

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340119

研究課題名(和文) 電磁流体・粒子連結シミュレーションによる地球放射線帯ダイナミクスの研究

研究課題名(英文) Dynamics of Earth's radiation belt on the basis of MHD-particle coupled simulation

研究代表者

海老原 祐輔 (Ebihara, Yusuke)

京都大学・生存圏研究所・准教授

研究者番号：80342616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：地球を取り巻く高エネルギー粒子群は放射線帯と呼ばれ、その挙動は謎に包まれている。放射線帯形成には外部供給説と内部加速説の二つがある。外部供給説において重要な磁気圏電場の時空間発展をシミュレーションで調べた。サブストーム時には西向き強い電場が振動を伴って現れ、高エネルギー粒子のマルチプル注入や一時的な減少を合理的に説明することができた。内部加速説においてはkeV帯電子の輸送と相対論速度まで加速する波動粒子相互作用が重要である。サブストーム直後にはkeV帯電子の輸送に重要な対流が逆転すること、波動粒子相互作用が効率良くおこる条件が磁気嵐開始から数時間経て満たされることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The radiation belt consists of the energetic charged particles trapped by Earth's magnetic field. External transport and internal acceleration have been thought to rebuild the radiation belt. For external transport, magnetospheric electric field is important to transport energetic particles into the radiation belt. Using simulation, we successfully reproduced strong westward electric field that appears with oscillation, which transports energetic particles inward and results in temporal reduction during substorms. For internal acceleration, transport of keV electrons and wave-particle interaction are important to generate relativistic electrons. We successfully reproduced the reversal of the convection electric field that is responsible to the transport of keV electrons after substorm. The wave-particle interaction is found to take place efficiently to accelerate keV electrons to MeV range a few hours after the beginning of a magnetic storm.

研究分野：磁気圏物理学

キーワード：磁気圏 磁気嵐 サブストーム シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

地球を取り巻く高エネルギー粒子を放射線帯と呼ぶ。放射線帯電子は磁気嵐後に大きく増えることもあれば減ることもあり、その挙動は謎に包まれている。放射線帯研究の歴史は古く、放射線帯は磁気嵐の主相で一旦減少し回復相で大きく増加することや、太陽風速度が高いとき一層増加することが観測的に知られてきた。しかし、磁気嵐回復相で放射線帯外帯の電子が大きく増加する事例は約半数にすぎないことや、高速太陽風と放射線帯外帯電子フラックスの間には明瞭な相関関係が無いことが指摘され、放射線帯研究は混迷を深めている。つまり、太陽風の状態が決まれば放射線帯の状態が一義的に決まるという因果律は単純には成立しないことを意味する。

放射線帯形成には二つの説がある。外部供給説は、高エネルギー粒子が内側へ直接流入するという考え方である。サブストーム後に放射線帯が増加するという観測結果があり、外部供給説が寄与しているという指摘がある。外部供給説においては経度方向の誘導電場が鍵となるが、誘導電場を直接用いる代わりに動径方向の拡散係数を用いたシミュレーションが主流であった。拡散係数で表現することのできないインパルシ的な電場・磁場変動に対する応答についてはよくわかっていない。一方、内部加速説は、放射線帯よりエネルギーの低い keV 帯の電子を内部磁気圏へ運び、非断熱的に MeV 帯へ加速するという考え方である。ホイッスラーモード・コーラス放射の成長条件と MeV 帯への加速過程が重要である。keV 帯電子の輸送を担う大規模電場として主に対流電場とサブストーム性の電場が考えられてきたが、磁気嵐中の変動と原因についてはよくわかっていない。

2. 研究の目的

放射線帯形成に対する外部供給説及び内部加速説の役割を明らかにするため、サブストーム時などに見られるインパルシ的な誘導電場の生成原因の理解、インパルシ的な誘導電場やサブストーム性電場に対する電子の応答とその輸送特性を明らかにする。波動粒子相互作用により電子が加速しうる領域・時間を特定する。対流電場及びサブストーム性電場の生成メカニズムを明らかにすることにより、放射線帯のエネルギーの由来という根源的な問いに答えを与える。

3. 研究の方法

グローバルな磁気圏電場・磁場構造を自己無撞着に表現できる電磁流体シミュレーションと eV 帯から MeV 帯までのエネルギーを持つ電子の磁気圏中の輸送を解くことができる粒子移流シミュレーションを組み合わせ、磁気圏電場・磁場の大規模変動の原因と内部磁気圏電子に対する影響を明らかにする。

