

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340118

研究課題名(和文) 新しい環電流モデルを用いたULF波動が放射線帯粒子加速に果たす役割の実証的研究

研究課題名(英文) Integrated study of effects of ULF waves on acceleration of radiation belt electrons based on a new ring current model

研究代表者

関 華奈子 (Seki, Kanako)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20345854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：放射線帯電子の加速機構を理解するためには、内部磁気圏における電磁場と粒子の変動を理解することが不可欠であるが、本研究では、両者を自己無撞着に解く新しい環電流モデルを開発・応用し研究を推進した。この新モデルを放射線帯粒子軌道追尾モデルと結合し、放射線帯電子とULF波動との相互作用の基礎的性質を詳細に調べた。その結果、単色波Pc5と電子のドリフト共鳴による動径方向への輸送量、また電子エネルギーやピッチ角といったパラメータ依存性を明らかにした。また、モデルの境界条件に関わる内部磁気圏プラズマ源の衛星観測データ解析研究も進め、電離圏からのプラズマ供給の上限を決定する物理機構に関する成果などを得た。

研究成果の概要(英文)：In order to understand acceleration mechanisms of relativistic electrons in Earth's radiation belt, it is important to understand coupling between electric/magnetic fields and plasma particles. In this study, we developed a new ring current model, which can solve time evolutions of the fields and ring current ions self-consistently. We conducted model-coupling simulations with this new model and our radiation belt model, which solves electron trajectories in arbitrary field configuration, to investigate interaction processes between ULF waves and relativistic electrons. One of our main results is about dependence of radial transport of relativistic electrons on electron parameters such as their energy and pitch angle. We also conducted data analysis study using satellite observation to investigate plasma supply processes to the inner magnetospheric plasma. The results include the upper limit of proton supply from the ionosphere.

研究分野：超高層物理学

キーワード：宇宙嵐 ジオスペース 内部磁気圏 環電流 放射線帯 ULF波動 イオン流出 ドリフト運動論近似

1. 研究開始当初の背景

(1) ジオスペース最大規模の変動現象である宇宙嵐(geomagnetic storm)時には、放射線帯が大きく変動することが知られており、この変動機構の解明は、国際ジオスペース探査の主目標となっている。世界的なジオスペース環境変動の理解を目指した動きの中で、データ解析・モデリング・シミュレーションの観点からは、ジオスペースにおける変動機構の記述に鍵となる、地球近傍の宇宙空間(内部磁気圏)の基本モデルの構築が、急務となっている。

(2) 内部磁気圏は、外部磁気圏からの影響を強く受けるとともに、地球近傍では電離圏との領域間結合が重要となる領域であり、また粒子ドリフトが本質的に重要で外部磁気圏のグローバルな記述に威力を発揮している電磁流体近似が成り立たないなど、多くの難しい要素を含むため、宇宙嵐に伴う諸現象が発現する領域でありながら、電磁場と粒子のグローバル変動を矛盾なく記述できる数値シミュレーションモデルは未だ発展段階にある。

(3) このように、放射線帯電子の加速過程を理解するためには、内部磁気圏における電磁場と粒子の変動を理解することが不可欠であるが、研究代表者らはこれまでに、両者を自己無撞着に解くことが可能な新しい環電流モデルを開発してきた。この新モデルの特徴は、世界で初めて ULF 波動を含む電磁場の変動と環電流イオンのダイナミクスを同時に物理方程式に基づき記述可能にした点である。

2. 研究の目的

本研究では、電磁場分布を仮定しその中で粒子分布の時間発展を解く従来の数値モデルとは一線を画したこの新環電流モデルを基軸として、ULF 波動が放射線帯粒子加速に果たす役割を明らかにすることを目的としている。グローバルな場の変形には寄与しないより高いエネルギーの放射線帯電子については、別途研究代表者らが開発してきた放射線帯粒子の統計的テスト粒子計算コード[Saito *et al.*, 2010]を用いて記述することで、ULF 波動による電磁場変動が相対論的電子の加速/消失に与える影響について検証する。こうした研究を通して、環電流による変形も含む内部磁気圏電磁場構造の下で、ULF 波動による相対論的電子輸送が拡散的に記述できる条件を明らかにし、輸送係数がどのように決定されるのかを明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、上述の2つの数値モデル(環

