

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23340182

研究課題名(和文) プラズマにおける多階層現象のシミュレーション研究

研究課題名(英文) Simulation studies of multi-hierarchy phenomena in plasmas

研究代表者

堀内 利得 (Horiuchi, Ritoku)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：00229220

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：シミュレーションの実空間をその役割に応じて複数の階層に分割し、連結して同時に解くことのできる多階層連結シミュレーションモデルの開発・改良および関連数値手法の開発を通じて、(1)異常電気抵抗の発生メカニズムの解明、(2)構造遷移・エネルギー変換機構の解明、(3)閉じ込めプラズマ中での多階層現象の解明、を目指したシミュレーション研究を推進した。特に、階層横断現象である磁気リコネクションに支配された磁気圏サブストームでの構造形成、異常電気抵抗の役割の解析、合体実験での物理過程等に関する重要な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Through the development of multi-hierarchy interlocked simulation model, in which simulation domain is divided into multiple hierarchies according to governing physical processes and physics in each hierarchy can be solved simultaneously by an interlocking method, simulation research has been promoted aiming at clarification of the following physical tasks; (1) triggering mechanism of an anomalous resistivity, (2) structure transition and energy conversion processes, (3) cross-hierarchy phenomena controlled by magnetic reconnection in fusion plasmas. Especially, important findings has been obtained in the researches of structure formation process in the earth magnetosphere, merging process of fusion plasmas controlled by magnetic reconnection, and so on.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：多階層連結モデル 磁気リコネクション 構造形成 エネルギー変換 異常電気抵抗 磁気圏サブストーム

1. 研究開始当初の背景

本研究で対象としているプラズマは、(1) 階層性、(2) 階層間相互作用、(3) 非平衡・開放性、で特徴付けられる。そのため、プラズマ複雑現象の理解には、個別階層の物理に加え、マイクロ階層からマクロ階層までの階層間相互作用を取り入れた総合的(全体論的)な視点からのアプローチが必要となる。近年のスーパーコンピュータや可視化技法等のIT技術の驚異的な発達を背景に、数値シミュレーションを用いてこの全体論的なアプローチによる現象全体の解明や将来予測をしようとする研究が科学の諸分野において生まれ、新たな学問的潮流として急成長してきている。

2. 研究の目的

本研究課題では、このような新しい学際的学問領域「シミュレーション科学」の成果を導入・発展させることにより、核融合プラズマから、宇宙空間プラズマ、天体プラズマまでの広範囲の自然現象に共通して現れる、様々なプラズマの多階層現象の解明に取り組むことを目標とした。具体的には、プラズマ中において、何桁も異なる複数個の時空間スケールの物理が存在することがその要因として未解決のまま残っている典型的な問題、磁気圏尾部での磁気リコネクション、リコネクションを用いた合体実験、および磁場閉じ込めプラズマにおける鋸歯状現象や圧力駆動型不安定性等の現象を取り上げ、現在開発中の多階層連結シミュレーションモデルを発展させることにより多階層現象における以下の物理課題の解明を目指した。

- (1) 異常電気抵抗の発生メカニズムの解明
- (2) 構造遷移・エネルギー変換機構の解明
- (3) 閉じ込めプラズマ中での多階層現象の解明

3. 研究の方法

研究手法として、それまで開発を進めてきた領域分割法に基づく多階層連結シミュレーション手法を採用した。これは、磁気リコネクション近傍のようなマイクロな物理が重要となる領域には開放系粒子シミュレーションを、それを取り巻くマクロ階層の物理が支配的となる領域には磁気流体シミュレーションを、またその中間領域には二流体あるいは粒子流体混合モデルを用いたシミュレーションを採用し、境界層を通じて各階層が時々刻々変化する情報を交換する、としたモデルとなっている。

