

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月30日現在

機関番号：14301
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21740354
 研究課題名（和文）「単一系」に立脚した磁気嵐数値モデルの開発と磁気嵐研究の新展開
 研究課題名（英文）Development of magnetic storm
 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

研究成果の概要（和文）：磁気嵐などの擾乱時に地球磁気圏中の荷電粒子が大きく変動することは知られているが、その過程についてはよくわかっていない。複雑で多様な磁気嵐現象とそれに付随する荷電粒子の運動を理解するために、可能な限り全体を一つのシステムとして捉えるシミュレーションの開発を行った。内部磁気圏で生じる力学的非平衡の結果生じる電場が放射線帯を再編させること、内部磁気圏を起源とする電流が磁気赤道までほぼ瞬時に伝わることなどを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Energetic charged particles trapped in Earth's magnetosphere are known to be drastically changed during magnetic storms, but overall mechanisms leading to the change remain unsolved. We developed the comprehensive simulation code that deals with the magnetospheric system from a unified point of view. Major results include a rapid reconstruction of the outer radiation belt due to force imbalance in the inner magnetosphere, rapid transport of electromagnetic energy from the inner magnetosphere to the equatorial region on the ground.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：地球惑星科学

科研費の分科・細目：超高層物理学

キーワード：磁気嵐・リングカレント・放射線帯・シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

磁気嵐は、リングカレントの発達、激しいオーロラ活動、大規模な電流系の発達、放射線帯変動などを伴う多様で大規模な擾乱現象である。磁気嵐現象を理解することの難しさは、異なる空間スケール、異なるエネルギー帯、異なるプラズマ状態を横断する形で太陽からの擾乱が伝播することにある。そして相

互作用が強い非線形な系であることも更に問題を困難にしている。広域の地上観測網が整備され、人工衛星による宇宙空間の直接探査が進むにつれて、個々の現象の詳細な様子が観測的に理解されるようになってきた。しかし、観測量から統計解析や相関解析という帰納的アプローチによって物理的な因果関係を理解することは難しいのが現状である。

現実的なパラメータを与えて適切な方程式を解くシミュレーションは演繹的であり、帰納的アプローチの欠点を補う上で重要である。例えば、リングカレントと放射線帯の結合、磁気圏と電離圏の結合など、結合の存在は示唆されているが観測的に測ることの難しい結合過程の強度を把握する上で演繹的アプローチは威力を発揮する。研究代表者は、リングカレントと電離圏とが結合したシミュレーションを用いて、強まったリングカレントに起因する2次的な電場がリングカレントの位置を移動させ、その様子が IMAGE 衛星の撮像結果とよく一致すること (Ebihara and Fok, 2004)、リングカレントに起因する過遮蔽電場が SuperDARN レーダー観測とよく一致すること (Ebihara et al., 2008a)、強まったリングカレントによって高エネルギー粒子フラックスが複雑な断熱変動を示し、Polar 衛星の直接観測とよく一致することなど (Ebihara et al., 2008b)、リングカレントを含む内部磁気圏の複雑性と多様性を示してきた。

研究代表者のこれまでの経験を踏まえて、複雑で多様な磁気嵐の本質を理解するためには、全体を可能な限り一つのシステムとして捉える単一系の観点が不可欠であるとの結論に至った。本研究では、これまで研究代表者が取り組んできたシミュレーションの枠組みを押し広げ、太陽風-外部磁気圏-内部磁気圏-電離圏を繋ぐ物理過程を統一的に表現することができ、観測結果との直接的な比較が可能な実証型の磁気嵐シミュレーションを世界に先駆けて開発することを目標とする。

2. 研究の目的

本研究は、複雑で多様な磁気嵐現象を理解するために、「異なるエネルギー帯」、「異なるプラズマ状態」、「異なる空間スケール」を一つのシステムとして捉えるという新しい発想に基づく「単一系磁気嵐数値モデル」の実現を目指すものである。多圏間結合を迫及する新しいモデルの構築を通して、磁気嵐現象の中心としてのリングカレントの消長と系全体に対する役割、そして磁気嵐現象を担う個別的な電磁氣的・力学的結合過程を、物質とエネルギー輸送の文脈で明らかにすることを目的とする。また、現実の宇宙空間には圏を定義しうる明確な境界がない場合が多いことから、複合系を究極に推し進めた形としての「単一系」という概念を提唱し、特定の圏に特化した従来の内部磁気圏モデルとは大きく一線を画すユニークな磁気嵐研究の新たな展開の端緒としたい。

