHD連成計算機実験による惑星放射線帯電子加速過程の研究

研究課題名(英文) Electron hybrid and MHD code cross-reference simulation for the study of radiation belt electrons in the planetary magnetospheres

研究代表者

加藤 雄人 (Kato, Yuto)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：60378982

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：磁化惑星で普遍的に生じている相対論的電子加速過程の解明を目的とした計算機シミュレーション研究を実施した。惑星磁気圏と太陽風との相互作用を解く磁気流体力学計算と、放射線帯でのプラズマ波動の発生と相対論的電子の加速過程を再現する電子ハイブリッドコードを組み合わせる「連成計算」により、地球および木星磁気圏を対象に、高効率な電子加速過程を引き起こすホイッスラーモード・コーラス放射の発生条件を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We studied the acceleration process of relativistic electrons in planetary radiation belts by conducting 'cross-reference' simulations. We carried out (1) the magnetohydrodynamic (MHD) code for the interaction between solar wind and planetary magnetospheres and (2) electron hybrid code simulations reproducing the generation of whistler-mode chorus emissions, which play crucial roles in the efficient acceleration process of relativistic electrons in planetary magnetospheres. Based on the simulation results, we revealed the condition required for the chorus generation in the terrestrial and Jovian magnetospheres.

研究分野：宇宙空間プラズマ物理学

キーワード：宇宙プラズマ・プラズマ波動 地球惑星磁気圏 太陽地球システム・宇宙天気 オーロラ・磁気嵐

### 1. 研究開始当初の背景

地球内部磁気圏には、地球周辺の宇宙空間で最もエネルギーの高い粒子により構成される領域「放射線帯」が存在する。放射線帯外帯を構成する相対論的高エネルギー電子は、太陽活動の影響を受けて生成と消滅を繰り返していることが明らかとなっている。また、放射線帯は地球だけでなく、太陽系の磁化惑星に共通して存在することが明らかとなっている。

放射線帯の生成過程では、磁気圏の赤道領域で自然発生するプラズマ波動、ホイッスラーモード・コーラス放射が重要な役割を果たすとされている。コーラス放射はプラズマ波動計測器を搭載した探査機が到達した全ての磁化惑星で観測されており、地球放射線帯で生じる物理過程は、磁化惑星に普遍的な粒子加速過程である可能性が指摘されている。一方で、コーラス放射の発生条件やスペクトル特性の決定要因、放射線帯電子の加速過程への影響については、未解明の問題が数多く残されている状況にある。

### 2. 研究の目的

本研究は、惑星磁気圏に普遍的な相対論的電子加速モデルを構築することを目的として実施された。地球放射線帯でのコーラス放射に関する研究の成果を惑星磁気圏にも適用して、コーラス放射がどのような環境で発生するかを理解し、加速過程が生じ得る磁気圏環境を明らかにすることを目指した。

### 3. 研究の方法

コーラス放射の発生と相対論的電子加速過程を同時に再現する電子ハイブリッドシミュレーションを、磁気圏構造の時空間変動を解く磁気流体力学(MHD)シミュレーションと連携して実施する連成計算により、惑星磁気圏内の相対論的電子がどこで・どのようにして作り出されるかを究明した。シミュレーションには高並列計算が可能な大型計算機を活用した。シミュレーションで用いる初期条件の選定と、シミュレーション結果の解釈には、地球および木星磁気圏での観測研究の成果を参考した。

### 4. 研究成果

コーラス放射の発生過程を再現する電子ハイブリッドコードを用いた計算を、初期条件として与える高エネルギー電子の速度分布と発生するコーラス放射との関連に着目して多数実施して、コーラス放射発生条件に関するデータベースを構築した。

MHD 計算では木星磁気圏を対象として、コーラス放射の発生頻度が高いことが示されているガニメデ衛星軌道近傍での木星磁気圏の磁場構造とプラズマ環境について調べ、特に磁場構造の磁気経度依存性と太陽風動圧への応答を明らかとした。さらに MHD 計算結果を初期条件として連成計算を実施した。

その結果、高エネルギー電子の数密度が一定の値以上となる条件で、非線形効果が卓越することを明らかとした。

以上の成果は学術論文として公表した他、6 件の招待講演を含む国内外の学会・研究会での講演で発表した。

本研究の成果は、2016 年 12 月に打ち上げられたジオスペース探査衛星あらせによる地球放射線帯領域でのコーラス放射と相対論的電子との相互作用過程の理解にも大きく貢献することが期待されている。また、本研究で用いた連成計算手法は、複数の大規模計算機シミュレーションを連携して実施する次世代の惑星電磁圏研究に活用可能であり、より密にコード間を連携した連成計算手法の開発研究が本課題の実施を契機として開始されている。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 19 件)

