

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18340188

研究課題名（和文） 連結階層シミュレーションによる磁気リコネクション現象の解明

研究課題名（英文） Multi-hierarchy simulation studies of magnetic reconnection phenomena

研究代表者

堀内 利得（HORIUCHI RITOKU）

核融合科学研究所・シミュレーション科学研究部・教授

研究者番号：00229220

研究成果の概要：

本研究課題では、「連結階層シミュレーション」モデルと呼ばれるマイクロ階層の物理とマクロ階層の物理をつなぐ数値シミュレーションモデルを開発することにより、階層横断現象である磁気リコネクションの解明を目指した研究を実施し、以下の研究成果を上げた。

無衝突プラズマ中で磁気リコネクションを誘発するマイクロ階層における異常電気抵抗の発生機構として、磁気中性線近傍の有限振幅を持ったストカスティックな粒子運動（メアンダリング運動）に起因するもの、および磁気中性線での非等方なイオン速度分布の形成に伴うプラズマ不安定性に起因するものの2種類の物理機構が存在することを明らかにした。また、駆動源が存在する場合、非常に大きな面内静電場が発生し、この静電力とローレンツ力が釣り合った新しい平衡状態へ移行することも明らかにした。

地球磁気圏プラズマを対象としたマクロ階層の物理の解析として、太陽風リアルタイムデータを上流境界に用い磁気流体シミュレーションにより、現実に発生している太陽風による磁気圏の動的なレスポンス（夜側におけるプラズモイドの発生等）の定性的な再現に成功した。さらに、地球磁気圏サブストーム現象の電気抵抗モデル依存性を調査し、定量的な解析には物理的根拠のある異常抵抗モデルの導入が必要であることを明らかにし、さらにマイクロ階層でのプラズマ不安定性による異常電気抵抗の結果を、磁気流体方程式の中に取り込むためのモデル検討を行った。

領域分割法を用いてマイクロ階層とマクロ階層を同時にかつ無同着に解くことのできる連結階層シミュレーションモデルを考案した。プロットタイプの連結階層モデルを実装したシミュレーションプログラムを開発し、アルベン波の1次元伝播およびプラズマフロー流入現象に適応し、開発した数値アルゴリズムの適応限界・精度等の検証を行い、今後改良すべき問題点等を明らかにした。

没入型3次元バーチャルリアリティ（VR）装置 CompleXcope で電磁粒子シミュレーションの結果を表示するソフトウェアを開発し、磁気リコネクションのシミュレーション結果をVR空間で解析した。その結果、イオンのメアンダリング運動と加熱機構の間の強い相関を明確に示すことができた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
18年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
19年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
20年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	12,500,000	3,750,000	16,250,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：宇宙・天体プラズマ

### 1. 研究開始当初の背景

ここで扱う磁気リコネクション現象では、波粒子相互作用や散逸過程などのマイクロ物理過程と、グローバルスケールでの不安定性やプラズマ流の発生、それに伴うエネルギー輸送などのマクロ物理過程が相互に影響を及ぼしながら、系のダイナミカルな時間発展を決定している。そのため、磁気リコネクション現象の総合的な理解には、従来から行われてきた階層間相互作用のない階層分離モデルでははなはだ不十分で、時々刻々変化する他の階層の物理情報を取り入れながら、複数階層での物理を同時に矛盾なく取り扱うことのできる連結階層モデルが必要となる。研究開始当初は、このようなモデルは存在していなかった。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、マイクロ階層の物理とマクロ階層の物理をつなぐ数値シミュレーションモデル、「連結階層シミュレーション」モデルを開発することにより、プラズマ物理における大きな未解決問題の1つである磁気リコネクション現象の解明を目指すことを目標とした。具体的には、(1) 粒子シミュレーションによる電気抵抗の発生メカニズムの解明、(2) ミクロ階層の物理とマクロ階層の物理をつなぐ「連結階層シミュレーション」モデルの構築、(3) 開発したモデルを具体的な物理問題に応用することによる、その妥当性の検証、および(4) モデルの検証や物理要素を抽出するための解析手法の開発を行った。