電流モデルと放射線帯モデル)を組み合わせて、ULF波動が放射線帯電子の加速・輸送に果たす役割を理解することを目指している。輸送機構の基本的性質を押さえるため、まず、地方時方向の波数 m を持つ単色波などの単純化した境界条件を与えることで、新モデルによるULF波動記述の基本的性質を調べた。グリッド数による波の減衰率など、数値的な制約をおさえた上で、背景密度や波の波数などによって、内部磁気圏におけるULF波動の分布がどのように変化するかを検証した。

(2) 新たなコード開発としては、新しくゼロエネルギープラズマの移流方程式に基づいてプラズマ圏の時間発展を解くモジュールを開発するとともに、境界条件となる電離圏側からのプラズマ供給を調べるため、FAST衛星データを用いて低エネルギーイオン流出について統計解析を実行した。また、磁気圏尾部プラズマシートからの粒子入射を模した初期条件を設定してモデル計算を行い、サブストームに伴う内部磁気圏へのイオン侵入に伴って励起されるULF波動の性質について調べるなど、環電流イオンによって励起される、所謂「宇宙嵐時Pc5波動」の励起機構について調べる。また、環電流モデル計算結果から適切な補間方法を考案し、ULF波動を含む内部磁気圏の電磁場の時間変動の時系列データを作成した。

(3) 次に、環電流モデル計算から得られたULFを含む電磁場の時間発展データを、放射線帯モデルの背景場の入力として用い、ULF波動存在下での相対論的電子の地球中心からの距離方向の動径方向輸送の効率を調べた。この際に、電子の初期エネルギーおよびピッチ角を変化させることで、電子輸送の各パラメータへの依存性について調べている。

4. 研究成果

(1) 本研究ではまず、地方時方向の波数 m を持つ単色波を与えるなど、単純化した境界条件を与えることで、新モデルによるULF波動記述の基本的性質を調べることを行った。その結果、グリッド数による波の減衰率など、数値的な制約をおさえた上で、背景密度や波の波数などによって、内部磁気圏におけるULF波動の分布がどのように変化するかを検証した。また、放射線帯モデルに波動粒子相互作用を組み込むことで、波動粒子相互作用が放射線帯の消失機構にどのような役割を果たすかを調べた(論文⑤)。また、境界条件を与えるのに重要となる電離圏ポテンシャルソルバーの開発なども行った(論文④)。

(2) 次に、環電流イオンによるPc5帯のULF波動励起機構を調べるため、磁気圏尾部からのイオンインジェクションを模したシミュレーションを行った。初期に与える環電流イ

オンのエネルギー分布や空間分布を変化させることで、どのような条件下で Pc5 波動が励起されやすいかを調べた (図 1)。更に、その結果をドリフトバウンス共鳴の理論と比較することで、重イオンが速度空間でリング状の分布を持つことで波動が励起されることを示し、国際会議等で発表した。

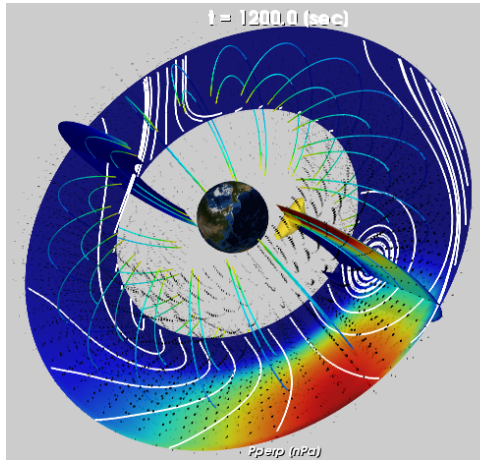


図 1: 磁気圏尾部からのイオンインジェクションを模したシミュレーション結果の一例。カラーコンターはイオンの圧力分布を、白線は赤道面での流線分布を矢印は速度場を、また、色のついた線は磁力線を、各々表している。真夜中付近 (右側子午面が書かれている方向) の地方時から入射したイオンが磁場ドリフトにより西向きに輸送されつつ、波動を立てている様子が示されている。