4. 研究成果

- (1) 多階層連結シミュレーションモデルの改良と計算機コードの整備
 - ① シミュレーションコードの最適化

スーパーコンピュータ(スパコン)を利用した磁気リコネクション研究では、マイクロ階層を担当し、CPU高負荷となっている粒子シミュレーションの高効率・最適化が重要となる。本研究で用いる開放系電磁粒子シミュレーションコードは1次元方向(平衡電流方向)にMPIを用いた領域分割で分散並列化をし、領域分割された領域では粒子をスレッド並列化した。さらに、より大規模な粒子シミュレーションを実行するため、以下のような開発を進めた。

- ・ 上流境界での粒子生成法の変更
- ・ 初期配位生成コードのメモリ削減
- ・ 3次元領域分割に対応した上流・下流の粒子に関するアルゴリズム開発
- ・ Exact Charge Conservation法の導入
- ・ バケットソーティングの導入
- ・ スパコンFX100への移植

② 2階層連結モデルとその拡張

磁気リコネクションの階層間相互作用を探求するため、磁気流体(MHD)コードと粒子(PIC)コードを連結する多階層連結シミュレーションモデルの開発・拡張を進めた(論文④、⑧)。この多階層モデルは実空間分割法に基づき、シミュレーションの実空間を複数の階層に分割する。マクロ階層のダイナミクスはMHDで求め(MHD領域)、マイクロ階層の物理はPICで解く(PIC領域)。この2つの領域の間には、データをスムーズにやりとりするためのインターフェイス領域を挿入する。

研究期間内に、この多階層モデルについて、①不等間隔メッシュの導入、②領域の動的切り替え手法の開発、③粒子衝突PIC領域を加えた3階層連結モデルの作成、④2方向(2次元)階層連結モデルへの改良、⑤拡張MHDモデルとPICモデルの連結、といったモデルの改良・拡張及び物理検証を行った。

③ 適合格子細分化法

適合格子細分化法(AMR)を用いた磁気流体(MHD)コードとParticle-in-Cell(PIC)法による粒子コードを組み合わせた多階層連結シミュレーションコードを開発した(論文①、⑤)。マクロ領域をMHDで、マイクロ領域をPIC法で計算し、磁気リコネクション現象で重要となるマクロな物理とマイクロの運動論物理を同時に解くことができる。MHD領域では、AMRで管理された階層格子を用いている。

MHDとPICのデータはInterface領域で連結される。Alfven波伝播モデルおよびプラズマ流入モデルにおいて、Interface領域は32~64セル程度の幅があれば、PIC領域で生じる計算粒子による振動がMHD領域への伝播するのを十分に抑えられることが分かった。この結果を踏まえ、開発したモデルを磁

気リコネクション現象に適応し、物理過程の再現に成功した。

さらに、異なる計算格子を用いられた MHD の初期条件および境界条件の計算データを、本研究で開発した計算格子へ組み込むための手法を開発し、磁気リコネクション現象へ応用した。この手法では、外部データの格子と連結コードの格子を対応付け、物理量を取り入れて初期条件と境界条件を決定する。そのため、時系列データを取り入れることで境界条件を時間変化させることが可能となっている。このモデルを磁気リコネクション現象に応用し、境界条件として時間変化する外部データを用いた場合に、予想された通りに PIC 領域で磁気リコネクションを再現させることができた。

また、巨視的効果を記述する MHD 程式シミュレーションコードを簡単に並列化・AMR 化する、汎用 AMR モジュールの開発を行った。MHD シミュレーションコードの構造に合わせて自己相似型ブロック構造格子を採用し、AMR 化によって生じるブロック構造を管理するためにツリー構造を採用した。この汎用モジュールを採用したシミュレーションが高い並列性を発揮し得ることを確認したのち、レイリー・テイラー不安定性の 2 次元シミュレーションに応用し、AMR 汎用モジュールが当初想定した通りの性能を発揮することを確認した。