### 3. 研究の方法

研究手法としては、対象とするプラズマの非一様性に着目し、シミュレーション領域をマイクロな過程が支配的なリコネクション点近傍領域とマクロな過程が支配的な遠方領域の2つに分ける領域分割法に基づく連結階層シミュレーション手法を採用した。具体的には、リコネクション点近傍のマイクロの物理過程の記述に開放系粒子(PIC)シミュレーション手法を、リコネクション点から離れた遠方でのマクロ物理過程の記述に開放系磁気流体(MHD)シミュレーション手法を、また、両階層の接するインターフェイス領域には、階層間相互作用を記述するための「Shake Hand Method」と呼ばれる基づくインターフ

ェイスモデルを採用した。この「連結階層シミュレーション」手法の開発を支援する研究として、開放系粒子シミュレーション手法を用いたマイクロ階層からのアプローチと開放系磁気流体シミュレーションをもちいたマクロ階層からのアプローチ、および複雑な3次元構造を解析するための没入型3次元バーチャルリアリティ装置を用いた科学的可視化手法の開発を並行して行った。

### 4. 研究成果

#### (1) ミクロ物理による異常電気抵抗

無衝突プラズマ中で磁気リコネクションを誘発するマイクロ階層における異常電気抵抗の発生機構として、(1) 磁気中性線近傍の有限振幅を持ったメアンダリング運動に起因するもの、および(2) 磁気中性線での非等方なイオン速度分布の形成に伴うプラズマ不安定性に起因するもの、の2種類の物理機構が存在することを明らかにした。前者のメアンダリング運動の効果は、2流体方程式に現れる圧力テンソルの非対角項から評価できる。図1は、2次元開放系粒子シミュレーションの結果で、圧力テンソル項(青線)で表されているメアンダリング運動の効果が磁気リコネクションを誘発する電場(赤線)を維持していることを示している。

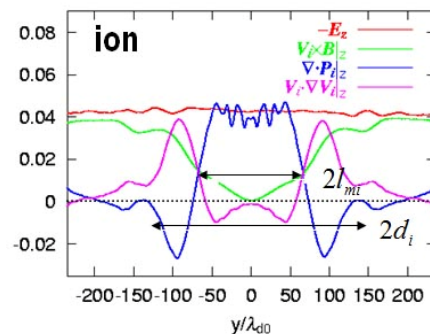


図1. イオンに働く力の空間分布。 $y=0$ がリコネクション点に対応する。

一方、プラズマ不安定性の影響を調べるため、リコネクション面に垂直な2次元平面での粒子シミュレーションを実行した。低域混成ドリフト不安定性が非線形飽和した後に、2種類の波長の異なるキンクモードが成長するのを観測した。1つは、短波長キンクモ

ードで、従来から知られているドリフトキンクモードに対応し、その成長率は電子質量に強く依存している。もう1つは、イオン質量に強く依存した長波長キンクモードである。後者は、低域混成ドリフト不安定性による電場揺動と大振幅をもつメアンダリングイオンの相互作用の結果生まれる磁気中性面でのイオン分布関数の非等方性が起因して誘発される。このモードはリアルな質量比においても、有限の成長率（～イオンのラーモア周波数）を維持しているため、観測される磁気リコネクション現象を十分説明しうることが明らかとなった。図2は、2つのキンクモードが成長した時の磁場の空間分布を示している。