3. 研究の方法

本研究は、多圏結合を究極に推し進めた形の磁気嵐基本数値モデルを構築し、「単一系」という新しい概念に立脚した磁気嵐研究を展開するものである。特に着目するのは、「異なるエネルギー帯の結合過程の解明」「異なるプラズマ状態の結合過程の解明」「異なる空間スケール間の結合過程の解明」の三つである。放射線帯粒子の移流を解く内部磁気圏ソルバーと、グローバル MHD シミュレーションと内部磁気圏複エネルギー帯シミュレーションの結合版を新規に開発する。

(1) 異なるエネルギー帯の結合過程：放射線帯電子の移流を解くことができる内部磁気圏粒子環境シミュレーションコードを開発し、リングカレントや放射線帯を構成する様々なエネルギーを持つ粒子の断熱変動を実空間、速度空間において理解する。

(2) 異なる空間スケール間の結合過程：自己無撞着性を追及した形でリングカレントや放射線帯を数値的に表現するため、太陽風-磁気圏-電離圏結合過程を記述できるグローバル MHD シミュレーションと内部磁気圏粒子環境シミュレーションを結合する。

(3) 異なるプラズマ状態の結合過程：内部磁気圏中においては荷電粒子の衝突は殆ど無視できるが、電離した超高層大気 (電離圏) では中性大気との衝突のために磁力線に垂直方向の電流が流れている。このように異なるプラズマ状態が結合した系における内部磁気圏粒子環境の時間発展をシミュレーションとデータ解析を組み合わせる。

4. 研究成果

(1) 内部磁気圏に捕捉された様々な荷電粒子の振る舞いを記述する方程式系の定式化と新しいシミュレーションコードの開発を行った。これまでは、数 eV のエネルギーを持つ粒子の集合であるプラズマ圏、数 keV から数百 keV のエネルギーを持つ粒子の集合であるリングカレント、それ以上のエネルギーを持つ粒子の集合である放射線帯において、それぞれ個別のシミュレーションが用いられてきた。新たに開発したシミュレーションは、数 eV から 10 MeV という7桁ものエネルギーを持つ粒子 (電子、陽子) のバウンス平均近似した輸送過程をシームレスに記述することができるものである。

(2) 本研究で開発した内部磁気圏荷電粒子輸送コードとグローバル電磁流体シミュレ

ーションを組み合わせ、太陽風から電離圏に至るまでの空間構造、ならびに放射線帯を含む内部磁気圏粒子の階層構造が一体となった系を計算機上に構築した。特に、サブストームと呼ばれる擾乱現象が放射線帯に及ぼす影響に着目した。その結果は以下のとおりである。サブストームのオンセットとともに内部磁気圏で強まったプラズマ圧は、外側からは磁気張力に、内側からは磁気圧に押し込まれプラズマは振動を始める。その結果電場は数分の周期で振動する。電場の振幅は大きい、継続時間が短いため、放射線帯の中心部に対しては殆ど影響を及ぼさない。その後、西向きの電場構造とプラズマ高圧部がゆっくりと地球方向へ移動を始める。数分～10分程度の周期で地球を周回する粒子は、このゆっくりと地球方向へ移動する西向きの電場によって地球方向へ押し込まれ、同時に断熱的加速を受けるようになる。オンセット開始から約30分後、放射線帯外帯の中心部において、1 MeV のエネルギーを持つ電子は外から流入した電子によって入れ替わる。サブストームは放射線帯に対して大きな影響を与えるが、従来考えられてきたような磁力線構造の双極子化で単純に説明できるものではなく、磁気圏と電離圏が結合した系における動力学を考えなければならないことを明らかにした。

(2) 磁気嵐時、リングカレントは数時間から半日かけてが発達し、その後数日以上かけて減衰していく。リングカレントの発達は、対流電場の発達が主要原因だと考えられているが、その減衰の原因については決着がっていない。リングカレントを構成するは主に数 keV から数 100 keV のエネルギーを持つイオンであり、これらのイオンを消失させる過程として、電荷交換反応によるイオンの中性化とピッチ角散乱による電離圏への落下が考えられてきた。本研究では、シミュレーション結果と観測結果を直接的に比較することによって、両過程の消失率を定量的に導出した。磁気嵐時のように夜側尾部の磁力線が大きく引き延ばされると磁力線の曲率勾配は小さくなる。イオンの旋回半径が磁力線の曲率勾配に匹敵するほど小さくなると、イオンの断熱不変量は保存されず、ロスコーンに入った粒子は電離圏へ降下し、プロトンオーロラを光らせる。この過程を採り入れたシミュレーションを初めて開発し、リングカレントが時定数約 6 時間で消失できること、IMAGE 衛星が観測したプロトンオーロラの発光強度を概ね説明するなどの良好な結果を得た。

(3) 内部磁気圏と電離圏という異なるプラズマ状態を一つのシステムを捉えるため、両

者が結合したシミュレーションを実行し、磁気嵐時の赤道付近で生じる逆向きのジェット電流を説明しうる結果を得た。内部磁気圏と磁気赤道が電磁氣的に直接結合していることを意味している。言い換えると、電磁エネルギーが異なる空間スケール、異なるプラズマ状態を横断していることを意味している。

