

## 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 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2011

課題番号：20340134

研究課題名（和文）

実証型ジオスペースモデリングに向けた内部磁気圏基本モデルの構築による宇宙嵐の研究

研究課題名（英文）

Study of geospace storms based on a new observation-based model of the inner magnetosphere

研究代表者

関 華奈子 (KANAKO SEKI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授

研究者番号：20345854

研究成果の概要（和文）：

本研究では、マクスウェル方程式とボルツマン方程式とを同時に数値的に解くことで、内部磁気圏の場と粒子の時間発展を自己無撞着にシミュレートすることが可能な数値コードを開発した。具体的には、内部磁気圏の環電流粒子のグローバルなダイナミクスを現実的な計算機リソースで再現するために、本研究では粒子軌道をドリフト近似したブラソフ方程式（ドリフト運動論的方程式）とマクスウェル方程式を連立させ、場と粒子の自己無撞着な時間発展を追跡する方程式系を新たに導いた。またこの連立方程式系を数値的に解く3次元（分布関数は5次元）のシミュレーションコードを開発し、実際に磁気流体波動が伝播する様子を再現することを確認した。本研究で開発した新モデルにより、宇宙嵐時の粒子加速に重要な役割を果たすとされている低周波波動や惑星間空間衝撃波到達に伴う磁気圏の急激な圧縮現象 SC 等の速い現象を、物理モデルに基づき自己無撞着にシミュレートしその物理機構を詳細に研究することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：

A new self-consistent and kinetic model for ring current particles in the inner magnetosphere is presented. A closed set of nonlinear time evolution equations is derived that incorporates kinetic particle dynamics and self-consistent development of the electromagnetic field. The particle transport is described by a five-dimensional collisionless drift kinetic equation, in which particle trajectories are approximated by their guiding centers under the influence of a time-dependent electromagnetic field. The time evolution of the electromagnetic field follows the Maxwell equations with the feedback from particles through electric currents. A numerical simulation code solving the system of equations in a global inner magnetosphere in three spatial dimensions (or five dimensions in phase space) is developed. It is demonstrated that the propagation of low-frequency plasma waves can successfully be described by the developed model. It is also found that the self-consistent coupling could affect the transport of energetic particles especially at low energies as well as the intensity and spatial distribution of field-aligned currents. These preliminary results suggest the importance of the self-consistent coupling in the global development of geomagnetic storms. Our approach extends the capability of modeling storm time phenomena occurring in the inner magnetosphere. These include sudden commencements (SCs), substorms, and ULF waves, and other associated phenomena.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：太陽地球システム・宇宙天気

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 激しいオーロラ活動や大規模な電流系の発達、放射線帯粒子の大気への降込みなどを伴う、ジオスペース最大規模の変動現象が宇宙嵐(geospace storm)である。この宇宙嵐に伴う粒子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、両者を自己無撞着に解くことに成功した例はこれまでなかった。

(2) これまでの宇宙プラズマ現象の数値シミュレーションにおいては磁気流体モデルや、イオンの運動論効果を取り入れたハイブリッドモデルなどが主に用いられてきたが、内部磁気圏の環電流粒子のグローバルなダイナミクスを現実的な計算機リソースで再現することは困難であった。

(3) 上述の困難を回避するため、従来の内部磁気圏モデルにおいては、電磁場をモデルで与え、粒子の運動論的方程式の時間発展のみを用いる手法が使われてきた。そのため、場と粒子の相互作用は平衡状態を仮定して圧力バランスから逐次電磁場モデルを構築する方法などがとられており、低周波波動やサブストームに伴い粒子のインジェクションなど、速い現象の記述ができず、その解決が課題とされてきた。

### 2. 研究の目的

宇宙嵐に伴う粒子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、上述のように両者を自己無撞着に解くことに成功した例はない。本研究では、マクスウェル方程式とボルツマン方程式とを同時に数値的に解くことで、内部磁気圏の場と粒子の時間発展を自己無撞着にシミュレートすることが可能な数値コードを世界で初めて開発することを目的としている。その上で、観測との詳細な比較研究によりこの新しい「内部磁気圏基本数値モデル」を検証・改良し、実証型ジオスペースモデルの雛形を構築したい。本研究では、特に従来の数値モデルでは記述できなかった速い時間スケールの現象、粒子加速に重要な要素である ULF 波動の記述に力点をおき、粒子加速にはたす役割を調べる手法を確立することを目的としている。

### 3. 研究の方法

(1) これまでの宇宙プラズマ現象の数値シミュレーションにおいては磁気流体モデルや、イオンの運動論効果を取り入れたハイブリッドモデルなどが主に用いられてきたが、内部磁気圏の環電流粒子のグローバルなダイナミクスを現実的な計算機リソースで再現するために、本研究では粒子軌道をドリフト近似したブラソフ方程式(ドリフト運動論的方程式)とマクスウェル方程式を連立させ、場と粒子の自己無撞着な時間発展を追跡する方程式系を新たに導いた。