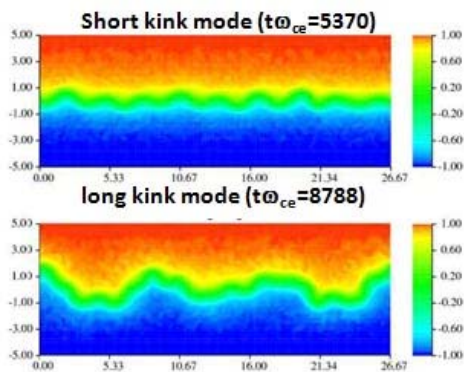


図2. 短波長キンクモード（上）と長波長キンクモード（下）の成長期における磁場空間分布。

また、駆動源が存在する場合、非常に大きな面内静電場が発生し、この静電力とローレンツ力が釣り合った新しい平衡状態へと系が緩和していくことも明らかにした。

## (2) 地球磁気圏物理への応用

地球磁気圏プラズマを対象としたマクロ階層の物理の解析として、太陽風リアルタイムデータを上流境界に用い磁気流体シミュレーションにより、現実には発生している太陽風による磁気圏の動的なレスポンス（夜側におけるプラズモイドの発生等）の定性的な再現に成功した。さらに、地球磁気圏のサブストームへの適用を前提に、地球磁気圏のリアルタイムグローバルシミュレーションモデルを地磁気活動の観測結果と比較することにより、定量的な評価を行った。またマクロ階層からのアプローチの限界と粒子効果及び磁気リコネクション発生条件について調査と検討を行い、磁気流体方程式で使用する異常電気抵抗モデルに対する依存性を調べた。マイクロ階層での粒子シミュレーションで明らかにされたプラズマ不安定性による異常電気抵抗の結果を、磁気流体方程式の中

に取り込むためのモデル検討を行った。

## (3) 連結階層シミュレーションモデルの開発

磁気リコネクション研究のため、連結階層シミュレーションモデルを開発している。シミュレーション領域はMHD、PIC、インターフェイスの3つの領域に分けられる（図3）。MHD領域はマクロ階層をMHDコードによって解く領域、PIC領域はマイクロ階層をPICコードによって計算する領域である。インターフェイス領域は2つの領域が重なった部分である。MHD、PICコードの両方から物理量を求め、それらの内挿値をインターフェイス領域の物理量としている。これによって、MHD・PIC領域がスムーズに接続できる。

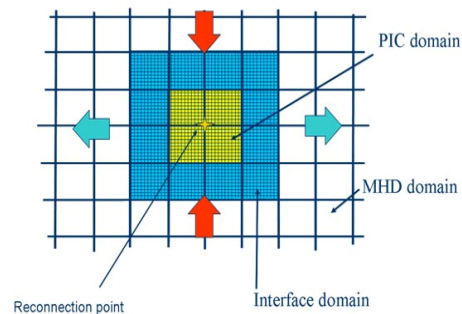


図3. 領域分割法に基づくインターフェイス領域での結合モデル。

この連結モデルの物理的妥当性の検証を2つの簡易化されたモデルを用いて行った。まず、Alfvén波の伝播をシミュレーションした。図4は、様々な時刻における流体速度  $V_x$  の空間分布を示す。連結階層モデル中をAlfvén波がスムーズに伝播していることが分かる。次に、プラズマフローの流入シミュレーションを実施した。図5は様々な時刻における、プラズマ質量密度の空間分布である。初めにMHD領域の密度が増大し、時間とともにPIC領域へとプラズマが流入し、PIC領域の密度が増大していくことが分かる。