(4) れいめい衛星が観測したオーロラとその原因となった降下電子を解析し、厚さ約 0.6 km という極めて薄い拡散型オーロラをサブオーロラ帯で発見した。これまで報告されている同種のオーロラと比べて極めて薄い。磁気赤道面における特徴的な陽子のジャイロ半径よりも薄いことから、内部磁気圏・電離圏結合過程に磁気圏電子が関与していることが示唆される。

(5) 今後、仮想衛星や仮想地上観測を計算機上に配置し、衛星やレーダー観測結果とシミュレーション結果を直接的に比較し、サブストームや磁気嵐の物理の解明を更に推進することが望まれる。また、放射線帯変動の全容を明らかにするためには現在採り入れていないマイクロ過程の導入が必要であり、マクロ-メゾ-マイクロ-スケール間結合を採り入れた結合シミュレーションの開発を目指したい。

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)

- ① Ebihara, Y., M.-C. Fok, T. J. Immel, and P. C. Brandt, Rapid decay of storm time ring current due to pitch angle scattering in curved field line, *J. Geophys. Res.*, 116, A03218, doi:10.1029/2010JA016000, 2011.
- ② Ebihara, Y. and Y. Miyoshi, Dynamic inner magnetosphere: Tutorial and recent advances, in *Dynamic Magnetosphere*, IAGA Special Sopron Book Series Vol. 3, doi:10.1007/978-94-007-0501-2, pp. 145-187, 2011.
- ③ Temporin, A. and Y. Ebihara, Energy-dependent evolution of ring current protons during magnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 116, A10201, doi:10.1029/2011JA016692, 2011.
- ④ Amano, T., K. Seki, Y. Miyoshi, T. Umeda, Y. Matsumoto, Y. Ebihara, and S. Saito, Self-consistent Kinetic Numerical Simulation Model for Ring Current Particles in the Earth's Inner Magnetosphere, *J.*