- ① [Katoh, Y.](#), H. Kojima, K. Asamura, Y. Kasaba, F. Tsuchiya, Y. Kasahara, T. Imachi, H. Misawa, A. Kumamoto, S. Yagitani, K. Ishisaka, T. Kimura, M. Hikishima, Y. Miyoshi, M. Shoji, M. Kitahara, O. Santolik, J. Bergman, W. Puccio, R. Gill, M. Wieser, W. Schmidt, S. Barabash, and J.-E. Wahlund, Software-type Wave-Particle Interaction Analyzer (SWPIA) by RPWI for JUICE: Science objectives and implementation, Proceedings of PRE8 (8th International Workshop on Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions), in press, 査読有.
- ② Kasahara, Y., Y. Kasaba, H. Kojima, S. Yagitani, K. Ishisaka, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, M. Ozaki, S. Matsuda, T. Imachi, Y. Miyoshi, M. Hikishima, [Y. Katoh](#), M. Ota, M. Shoji, A. Matsuoka, and I. Shinohara, The Plasma Wave Experiment (PWE) on board the Arase (ERG) Satellite, Earth Planets Space, doi:10.1186/s40623-018-0842-4, in press, 査読有.
- ③ Kumamoto, A., F. Tsuchiya, Y. Kasahara, Y. Kasaba, H. Kojima, S. Yagitani, K. Ishisaka, T. Imachi, M. Ozaki, S. Matsuda, M. Shoji, A. Matsuoka, [Y. Katoh](#), Y. Miyoshi, and T. Obara, High Frequency Analyzer (HFA) of Plasma Wave Experiment (PWE) onboard the ARASE spacecraft, Earth Planets Space, 70:82, doi:10.1186/s40623-018-0854-0, 2018, 査読有.
- ④ Hikishima, M., H. Kojima, [Y. Katoh](#), Y. Kasahara, [S. Kasahara](#), T. Mitani, N. Higashio, A. Matsuoka, Y. Miyoshi, K. Asamura, T. Takashima, S. Yokota, S.

- Matsuda, M. Kitahara, Data processing in the Software-type wave-particle interaction analyzer on board the Arase satellite, *Earth Planets Space*, 70:80, doi:10.1186/s40623-018-0856-y, 2018, 査読有.
- ⑤ Seki, K., Y. Miyoshi, Y. Ebihara, Y. Katoh, T. Amano, S. Saito, M. Shoji, A. Nakamizo, K. Keika, T. Hori, S. Nakano, K. Kamiya, N. Takahashi, Y. Omura, M. Nose, M.-C. Fok, T. Tanaka, A. Ieda, and A. Yoshikawa, Theory, Modeling, and Integrated studies in the Arase (ERG) project, *Earth Planets Space*, 70:17, doi:10.1186/s40623-018-0785-9, 2018, 査読有.
- ⑥ Hirai, K., Y. Katoh, N. Terada, and S. Kawai, Study of the Transition from MRI to Magnetic Turbulence via Parasitic Instability by a High-Order MHD Simulation Code, *Astrophys. J.*, 853, 174, doi:10.3847/1538-4357/aaa5b2, 2018, 査読有.
- ⑦ Katoh, Y., Y. Omura, Y. Miyake, H. Usui, and H. Nakashima, Dependence of generation of whistler-mode chorus emissions on the temperature anisotropy and density of energetic electrons in the Earth's inner magnetosphere, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 123, doi:10.1002/2017JA024801, 2018, 査読有.
- ⑧ Katoh, Y., H. Kojima, M. Hikishima, T. Takashima, K. Asamura, Y. Miyoshi, Y. Kasahara, S. Kasahara, T. Mitani, N. Higashio, A. Matsuoka, M. Ozaki, S. Yagitani, S. Yokota, S. Matsuda, M. Kitahara, and I. Shinohara, Software-type Wave-Particle Interaction Analyzer on board the Arase satellite, *Earth Planets Space*, 70:4, doi:10.1186/s40623-017-0771-7, 2018, 査読有.
- ⑨ Shoji, M., Y. Miyoshi, Y. Katoh, K. Keika, V. Angelopoulos, S. Kasahara, K. Asamura, S. Nakamura, and Y. Omura, Ion hole formation and nonlinear generation of Electromagnetic Ion Cyclotron waves: THEMIS observations, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 8730-8738, doi:10.1002/2017GL074254, 2017, 査読有.
- ⑩ Fukuda, Y., R. Kataoka, Y. Miyoshi, Y. Katoh, T. Nishiyama, K. Shiokawa, Y. Ebihara, D. Hampton, and N. Iwagami, Quasi-periodic rapid motion of pulsating auroras, *Polar Science*, 10, 3, 183-191, doi:10.1016/j.polar.2016.03.005, 2016, 査読有.
- ⑪ Nishiyama, T., Y. Miyoshi, Y. Katoh, T. Sakanoi, R. Kataoka, and S. Okano, Sub-structures with luminosity modulation and horizontal oscillation in pulsating patch: Principal component analysis application to pulsating aurora, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 2360-2373, doi:10.1002/2015JA022288, 2016, 査読有.
- ⑫ Sato, Y., A. Kumamoto, Y. Katoh, A. Shinbori, A. Kadokura, and Y. Ogawa, Simultaneous ground- and satellite-based observation of MF/HF auroral radio emissions, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 4530-4541, doi:10.1002/2015JA022101, 2016, 査読有.
- ⑬ Kitahara, M. and Y. Katoh, Method for direct detection of pitch angle scattering of energetic electrons caused by whistler-mode chorus emissions, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, doi:10.1002/2015JA021902, 2016, 査読有.
- ⑭ Kalaei, M. J. and Y. Katoh, Study of a condition for the mode conversion from purely perpendicular electrostatic waves to electromagnetic waves, *Phys. Plasmas*, 23, 072119, doi:10.1063/1.4958945, 2016, 査読有.
- ⑮ Katoh, Y. and Y. Omura, Electron hybrid code simulation of whistler-mode chorus generation with real parameters in the Earth's inner magnetosphere, *Earth Planets Space*, 68:192, doi:10.1186/s40623-016-0568-0, 2016, 査読有.
- ⑯ Katoh, Y., Y. Omura, Y. Miyake, H. Usui, H. Nakashima, and K. Fukazawa, Electron hybrid code simulations with OhHelp load balancer for the study of relativistic electron acceleration in planetary magnetospheres, *Proceedings of JSST 2016*, 査読有.
- ⑰ Ozaki, M., S. Yagitani, K. Sawai, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, R. Kataoka, A. Ieda, Y. Ebihara, M. Connors, I. Schofield, Y. Katoh, Y. Otsuka, N. Sunagawa, and V. K. Jordanova, A direct link between chorus emissions and pulsating aurora on timescales from milliseconds to minutes: A case study at subauroral latitudes, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 9617-9631, doi:10.1002/2015JA021381, 2016, 査読有.
- ⑱ Kalaei, M. J. and Y. Katoh, The role of deviation of magnetic field direction on the beaming angle: Extending of beaming angle theory, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 142, 35-42, doi:10.1016/j.jastp.2016.02.021, 2016,