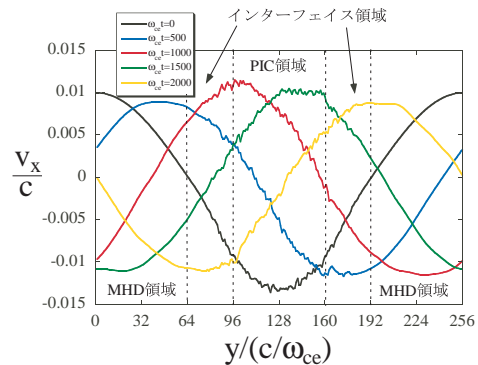


図4. Alfvén波の1次元伝播シミュレーション。5本の曲線は異なる時刻における速度場の空間分布を示している。

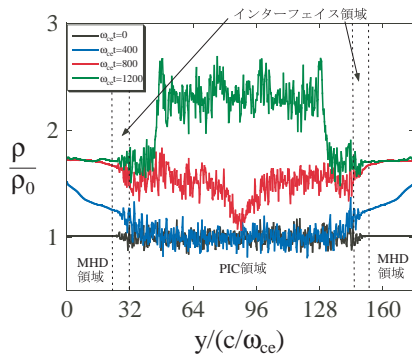


図5. プラズマフローの流入シミュレーション。曲線は様々な時刻における、プラズマ質量密度の空間分布である。

#### (4) 開放系粒子シミュレーションモデルの改良

磁気リコネクションのマイクロ階層の物理を解析するための開放系電磁粒子シミュレーションコード「PASMO」を改良した。粒子に関する開放系境界モデルは以下のとおりである。上流境界：磁場凍結条件を仮定している。粒子数密度は磁場に比例し、また  $E \times B$  ドリフトで粒子は流入する。境界セル内とシミュレーションボックス外の粒子を毎ステップ無効化し、quiet-start 法で生成した空間一様な Shifted-Maxwellian に従う粒子を新たに境界に load する。下流境界：自由境界条件を課している。境界セル内とシミュレーションボックス外の粒子を毎ステップ無効化し、内側のセルの粒子分布を境界セルにおける粒子分布としてコピーする。この境界条件を使うことで、上流境界では精度よく磁場凍結条件が成立し、かつ下流境界では非物理的ノイズを低下することができた(図6)。

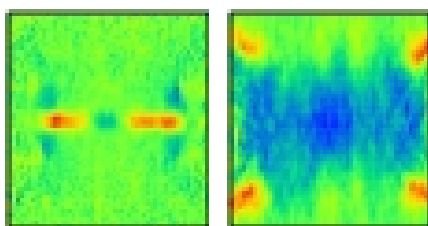


図6 電子(左)とイオン(右)の磁場凍結条件  $(E + v \times B)_z$  の等高線図。緑が0レベルを表す。

また、長短2種類のシミュレーションボックスでの結果を比較した結果、長いボックスのうち短いボックスに対応する領域(駆動型リコネクションが発生している領域)での結果が短いボックスでの結果と一致することが

確認できた(図7)。このモデルを使うことで1セルあたりの粒子数が少なくなるため、3次元シミュレーションでも、精度のよい結果を得ることができる。

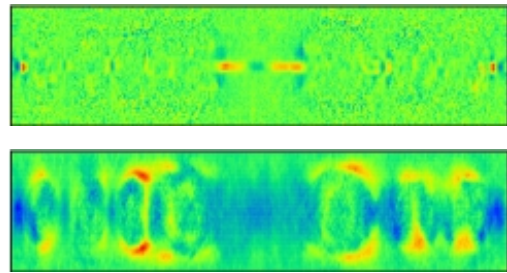


図7 長いシミュレーションボックスの場合の電子(上)とイオン(下)の磁場凍結条件  $(E + v \times B)_z$  の等高線図。中央付近で駆動型リコネクションを発生させている。その領域での各物理量が短いボックスの結果(図6)と一致していることが確認されている。

(5) VR を用いた科学的可視化手法の開発  
没入型3次元バーチャルリアリティ(VR)装置 CompleXscopeで電磁粒子シミュレーションの結果を表示するソフトウェア(VFIVE 拡張版)を開発した。これはシミュレーションで得られた電磁場の下で任意の位置を初期位置として粒子軌道を追跡することができるソフトウェアである。初期位置は3次元マウス「ワンド」で与え、初速度はシミュレーションデータから求められる流体速度を平均速度として Box-Muller 法で求められた Shifted Maxwellian に従うように与える。leap-frog 法で Newton-Lorentz 方程式を解き、粒子の近接グリッドでの電磁場から3次精度の内挿公式を用いて粒子位置での電磁場を与える。図8は磁場構造とイオン温度分布、イオンの軌道を表示している。イオンは磁場中性面をほとんどメアンダリング運動をしていることが

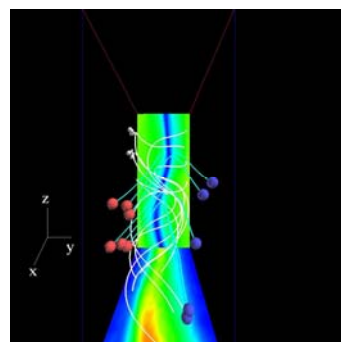


図8 CompleXscopeを使ったVR空間での可視化。白線がイオンの軌道、青線が磁力線、yz平面のカラー等高線が  $B_x^2 + B_y^2$ 、xy平面はイオンの温度分布を示す。