4. 研究成果

(1) グローバル電磁流体シミュレーションを用いてサブストーム中の内部磁気圏でおこる電場・磁場変動を再現した(図1)。真夜中・静止軌道付近において、プラズマ圧が急激に上がり、磁場が下がるというサブストーム時に見られる特徴をよく再現している。西向き電場も急激に強まるが、数分周期の強い振動を伴っていることがわかる。これまでサブストーム性の電場は磁場変動からの類推から単調増加・単調減少すると考えられてきたが、シミュレーションの結果は大きく異なっていた。この電場の振動は電磁流体的な非平衡過程で理解できる。すなわち、磁気圏尾部でおこる磁気再結合によって磁気張力が強まり、地球側にプラズマが動かされる。これは西向き電場に相当する。内部磁気圏ではプラズマ圧と磁気圧が高く、磁気張力に抗して釣り合おうとするが、ただちに釣り合うことができない。力学的な非平衡が慣性力を生み、プラズマを加速し、電場の振動となって現れることを明らかにした。

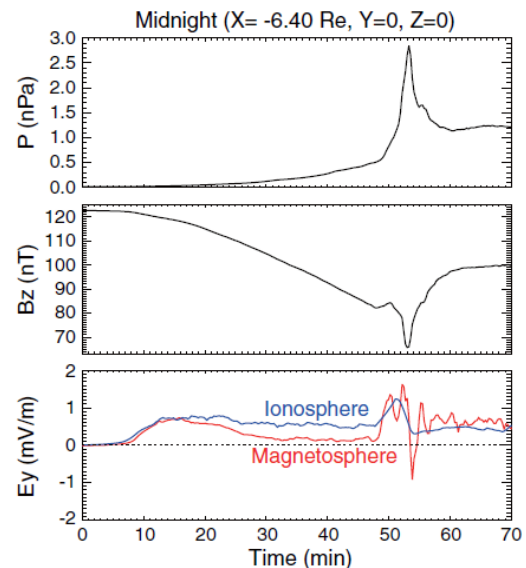


図1 シミュレーションで再現した真夜中静止軌道付近のプラズマ圧、磁場、東西方向の電場を示す。赤色は磁気圏電場、青色は磁気圏に投影した電離圏電場。

グローバル電磁流体シミュレーションで求めた電場・磁場を用い、本研究課題で新しく開発した電子移流シミュレーションを実行した。計算結果を図2に示す。AL指数が急激に低下する時刻をサブストーム・オンセットとみなすと、オンセット直後、10.7 keV及び35.0 keVの電子が静止軌道付近で振動を伴いながら急増した。この振動は電場の振動によるもので、振動を伴った電子フラックスの増加は衛星観測と調和的であり、そのメカニズムを明らかにすることができた。一方、252 keV及び1.2 MeVの電子はオンセット時に一旦減少する。これは、磁場強度の非軸対称性によって外側境界から一時的に電子が

供給されたことを示す。外側境界条件として与えた電子量が少なかったため、静止軌道付近では一時的な減少となって現れた。外部供給説においては、放射線帯外側の電子量も重要であることを示した。

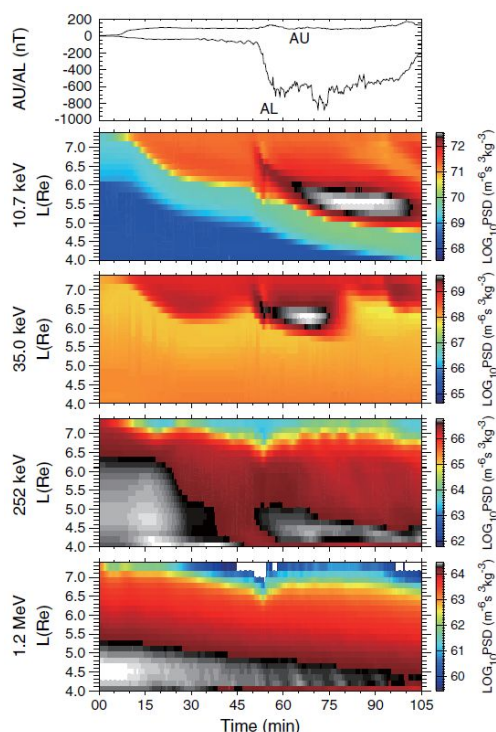


図 1 模擬サブストームにおける電子位相空間密度の時間変化。縦軸は地球からの距離(L 値)、色は位相空間密度を示す。上から順にオーロラジェット電流の強さを表す AU/AL 指数、10.7 keV 電子、35.0 keV 電子、252 keV 電子、1.2 MeV 電子の位相空間密度を示す。