(2) 次に、この連立方程式系を数値的に解く 3次元(分布関数は5次元)のシミュレーションコードを開発し、実際に磁気流体波動が伝播する様子を再現すること等を確認した。数値コード構築にあたっては、波動の伝播特性や質量保存を向上させるため、修正双極子型座標をグリッド配置に応用するなどの工夫を行った。

### 4. 研究成果

(1) ジオスペース環境に多大な影響をもたらす宇宙嵐現象の理解に向け、内部磁気圏の数値シミュレーションモデル(GEMSIS-RCモデル)の開発を行った。その結果、ドリフト近似した5次元の運動論的

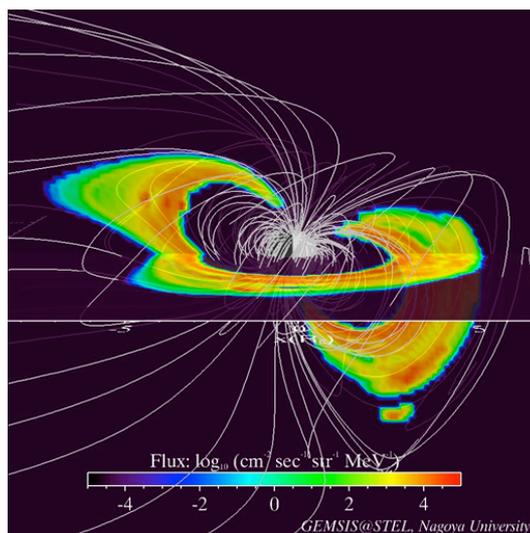


図1: 太陽風動圧上昇イベント後の放射線帯電子の空間分布。白線は磁力線をカラーは電子フラックスを示している。南半球高緯度に孤立した成分が存在していることを示している。

方程式とマックスウェル方程式を連立させた、電磁場とプラズマ粒子の運動を自己無撞着に解き進める方程式系を新たに導出することに世界で初めて成功した。

(2) さらに、この方程式系に基づき数値コードを開発し、内部磁気圏での電磁流体的低周波波動の伝搬や、粒子のドリフト軌道が場との結合によって変形する様子など、従来の磁気圏モデルでは解くことのできなかつた現象をシミュレートすることが可能となった。数値コードのグリッド配位の座標系は、粒子の磁力線に捕捉されたバウンス運動や Alfvén 波の伝播をより正確に解きやすい双極子磁場座標系を採用した。

(3) また、上記の環電流モデルの開発と並行して、任意の電磁場モデルの中で、正確に相対論的電子の軌道を追尾する 3 次元ドリフト近似テスト粒子コードの開発を行った。経験的磁場モデルである Tsyanenko 磁場モデルを用いた計算を行った結果、太陽風動圧の上昇時に地磁気軸の傾斜角の効果を考慮すると、相対論的電子の孤立した成分が、昼間側磁気圏に残ることが可能なことが明らかとなった (図 1)。

(4) (3) で開発した相対論的電子の磁気圏界面からの宇宙空間からの消失 (MPS) の影響を NASA の THEMIS 衛星の統計解析結果と比較したところ、MPS が地球の放射線帯外帯の外側境界の急激な変動に重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

(5) (3) で開発した、相対論的粒子の軌道を正確に解いて統計的に処理する放射線帯テ

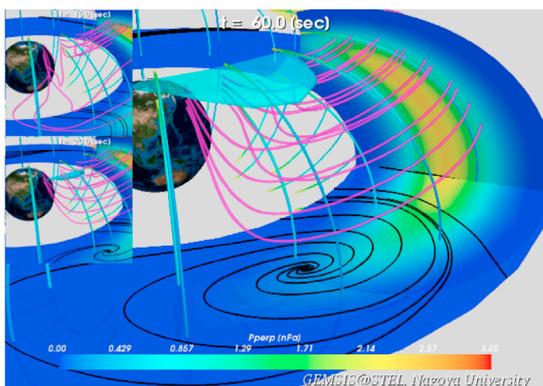


図 2 : 開発した GEMSIS-RC モデルの計算結果。左上のパネルは時刻  $t=15$  と  $20$ 、背景は  $t=60$  秒での 3 次元電流とプラズマ圧分布を表している。紫色と黒色の線は各々、電流と速度の流線を示している。また、それ以外のカラー線は磁力線を示している。