わかる。また、そのメアンダリング運動の軌道幅がイオン温度の高温領域の幅とほぼ一致していることがわかる。これにより、イオンの加熱機構がメアンダリング運動と密接な関係にあることが明確に示された。

#### 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18件)

- ① “Formation of non-Maxwellian distribution and its role in collisionless driven reconnection”, R. Horiuchi and H. Ohtani, *Comm. Comp. Phys.*, Vol. 4 (2008), 496-505 [査読有].
- ② “Formation of Sweet-Parker-like electron dissipation region in a driven open system”, Bin Li, R. Horiuchi, and H. Ohtani, *Plasma and Fusion Research*, Vol. 3 (2008), S1054 [査読有].
- ③ “Roles of ion and electron dynamics in the onset of magnetic reconnection due to current sheet instabilities”, T. Moritaka and R. Horiuchi, *Physics of Plasmas*, Vol. 15 (2008), 092114 [査読有].
- ④ “Electron Force Balance in Steady Collisionless Driven Reconnection”, Bin Li and R. Horiuchi, *Physical Review Letters*, vol. 101 (2008), 215001-1-215001-4 [査読有].
- ⑤ “Scientific Visualization of Magnetic Reconnection Simulation Data by CAVE Virtual”, H. Ohtani and R. Horiuchi, *Plasma and Fusion Research*, Vol. 3, (2008), pp. 054 [査読有].
- ⑥ “Development of Electromagnetic Particle Simulation Code in an Open System”, H. Ohtani, S. Ishiguro, R. Horiuchi, Y. Hayashi and N. Horiuchi, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 4759, (2008), pp. 329-343 [査読有].
- ⑦ “Development of Multi-hierarchy Simulation Model for Studies of Magnetic Reconnection”, S. Usami, H. Ohtani, R. Horiuchi, and M. Den, *Communications in Computational Physics* Vol. 4 (2008) pp. 537-544 [査読有].
- ⑧ Anomalous resistivity due to kink modes in a thin current sheet”, T. Moritaka, R. Horiuchi, and H. Ohtani, *Physics of Plasmas*, Vol. 14, No.10 (2007) pp. 102109-1-102109-10 [査読有].
- ⑨ “Towards cross-hierarchy simulation of collisionless driven reconnection in an open system”, R. Horiuchi, H. Ohtani, and A. Ishizawa, *J. Plasma Phys.*, Vol. 72, No.6 (2006) pp. 953-956 [査読有].
- ⑩ “Plasma instabilities and anomalous resistivity in the current sheet”, T. Moritaka, R. Horiuchi, H. Ohtani, and A. Ishizawa, *J. Plasma Phys.*, Vol. 72, No.6 (2006) pp. 961-964 [査読有].
- ⑪ “Dominant roles of pressure tensors in collisionless magnetic reconnection without guide field”, A. Ishizawa and R. Horiuchi, *J. Plasma Phys.*, Vol. 72, No.6 (2006) pp. 787-790 [査読有].
- ⑫ “A glassless stereoscopic visualization system for a 3D MHD real-time Earth’s magnetosphere simulator”, M. Den, T. Kuwabara, T. Ogawa, T. Tanaka, I. Goncharenko, and H. Amo, *Journal of Plasma Physics*, Vol. 72, (2006), pp. 837-840 [査読有].
- ⑬ “Real-time Earth magnetosphere simulator with three-dimensional magnetohydrodynamic code”, M. Den, T. Tanaka, S. Fujita, T. Obara, H. Shimazu, H. Amo, Y. Hayashi, E. Nakano, Y. Seo, K. Suehiro, H. Takahara, T. Takei, *Space Weather*, Vol. 4, (2006), pp. S06004-1-S06004-10 [査読有].
- ⑭ “A 3D Visualization System for Real-Time Space Weather Simulator with a Glassless Stereoscope”, M. Den, T. Kuwabara, T. Ogawa, T. Tanaka, I. Goncharenko, and H. Amo, *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, Vol. 53, (2006), pp. 151-157 [査読有].
- ⑮ “Simulation of Interplanetary Shock Wave Caused by CME on August 25, 2001”, T. Ogawa, M. Den, T. Tanaka, and K. Yamashita, *Advances in Geosciences*, No. 2, (2006), pp. 65-71 [査読有].
- ⑯ “Dependence of the cutoff latitude of solar energetic protons on the southward component of the IMF”, H. Shimazu, T. Tanaka, M. Den, and T.