査読有.

- ⑬ Miyoshi, Y., S. Saito, K. Seki, T. Nishiyama, R. Kataoka, K. Asamura, Y. Katoh, Y. Ebihara, T. Sakanoi, M. Hirahara, S. Oyama, S. Kurita, and O. Santolik, Relation between fine structure of energy spectra for pulsating aurora electrons and frequency spectra of whistler mode chorus waves, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 7728-7736, doi: 10.1002/2015JA021562, 2015, 査読有.

[学会発表] (計 21 件)

- ① Katoh, Y. and Y. Omura, Electron hybrid simulation of the whistler-mode chorus generation in the Earth's inner magnetosphere, The 8th biennial VERSIM Workshop, Polar Geophysical Institute (PGI), Apatity, Murmansk region, Russia, 19-23 March, 2018. 【招待講演】
- ② Katoh, Y. and Y. Omura, Simulation study of the nonlinear processes of whistler-mode chorus generation in the Earth's inner magnetosphere, AGU Chapman Conference on Particle Dynamics in the Earth's Radiation Belts, Cascais, Portugal, 4-9 March, 2018. 【招待講演】
- ③ 加藤雄人, シンポジウム「ジオスペース探査衛星あらせ (ERG) -宇宙プラズマ最先端計測技術による地球放射線帯形成・消失機構の解明-」, Plasma Conference 2017, 姫路, 11月23日, 2017年.
- ④ Katoh, Y., H. Kojima, M. Hikishima, T. Takashima, K. Asamura, Y. Miyoshi, Y. Kasahara, S. Kasahara, T. Mitani, N. Higashio, A. Matsuoka, M. Ozaki, S. Yagitani, S. Yokota, S. Matsuda, M. Kitahara, and I. Shinohara, Software-type Wave-Particle Interaction Analyzer on board the ARASE satellite, 第142回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 京都, 10月15日-19日, 2017年. 【招待講演】
- ⑤ 加藤雄人, 惑星磁気圏におけるホイッス

ラーモード・コーラス放射発生過程についての計算機実験, プラズマシミュレーションシンポジウム 2017, 岐阜, 9月8日, 2017年. 【招待講演】

- ⑥ Katoh, Y., K. Fukazawa, and M. Yagi, Electron-hybrid and MHD cross-reference simulations of whistler-mode chorus in the inner magnetosphere of Earth, Jupiter and Mercury, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 14th Annual Meeting, Singapore, 6-11 August, 2017. 【招待講演】

他 15 件

[その他]

- ① 理学部オープンキャンパス 宇宙地球物理学 体験授業, 平成 29 年 7 月 25 日.
- ② 東北大学サイエンスカフェ 講師, 平成 30 年 2 月 23 日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

加藤 雄人 (KATOH, Yuto)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 60378982

### (2) 研究分担者

深沢 圭一郎 (FUKAZAWA, Keiichiro)  
京都大学・学術情報メディアセンター・准教授  
研究者番号: 50377868

### (3) 連携研究者

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

三宅 洋平 (MIYAKE, Yohei)  
神戸大学・大学院システム情報学研究科・准教授  
研究者番号: 50547396

大村 善治 (OMURA, Yoshiharu)  
京都大学・生存圏研究所・教授  
研究者番号: 50177002

### (4) 研究協力者

William Kurth 米国アイオワ大学  
Doug Menietti 米国アイオワ大学