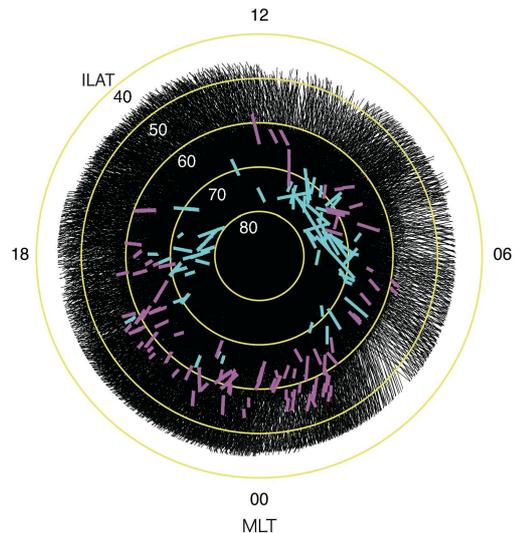


図 3 : 環電流の供給にも重要な役割を果たすと思われる複数エネルギーバンド構造を成す酸素イオン (赤) および水素イオン (青) の空間分布。

ト粒子コードへの、環電流モデルからの場の提供を行い、低周波 (ULF) 波動による相対論的電子加速のシミュレーションを行い、ドリフト共鳴等を再現することに成功した。

(6) 研究計画後半には、テスト問題による検証を行い、低周波電磁波動や粒子ドリフトの記述特性が理論予測値に合致すること、および沿磁力線電流の形成などに成功し、世界初の電磁場とリングカレント粒子を矛盾無く解けるグローバル内部磁気圏モデルの開発の初期結果を国際学術誌に発表した (図 2)。また、太陽風動圧の急激な上昇に伴い内部磁気圏に励起される電磁波動およびこの動圧上昇がリングカレント粒子に与える影響の研究も行った結果、観測とよい一致をみた。

(7) モデルとの比較を視野に入れ、NASA の FAST 衛星のデータを中心にジオスペース観測データの解析を進めた結果、環電流への酸素イオン供給に太陽風動圧変動が重要な役割を果たしていることなどが明らかとなった (図 3)。

## 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 12 件)

- ① 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.*, Vol. 116, A02216, 2011. (査読有)
- ② Matsumura, C., Y. Miyoshi, K. Seki, S. Saito, V. Angelopoulos, and J. Koller, “Outer radiation belt boundary location relative to the magnetopause: Implications for magnetopause shadowing”, *J. Geophys. Res.*, 116, A06212, 10.1029/2011JA016575, 2011. (査読有)
- ③ S. Saito, Y. Miyoshi, and K. Seki, “A split in the outer radiation belt by magnetopause shadowing: Test particle simulations”, *J. Geophys. Res.*, 115, A08210, 2010. (査読有)
- ④ Y. Yao, K. Seki, Y. Miyoshi, J. P. McFadden, E. J. Lund, and C. W. Carlson, “Statistical properties of the multiple ion band structures observed by the FAST satellite”, *J. Geophys. Res.*, 113, A07204, 2008. (査読有)

[学会発表] (計 18 件)

- ① 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 and RB models, International Conference on Radiation Belts and Space Weather: New Horizon from RBSP Mission, 2012年5月, テジョン (韓国), 招待講演.
- ② T. Amano, K. Seki, 他 5 名, Self-consistent drift-kinetic numerical ring-current modeling: Five-dimensional Vlasov-Maxwell approach, Inner Magnetosphere Coupling II workshop, 2011年3月, ロサンゼルス, 招待講演.
- ③ K. Seki, 他 7 名, Study of the inner magnetospheric response to pressure pulses in the solar wind based on the GEMSIS-RC model, IUGG General Assembly, 2011年7月, メルボルン.
- ④ K. Seki, Ring current studies in the GEMSIS project: Development of a new self-consistent simulation model and related observation studies, Conference on Earth Sun System Exploration (ESSE) 2011, January 2011, 2011年1月, コナ, 招待講演.
- ⑤ K. Seki, GEMSIS-magnetosphere project: New models of the inner magnetosphere to investigate high-energy particle variation during geospace storms and the ERG science center function, AGU fall meeting 2010, 2010年12月, サンフランシスコ.

- ⑥ 関華奈子, On the role of variation of solar wind dynamic pressure in terrestrial oxygen outflows: FAST observations, 日本地球惑星科学連合 2009年大会, 2009年5月, 幕張.

[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)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授  
研究者番号: 20345854

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

三好 由純 (MIYOSHI YOSHIKAZUMI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授  
研究者番号: 10377781

天野 孝伸 (AMANO TAKANOBU)

東京大学・理学系研究科・助教  
研究者番号: 00514853

齊藤 慎司 (SAITO SHINJI)

独立行政法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所・研究員

研究者番号: 60528165

梅田 隆行 (UMEDA TAKAYUKI)

名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教  
研究者番号: 40432215

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

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

高田 拓 (TAKADA TAKU)

高知工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授

研究者番号: 80455469

Vassilis Angelopoulos (同左)

カリフォルニア大学ロサンゼルス校 (UCLA)・宇宙地球科学科・教授