(2) 内部加速説において、keV 帯電子はホイッスラーモード・コーラス波動を励起する自由エネルギーとして重要である。keV 帯電子は主に電場ドリフトによって輸送されるが、磁気嵐やサブストーム中における内部磁気圏電場の生成にかかわる力学過程についてはよくわかっていない。グローバル電磁流体シミュレーションを用いてサブストームを再現したところ、内部磁気圏ではオンセット直後に強い西向き電場が発生し、その数十分後には電場の極性が反転した。この状態を過遮蔽と呼び、計算で求めた地磁気変動は観測結果と概ね一致する。惑星間空間磁場が継続的に南を向いているにもかかわらずサブストーム後の内部磁気圏では対流の向きが逆転することを意味する。磁気嵐主相では太陽向きの対流によって高温のイオンが内部磁気圏に注入されてプラズマ圧が高まり、リングカレントが発達する。本研究によって、サブストーム・オンセット後に対流の向きが逆転するとリングカレントの発達が妨げられ

ることを示唆することができた。磁気嵐主相中にサブストームが発生するとリングカレントの発達が一時的に妨げられるという観測結果と調和的であり今後の研究で検証を行う。

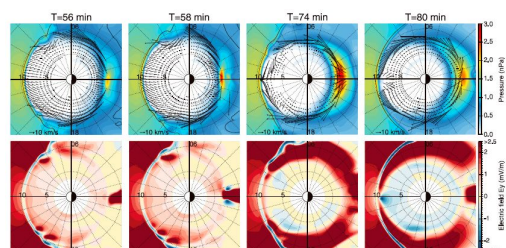


図 3 模擬サブストーム時の磁気圏プラズマ圧(上段)と Y 方向電場(下段)。オンセット後、内部磁気圏対流電場の極性が反転する。

(3) 強い南向き惑星間空間磁場をグローバル電磁流体シミュレーションに与え、磁気嵐を模擬した。惑星間空間磁場が南を向いた時刻を $t=0$ とすると、 $t=4$ 分で磁気圏に到来し、 $t=50$ 分で最初のサブストームが発生した。内部磁気圏ドリフト移流シミュレーションを用いて eV から MeV までのエネルギーを持つ電子の移流を解いた。グローバル電磁流体シミュレーションで解いた内部磁気圏電場と磁場を用いて電子の輸送を解き、外側境界条件として電子のカップ分布を与えた。密度と温度は同シミュレーションで得られた値を用いた。シミュレーションの主な結果は以下のとおりである。最初のサブストームは MeV 帯電子に対する影響は小さい。プラズマシートの温度が低いためと考えられる。 $t=3$ 時間ごろからプラズマシートの温度が上昇し、サブストームによって多くの高エネルギー電子が内側に輸送され、サブストーム性電場によって内側に輸送された。その結果 MeV 帯電子が $t=3$ 時間以降増加した。一方、多くの keV 帯電子が最初のサブストームで内部磁気圏に注入され、内部磁気圏中の温度異方性が上昇するが、プラズマ周波数とジャイロ周波数の比 (f_{pe}/f_{ce} 比) は高く維持されたままであった。これは、プラズマ圏が十分に縮小していないためと考えられる。強い対流電場によってプラズマ圏がゆっくりと縮み、 $t=3$ 時間ごろには f_{pe}/f_{ce} 比が低い領域が広く現れる(図 4)。電子の温度異方性が高く f_{pe}/f_{ce} 比が低い領域でホイッスラーモード・コーラス波動が成長し、電子を MeV 帯に効率良く加速すると考えられているが、そのような条件は磁気嵐開始後数時間を経て満たされることを示すことができた。

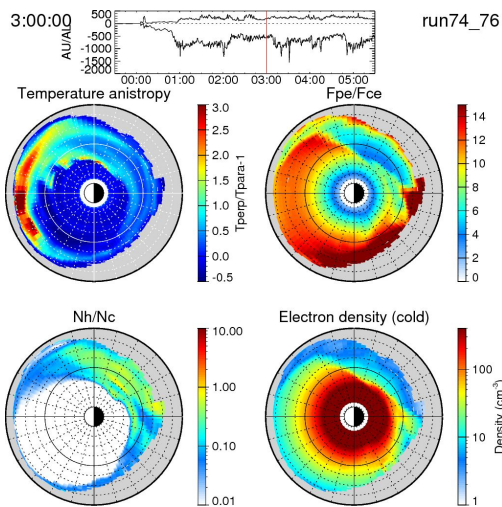


図 4 模擬磁気嵐時の電子温度異方性、プラズマ周波数・サイクロトロン周波数比(f_{pe}/f_{ce} 比)、電子の高温密度・低温密度比(N_h/N_c)、低温密度 (プラズマ圏)