- Geophys. Res., 116, A02216, doi:10.1029/2010JA015682, 2011.
- ⑤ Saita, S., N. Sato, S. Fujita, T. Tanaka, Y. Ebihara, S. Ohtani, G. Ueno, K. Murata, D. Matsuoka, A. Kitamoto, and T. Higuchi, Displacement of conjugate points during a substorm in a global MHD simulation, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2010JA016155, 116, A06213, 2011.
- ⑥ Kikuchi, T., Y. Ebihara, K. Hashimoto, R. Kataoka, T. Hori, S. Watari, and N. Nishitani, Penetration of the convection and overshielding electric fields to the equatorial ionosphere during a quasi-periodic DP2 geomagnetic fluctuation event, *J. Geophys. Res.*, in press, 15, A05209, doi:10.1029/2008JA013948, 2011.
- ⑦ Kitamura, N., T. Nishimura, T. Ono, Y. Ebihara, N. Terada, A. Shinbori, A. Kumamoto, T. Abe, M. Yamada, S. Watanabe, A. Matsuoka, and A. Yau, Observations of very-low-energy (<10 eV) ion outflows dominated by O⁺ ions in the region of enhanced electron density in the polar cap magnetosphere during geomagnetic storms, 115, A00J06, doi:10.1029/2009JA015601, 2010.
- ⑧ Ebihara, Y., T. Sakanoi, K. Asamura, M. Hirahara, and M. F. Thomsen, Reimei observation of highly structured auroras caused by nonaccelerated electrons, *J. Geophys. Res.*, 115, A08320, doi:10.1029/2009JA015009, 2010.
- ⑨ Ebihara, Y., R. Kataoka, A. T. Weatherwax, and M. Yamauchi, Dayside proton aurora associated with magnetic impulse events: South Pole observations, *J. Geophys. Res.*, 115, A04301, doi:10.1029/2009JA014760, 2010.
- [学会発表] (計 2 1 件)
- ① Ebihara, Y., Direct impact of substorm on relativistic electrons, Inner Magnetosphere Coupling II workshop, Los Angeles, USA, 2012 年 3 月 19 日 (招待講演)
- ② 海老原祐輔, 田中 高史, 爆発的成長相を伴うサブストーム時における内部磁気圏電子の変動. 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 130 回総会及び講演会, 神戸, 2011 年 11 月 3 日
- ③ Ebihara, Y., Current Understanding and Future Directions of Space Weather Research, The 5th Humanosphere Science School, Ambon, Indonesia, 2011 年 10 月 1 日
- ④ Ebihara, Y., M. -C. Fok, N. Nishitani, and T. Kikuchi, Impact of plasma sheet on storm-time ring current and sub-auroral ionosphere, International Union of Geodesy and Geophysics, General Assembly, Melbourne, Australia, 2011 年 7 月 6 日. (招待講演)
- ⑤ Ebihara, Y., Structure, dynamics and coupling of inner magnetosphere, International Union of Geodesy and Geophysics, General Assembly, Melbourne, Australia, 2011 年 7 月 6 日. (招待講演)
- ⑥ 海老原祐輔, M. -C. Fok, T. J. Immel, and B. C. Pontus, リングカレントの消失機構. 日本地球惑星科学連合大会, 千葉県, 2011 年 5 月 26 日.
- ⑦ 海老原祐輔, 坂野井健, 浅村和史, 平原聖文, ミツシエル・トムセン, サブオーロラ帯オーロラの微細構造. 日本地球惑星科学連合大会, 千葉県, 2011 年 5 月 26 日 26 日.
- ⑧ Ebihara, Y., Cross-region coupling during magnetic storms, Earth-Sun system exploration variability in space plasma phenomena, Hawaii, USA, 2011 年 1 月 18 日.
- ⑨ 海老原 祐輔, フォック メイチン, Immel Thomas, Brandt Pontus, リングカレントの早い消失過程: シミュレーションと IMAGE 衛星観測. 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 128 回総会及び講演会, 沖縄県, 2010 年 11 月 1 日
- ⑩ Ebihara, Y., M. -C. Fok, N. Nishitani, and T. Kikuchi, Consequence of high pressure torus surrounding the Earth, International Space Plasma Symposium, Tainan, Taiwan, 2010 年 6 月 28 日.
- ⑪ Ebihara, Y., T. Kikuchi, N. Nishitani, T. Hori, F. J. Rich, M. -C. Fok, and M. F. Thomsen, Cross-region coupling during the 14-15 December 2006 storm, Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei, Taiwan, 2010 年 6 月 23 日.
- ⑫ 海老原 祐輔: 磁気嵐におけるリングカレントの減衰過程. 日本地球惑星科学連合大会, 千葉県, 2010 年 5 月 25 日.
- ⑬ 海老原 祐輔, 菊池 崇, 家田 章正, 新堀 淳樹, 平木 康隆, 堀 智昭, 西谷 望, 樋口 知之, 上野 玄太, Ohtani Shinichi: GEMSIS-電離圏: 擾乱時のグローバルな電離圏電場ポテンシャル分布の導出へ向けて. 日本地球惑星科学連合大会, 千葉県, 2010 年 5 月 24 日.
- ⑭ Ebihara, Y., S. Kasahara, K. Seki, Y. Miyoshi, T. A. Fritz, J. Chen, and T. Zurbuchen, Simultaneous entry of oxygen ions originating from the Sun and Earth into the inner magnetosphere during magnetic storms, American Geophysical Union, Fall Meeting,

- San Francisco USA, 2009年12月14日.
- ⑮ 海老原祐輔, Mei-Ching Fok: リングカレントの早い消失とプロトンオーロラの主オーバルの形成、地球電磁気・地球惑星圏学会 第126回総会及び講演会、金沢、2009年9月29日.
- ⑯ Ebihara, Y., N. Nishitani, and M. C. Fok: A tight linkage between storm-time ring current and subauroral flow. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Sopron, Hungary, 2009年8月27日.
- ⑰ Ebihara, Y.: Inner magnetosphere: Reporter review. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Sopron, Hungary, 2009年8月26日.(招待講演)
- ⑱ Ebihara, Y., M. -C. Fok, J. B. Blake, and J. F. Fennell: Magnetic Influence of the Ring Current on the High Energy Particles in the Inner Magnetosphere. 6th Asia Oceania Geosciences Society Conference, Singapore, 2009年8月14日.(招待講演)
- ⑲ Ebihara, Y., P. C. Brandt, M. -C. Fok: Energetic Particles and their Impact on the Magnetospheric System: What We Learn from the Earth. 6th Asia Oceania Geosciences Society Conference, Singapore, 2009年8月12日.
- ⑳ 海老原祐輔, 笠原慧, 関華奈子, 三好由純, フリッツシアドア, Chen Jiasheng, Grande Manuel, Zurbuchen Thomas: 太陽と地球に起源を持つ酸素イオンの内部磁気圏への同時流入. 日本地球惑星科学連合大会, 千葉県, 2009年5月19日.
- 21 海老原祐輔, 西谷望, 菊池崇, 小川忠彦, 細川敬祐, Fok Mei-Ching, Thomsen Michelle F.: 磁気嵐中のサブオーロラ帯高速プラズマ流とリングカレントの微細構造. 日本地球惑星科学連合大会, 千葉県, 2009年5月17日.

〔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
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/~ebihara/>

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

()
 研究者番号：

(3) 連携研究者

()
 研究者番号：