Obara, *Advances in Space Research*, Vol. 38, (2006), pp. 503-506 [査読有].

- ⑰ “Three Dimensional Particle Simulation on Structure Formation and Plasma Instabilities in Collisionless Driven Reconnection”, H. Ohtani, R. Horiuchi, A. Ishizawa, *Journal of Plasma Physics*, Vol. 72, (2006), pp. 929-933 [査読有].
- ⑱ “Theory and simulations of relativistic particle motions in a magnetosonic shock wave”, S. Usami and Y. Ohsawa, *Journal of Plasma Physics* Vol. 72 (2006) pp. 887-890 [査読有].

[学会発表] (計 8 件)

- ① “Toward multi-scale simulation of magnetic reconnection in space plasma”, M. Den, R. Horiuchi, T. Tanaka, H. Ohtani, S. Usami, T. Moritaka, 37th COSPAR Scientific Assembly (2008/7/13-20, Montreal, Canada).
- ② “理論シミュレーションが解く磁気リコネクションの最新物理”, 堀内利得, 第7回核融合エネルギー連合講演会U (2008年6月20日、青森市) [招待講演].
- ③ “Multi-Hierarchy Simulation Model of Magnetic Reconnection in Collisionless Plasmas”, R. Horiuchi, S. Usami, H. Ohtani, and M. Den, *8th Asia Pacific Plasma Theory Conference* (11-13 December, 2007, Gandhinagar, India) [招待講演].
- ④ “Formation of non-Maxwellian distribution and its role in collisionless driven reconnection”, R. Horiuchi, and H. Ohtani, *20th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas* (10-12 October, 2007, Austin, USA) [招待講演].
- ⑤ “Development of Multi-scale Simulation Model for Magnetic Reconnection Studies”, S. Usami, H. Ohtani, R. Horiuchi, and M. Den, *20th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas* (10-12 October, 2007, Austin, USA)
- ⑥ “Fast electron inflow channel into electron dissipation region in collisionless driven reconnection”, R. Horiuchi, and H. Ohtani,

*US-Japan workshop on Numerical Simulation of Complex Plasmas* (8-9 October, 2007, Austin, USA) [招待講演].

- ⑦ “Multi-scale simulation of reconnection phenomena in space plasma”, M. Den, R. Horiuchi, T. Tanaka, H. Ohtani, S. Usami, T. Moritaka, US-Japan Reconnection Workshop (MD, USA, 2007).
- ⑧ “Improved Boundary Model for Particle Simulation of Collisionless Driven Reconnection”, H. Ohtani, R. Horiuchi, The 48th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, American Physical Society, Philadelphia, PA, USA, 2006.

[図書] (計 2 件)

- ① 田光江、桑原匠史、小川智也、田中高史、亙慎一、イゴール・ゴンチャレンコ、天羽宏嘉、“裸眼立体視による宇宙天気シミュレータの可視化技術”、「立体視テクノロジー次世代立体表示技術の最前線」((株) エヌ・ディー・エス、2008年) pp. 551-557.
- ② 堀内利得、“地上に太陽をー核融合研究の現状と将来ー”、「人間環境論集」(第8巻) (法政大学人間環境学会、2008) PP. 37-51.

[その他]

<http://www.dss.nifs.ac.jp/hori>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

核融合科学研究所・シミュレーション科学研究部・教授 堀内利得

(2) 研究分担者

核融合科学研究所・シミュレーション科学研究部・教授 田光江

核融合科学研究所・シミュレーション科学研究部・准教授 大谷寛明

核融合科学研究所・シミュレーション科学研究部・助教 宇佐見俊介

(3) 連携研究者