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 21 件)

Yao, Y., Y. Ebihara, and T. Tanaka, Sudden pressure enhancement and tailward retreat in the near-earth plasma sheet: THEMIS observation and MHD simulation, *Journal of Geophysical Research*, 120, 201-211, DOI:10.1002/2014JA020482, 2015. (査読有)

Ebihara, Y., T. Tanaka, and T. Kikuchi, Counter equatorial electrojet and overshielding after substorm onset: Global MHD simulation study, *Journal of Geophysical Research*, 119, 7281-7296, DOI:10.1002/2014JA020065, 2014. (査読有)

Nakayama, Y., Y. Ebihara, and T. Tanaka, Simulation of substorm-time acceleration of oxygen ions on azimuthally directed magnetic field lines in the near-Earth plasma sheet, *Journal of Geophysical Research*, 119, 6167-6176, DOI:10.1002/2014JA019858, 2014. (査読有)

Yamauchi, M., Y. Ebihara, H. Nilsson, and I. Dandouras, Ion drift simulation of sudden appearance of sub-keV structured ions in the inner magnetosphere, *Annales Geophysicae*, 32, 83-87, 2014, DOI:10.5194/angeo-32-83-2014 (査読有)

Fukazawa, K., T. Nanri and T. Umeda, Performance Measurements of MHD Simulation for Planetary Magnetosphere on Peta-Scale Computer FX10, *Parallel Computing: Accelerating Computational Science and Engineering (CSE)*, Advances

in Parallel Computing, 25, 387-394, IOS Press, DOI:

10.3233/978-1-61499-381-0-387, 2014. (査読有)

Ebihara, Y. and T. Tanaka, Fundamental properties of substorm-time energetic electrons in the inner magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 118, 1589-1603, DOI: 10.1002/jgra.50115, 2013. (査読有)

Yoshikawa A., O. Amm, H. Vanhamaki, A. Nakamizo and R. Fujii, *Journal of Geophysical Research*, 118, 6416-6425, DOI: 10.1002/jgra.50514, 2013. (査読有)

Yoshikawa A., O. Amm, H. Vanhamaki, and R. Fujii, Illustration of Cowling Channel coupling to the shear Alfvén wave, *Journal of Geophysical Research*, 118, 6405-6415, DOI: 10.1002/jgra.50513, 2013. (査読有)

Shi, R., H. Liu, A. Yoshikawa, B. Zhang, and B. Ni, Coupling of electrons and inertial Alfvén waves in the topside ionosphere, *Journal of Geophysical Research*, 118, 2903-2910, DOI: 10.1002/jgra.50355, 2013. (査読有)

Ohtani, S., T. Uozumi, H. Kawano, A. Yoshikawa, H. Utada, T. Nagatsuma, and K. Yumoto, *Journal of Geophysical Research*, 118, 3637-3646, DOI: 10.1002/jgra.50318, 2013. (査読有)

Amm, O., R. Fujii, H. Vanhamaki, A. Yoshikawa, and A. Ieda, *Journal of Geophysical Research*, 118, 2428-2437, DOI: 10.1002/jgra.50254, 2013. (査読有)

Omura, Y. and Q. Zhao, Relativistic electron microbursts due to nonlinear pitch-angle scattering by EMIC triggered emissions, *Journal of Geophysical Research*, 118, 5008-5020, DOI: 10.1002/jgra.50477, 2013. (査読有)

Katoh, Y. and Y. Omura, Effect of the background magnetic field inhomogeneity on generation processes of whistler-mode chorus and broadband hiss-like emissions, *Journal of Geophysical Research*, 118, 4189-4198, DOI: 10.1002/jgra.50395, 2013. (査読有)

Fukazawa, K. and T. Nanri, Performance of Large Scale MHD Simulation of Global Planetary Magnetosphere with Massively Parallel Scalar Type Supercomputer Including Post Processing, HPCC, ,976 - 982, DOI:10.1109/HPCC.2012.142, 2012. (査読有)

Nakamizo, A., Y. Hiraki, Y. Ebihara (ほか 8 名), Effect of R2-FAC development on the ionospheric electric field pattern deduced by a global ionospheric potential solver, *Journal of Geophysical Research*, 117, DOI:10.1029/2012JA017669,