(3) 一方、ULF 波動が放射線帯電子の輸送・加速に与える影響を調べるため、開発した環電流モデルの計算結果から電磁場変動を抽出し、上述の放射線帯電子の高精度軌道追尾計算モデル[Saito et al., 2010]の背景電磁場として与える手法の開発を行った。特に単色波による相対論的電子の動径方向拡散について、電子の持つ磁気モーメントやピッチ角依存性などのパラメータ依存性を調べ、効率よく輸送される磁気モーメントの範囲などに関する知見を得た。データ解析研究については、内側境界条件を与える磁気嵐時の電離圏からのイオン流出について手がかりを得るため、大磁気嵐時の光電子観測データの解析をさらに進めた結果、静穏時の低エネルギーイオン流出には太陽活動依存性がないことを示すなどの成果を得た (図 2、論文③)。

(4) 理論と比較のしやすい単色波 Pc5 と電子のドリフト共鳴のモデル結合シミュレーションを実施し、電子が共鳴する位置やその動径方向への輸送量、また電子のエネルギーやピッチ角といったパラメータ依存性を解析し、定量的な考察を行った。その結果、ドリ

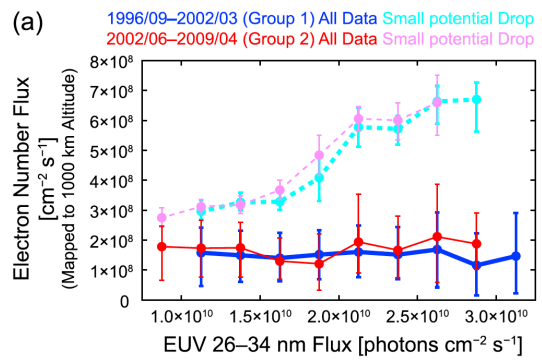


図 2: FAST 衛星による長期間観測データ解析に基づく静穏時の水素イオン流出推定量 (赤線と青線) の太陽活動依存性 (横軸)。流出量が太陽活動に殆ど依存しないことを示している。

フト共鳴による動径方向への輸送は、非線形効果による有限共鳴幅を持ち、輸送効率がピッチ角依存性を持つことなどが明らかとなった。また、内部磁気圏におけるより高周波の波動 (コーラス波動) と放射線帯電子との相互作用を調べるため、上述の放射線帯モデルを用いた波動粒子相互作用シミュレーションの結果とオーロラ観測衛星「れいめい」の脈動オーロラ観測結果を比較することで、両者によい相関があることを示し、脈動オーロラの発生に内部磁気圏におけるコーラス波動と粒子との相互作用が重要であることを示唆している (論文②)。

(5) これら一連の研究により、内部磁気圏における場と高エネルギー粒子の結合過程を自己無撞着に研究する新しい数値モデリング手法を開発した。これらのモデルは、平成 28 年度に打ち上げ予定のジオスペース探査衛星 ERG による内部磁気圏観測と関連地上観測との比較を通して、地球放射線帯電子の加速・消失機構の実証的研究に応用される予定である。

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 7 件)

- ① K. Seki, A. Nagy, C. M. Jackman, F. Crary, D. Fontaine, P. Zarka, P. Wurz, A. Milillo, J. A. Slavin, D. C. Delcourt, M. Wiltberger, R. Ilie, X. Jia, S. A. Ledvina, and R. W. Schunk, A review of general physical and chemical processes related to plasma sources and losses for solar system magnetospheres, Space Science Reviews, Vol.192, 27-89, 2015. (査読有)
- ② Y. Miyoshi, 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 energy spectra of pulsating aurora electrons and frequency spectra of whistlermode chorus waves”, J. Geophys. Res., Vol.120, doi: 10.1002/2015JA021562, 2015.(査読有)