(2) 多階層現象への応用

① プラズマ不安定性に伴う異常抵抗発生機構の解明

本研究では、開放系粒子シミュレーション手法を用いて、マイクロ階層の境界に与えたマクロ階層の物理情報がマイクロ階層の無衝突リコネクションに及ぼす影響を、特に、磁気島が発生する場合の異常抵抗発生機構(学会発表⑬)とエネルギー過程に注目して解析した。上流境界で与える外部駆動電場を制御することにより、同じ初期条件から出発したリコネクションシステムの時間発展において異なる 2 種類の解が発生することを見いだした。第 1 は磁気島の発生を伴う解、第 2 はプラズマ不安定性の発生に起因して磁気島が間欠的に発生する解である(学会発表①、③)。両者を比較することにより、第 2 の解におけるエネルギー変換率は、第 1 の解のそれに比べかなり大きいことが分かった。これは、磁気島がエネルギー変換における鍵となる役割を果たしていることを示唆している。磁気島の発生を伴う解では、磁気リコネクションで発生した高速のプラズマが、リコネクション下流に存在する磁気島に捕らわれることにより熱化が促進され、蓄積された大量の高エネルギープラズマが間欠的に放出される

ことも分かった。

② 宇宙プラズマ中における構造遷移現象の解明

地球磁気圏の擾乱の一つであるサブストームでは磁気圏尾部における磁気リコネクションが重要な役割を担う。磁気圏のグローバルなふるまいを記述する MHD の枠組みにおいて磁気リコネクションを起こすためには、プラズマ凍結条件の破れである異常電気抵抗の効果を含む項の導入が必要になる。ここでは、粒子シミュレーションで得られたマイクロな粒子運動論効果であるメアングーリング効果に起因する異常電気抵抗をモデル化して MHD に導入し、サブストームシミュレーションを行った。図 1 はオーロラエレクトロジェット電流を表す AE 指数の時間発展を示している。ここで、左図がシミュレーション結果を、右図が衛星による観測結果を、赤の縦棒はオンセットの時刻を示す。この結果は磁気圏サブストームのグローバルなふるまいをよく再現しており、今回導入した異常電気抵抗モデルの有効性を示すことができた。(論文⑦)

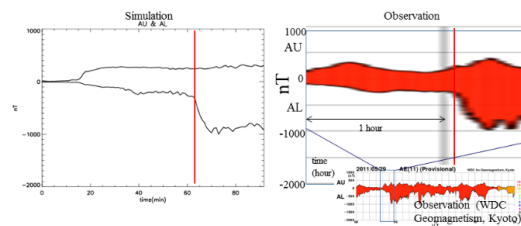


図 1. 磁気圏サブストームのシミュレーション結果と観測結果(論文⑦)。

③ 磁場閉じ込めプラズマ中での階層横断現象の解明

MHD に基づく巨視的シミュレーションの中に微視的效果を取り入れる研究の一環として、MHD に Hall 効果を取り込んだ Hall MHD 方程式に基づく乱流シミュレーションを実施し、微視的效果(ここでは Hall 項による磁場へのイオンスキン長効果)が巨視的成分(イオンスキン長よりも長い成分)に及ぼす影響を調べた(論文②、⑥)。Hall MHD 一様等方乱流の大規模シミュレーションから、微視的效果の導入が(1)磁場のエネルギースペクトルの高波数成分が励起され、乱流のイオンスキン長よりも長い波数領域に波数の $-5/3$ 乗則が現れる一方で、イオンスキン長よりも短い波数領域には波数の $-7/3$ 乗則が現れること、(2)磁場の波数間の非線形結合が生じる結果、高波数成分と低波数成分の結合が著しく強化される場合があること、(3)磁場の構造以上に、速度場(渦度場)の構造を大きく変化させる構造遷移をもたらすことなどを明らかにした。

実空間分割型の多階層モデルを用いて、マクロのダイナミクスが磁気リコネクションのミクロな物理に及ぼす影響について調べた(論文④)。MHD 領域から流入させるインフローのパターンによって、PIC 領域で駆動される磁気リコネクションが変わり、単一の X 点を持つ定常のリコネクションと複数の X 点を持つ間欠のリコネクションに大別されることが分かった。また、このリコネクションの物理がどのように変わるのか定量的に体系づけることができた。