2012. (査読有)

[学会発表](計 25 件)

深沢圭一郎、吉川顕正、メニーコアプロセッサに対する宇宙天気 MHD シミュレーションの高度化、H26 年度電磁圏物理学シンポジウム、2015 年 3 月 2 日、ルイガンズ(福岡県・福岡市)

Ebihara, Y., Numerical experiments on possible impact of substorms on energetic electrons in the inner magnetosphere, American Geophysical Union Fall Meeting, 2014 年 12 月 15 日、サンフランシスコ(アメリカ)

Ebihara, Y., Substorm simulation 1: To what extent the substorm observation are reproduced numerically?, International Substorm Conference 12, 2014 年 11 月 13 日、伊勢志摩ロイヤルホテル(三重県・志摩市)

海老原祐輔、内部磁気圏高エネルギー電子生成に対するサブストームの影響に関する数値実験、第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会、2014 年 10 月 31 日、キッセイ文化ホール(長野県・松本市)

深沢圭一郎、磁気圏 MHD シミュレーションコードの Xeon Phi に対する最適化、日本地球惑星連合大会、2014 年 5 月 2 日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

Ebihara, Y., On the formation of overshielding triggered by a substorm onset: Global MHD simulation study, 日本地球惑星科学連合大会、2014 年 4 月 28 日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

Yoshikawa A., On formation of global Cowling channel in the ionosphere and the generalized Ohm's law, American Geophysical Union Fall Meeting, 2013 年 12 月 14 日、サンフランシスコ(アメリカ)

Ebihara, Y., Testing external source acceleration mechanism for the rebuild of outer radiation belt, 2013 年 11 月 7 日、CAWSES-II ワークショップ、名古屋大学豊田講堂(愛知県名古屋市)

Ebihara, Y., Substorm-time Changes in Energetic Electrons in the Inner Magnetosphere, 2013 International Conference on Storms, Substorms, and Space Weather, 2013 年 11 月 7 日、深圳市(中華人民共和国)

海老原祐輔、磁気嵐中サブストームにおける放射線帯外帯電子へ粒子供給、2013 年 11 月 3 日、第 134 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会、高知大学 朝倉キャンパス(高知県高知市)

深沢圭一郎、Performance measurement of MHD simulation code for planetary magnetosphere on Xeon Phi、地球電磁気・

地球惑星圏学会 第 134 回総会及び講演会、2013 年 11 月 2 日、高知大学朝倉キャンパス(高知県・高知市)

Ebihara, Y., On the substorm-time variation of energetic electrons in the inner magnetosphere, 日本地球惑星科学連合大会、2013 年 5 月 21 日、幕張メッセ(千葉県幕張市)

吉川顕正、強磁場弱電離気体系に於ける電流クローザー : Hall 電流時空間非一様性がもたらすもの、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 27 日、広島大学(広島県・東広島市)

吉川顕正、Cowling チャンネルの物理、国立極地研究所研究集会 : 極域電磁圏構造の非線形発展、2013 年 2 月 19 日、国立極地研究所(東京都・立川市)

Ebihara, Y., Direct impact of substorm on outer radiation belt, American Geophysical Union, Fall Meeting, 2012 年 12 月 5 日、サンフランシスコ(アメリカ)

吉川顕正、MI 結合の理論的側面から見た EISCAT_3D への期待、EISCAT 研究集会 : 北極・北欧における観測・研究戦略、2012 年 11 月 6 日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

深沢圭一郎、梅田隆行、Performance measurement of magnetohydrodynamic simulation code for planetary magnetosphere on FX10、地球電磁気・地球惑星圏学会 第 132 回総会及び講演会、2012 年 10 月 23 日、札幌コンベンションセンター(北海道・札幌市)

海老原祐輔、放射線帯外帯に対するサブストームの直接的影響、地球電磁気・地球惑星圏学会 第 132 回総会及び講演会、2012 年 10 月 21 日、札幌コンベンションセンター(北海道・札幌市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

海老原 祐輔 (EBIHARA, Yusuke)
京都大学・生存圏研究所・准教授
研究者番号 : 80342616

(2) 研究分担者

吉川 顕正 (YOSHIKAWA, Akimasa)
九州大学・国際宇宙天気科学・教育センター・講師
研究者番号 : 70284479

深沢 圭一郎 (FUKAZAWA, Kei-ichiro)
京都大学・大学院情報学研究科・准教授
研究者番号 : 50377868

(3) 連携研究者

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