- ③ Naritoshi Kitamura, Kanako Seki, Toshi Nishimura, and James P. McFadden, “Limited impact of escaping photoelectrons on the terrestrial polar wind flux in the polar cap”, Geophys. Res. Lett., Vol.42, 2015. (査読有)
- ④ A. Nakamizo, Y. Hiraki, Y. Ebihara, T. Kikuchi, K. Seki, 他 6 名, “Effect of R2-FAC development on the ionospheric electric field pattern deduced by a global ionospheric potential solver”, J. Geophys. Res., Vol.117, doi:10.1029/2012JA017669, 2012. (査読有)
- ⑤ Saito, S., Y. Miyoshi, and K. Seki, “Relativistic Electron Microbursts associated with Whistler Chorus Rising Tone Elements: GEMSIS-RBW Simulations”, J. Geophys. Res., Vol.117, doi:10.1029/2012JA018020, 2012.(査読有)

[学会発表] (計 20 件)

- ① K. Seki, A personal future perspective of international collaborations in space physics, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015 年 5 月 26 日, 幕張メッセ(千葉県千葉市), 招待講演.
- ② K. Seki, T. Amano, Y. Miyoshi, S. Saito, Y. Matsumoto, T. Umeda, K. Keika, and Y. Miyashita, A study on characteristics of radial transport of relativistic electrons by ULF Pc5 waves in the inner magnetosphere based on the GEMSIS-RC and RB models, AGU fall meeting 2014, 2014 年 12 月 18 日, サンフランシスコ(米国).
- ③ K. Seki, T. Amano, Y. Miyoshi, S. Saito, Y. Matsumoto, Y. Miyashita, K. Keika, and T. Umeda, A study of the ULF wave excitation by ion injections into the inner magnetosphere: GEMSIS-RC simulation, The 12th international conference on substorms (ICS-12), 2014 年 11 月 11 日, 伊勢志摩ロイヤルホテル(三重県鳥羽市).
- ④ K. Seki, T. Amano, S. Saito, Y. Miyoshi, Y. Matsumoto, T. Umeda, Y. Miyashita, and Y. Ebihara, Coupling between the ULF waves and high energy particles in the inner magnetosphere based on the GEMSIS-RC model, AOGS ((Asia Oceania Geosciences Society)) 2014 Annual Meeting, 2014 年 7 月 28 日, ロイトン札幌ホテル(北海道札幌市), 招待講演.
- ⑤ K. Seki, T. Amano, S. Saito, Y. Miyoshi, Y. Matsumoto, T. Umeda, Y. Miyashita, and Y. Ebihara, GEMSIS-RC モデルに基づいた内部磁気圏へのイオンインジェクションによる ULF 波動励起の研究, 第 134 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会, 2013 年 11 月 3 日, 高知大学(高知県高知市).
- ⑥ K. Seki, T. Amano, S. Saito, Y. Miyoshi, Y. Matsumoto, T. Umeda, Y. Miyashita, and Y. Ebihara, Coupling between the ULF waves and the ring current in the inner magnetosphere based on the GEMSIS-RC model, AOGS ((Asia Oceania Geosciences Society)) 2013 Annual Meeting, 2013 年 6 月 25 日, ブリスベン (オーストラリア), 招待講演.
- ⑦ K. Seki, T. Amano, S. Saito, Y. Miyoshi, Y. Matsumoto, T. Umeda, Y. Miyashita, and Y. Ebihara, GEMSIS-RC モデルに基づくリングカレントと ULF 波動の相互作用の研究, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 20 日, 幕張メッセ(千葉県千葉市).
- ⑧ K. Seki, T. Amano, S. Saito, Y. Miyoshi, Y. Matsumoto, T. Umeda, Y. Miyashita, and Y. Ebihara, Effects of the ring current and plasmasphere on ULF waves in the inner magnetosphere based on the GEMSIS-RC model, AGU fall meeting 2012, 2012 年 12 月 5 日, サンフランシスコ(米国).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://st4a.stelab.nagoya-u.ac.jp/gemsis/magnetosphere/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関 華奈子 (SEKI, Kanako)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号: 20345854

(2) 研究分担者

天野 孝伸 (AMANO, Takanobu)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号: 00514853

齊藤 慎司 (SAITO, Shinji)
名古屋大学・大学院理学研究科・特任准教授
研究者番号: 60528165

(3) 連携研究者

三好 由純 (MIYOSHI, Yoshizumi)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授
研究者番号: 10377781

松本 洋介 (MATSUMOTO, Yosuke)
千葉大学・理学研究科・特任助教
研究者番号: 20397475