一方で、リコネクション下流領域の階層構造を探求するため、粒子速度分布を詳しく解析した。その結果としてリング状構造を持つ特徴的な速度分布を見出し、pickup 機構という実効的な加熱機構を受けていることが分かった。これまで pickup 機構では、マイナー成分である重イオンだけがその対象となり得ると考えられていたが、主成分である水素イオンも pickup 機構を受けることがはじめて示された。

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 38 件)

- ① “Multi-scale Simulations of Magnetic Reconnection Using Particle-in-Cell and Magnetohydrodynamics with Adaptive Mesh Refinement Technique”, T. Ogawa, S. Usami, R. Horiuchi, M. Den and K. Yamashita, *Plasma and Fusion Research* **11**, 2401096 (2016); DOI: 10.1585/pfr.11.2401096 [査読有]
- ② “Hall effects and sub-grid-scale modeling in magnetohydrodynamic turbulence simulations”, H. Miura, K. Araki, and F. Hamba, *J. Comput. Phys.*, Vol.**316** (2016) 385-395; DOI:10.1016/j.jcp.2016.03.067 [査読有]
- ③ “Influence of Guide Magnetic Field on Collisionless Driven Reconnection”, R. Horiuchi, S. Usami and H. Ohtani, *Plasma and Fusion Research*, **9** (2014) 1401092; DOI: 10.1585/pfr.9.1401092[査読有]
- ④ “Multi-Hierarchy Simulation of Collisionless Driven Reconnection by Real-Space Decomposition”, S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, and M. Den, *Journal of Physics: Conference Series* Vol. **561**, (2014) 01202; doi: 10.1088/1742-6596/561/1/012021 [査読有]
- ⑤ “Development of Simulation Code Connecting Particle-in-Cell and Magnetohydrodynamics on Hierarchical Mesh”, T. Ogawa, S. Usami, R. Horiuchi, M. Den, and K. Yamashita, *JPS Conf. Proc.*, Vol. **1**, (2014) 016013, DOI:10.7566/JSPC.1.016013. [査読有].
- ⑥ “Structure transitions induced by the Hall term in homogenous and isotropic magnetohydrodynamic turbulence”, H. Miura and K. Araki, *Phys. Plasmas* Vol.**21** (2014) 072313. doi:10.1063/1.4890857 [査読有]
- ⑦ “Macro- and microphysics of magnetic reconnection in a multi-hierarchy open system”, R. Horiuchi, M. Den, T. Tanaka, H. Ohtani, and S. Usami, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **55**(2013), 014008; <http://stacks.iop.org/PPCF/55/014008>[査読有]
- ⑧ “Development of Multi-Hierarchy Simulation Model with Non-Uniform Space Grids for Collisionless Driven Reconnection”, S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, and M. Den, *Physics of Plasmas* Vol. **20**, No.6 (2013)061208. doi:10.1063/1.4811121[査読有]
- ⑨ “Plasma Physics and Fusion Science by Virtual-Reality System”, H. Ohtani, Y. Suzuki, A. Kageyama, R. Kanno, S. Ishiguro, M. Shoji, and Y. Tamura, *Proceeding of International conference on Simulation Technology(JSST 2012)*(2012) 394-397. [査読有]
- ⑩ “Simulation of Plasma Flow Injection with Multi-Hierarchy Model Aiming Magnetic Reconnection Studies”, S. Usami, H. Ohtani, R. Horiuchi, and M. Den, *Communications in Computational Physics* Vol. **11**, No.3 (2012) 1006-1021. doi: 10.4208/cicp.181010.090611a [査読有]

[学会発表] (計 78 件)

- ① “Macro- and microscopic physics of collisionless driven reconnection”, S. Usami, R. Horiuchi, H. Miura, H. Ohtani, and M. Den, *18th International Congress on Plasma Physics* (June 27-July 1, 2016, Kaohsiung, Taiwan) [invited].
- ② “Investigation of short-wave Hall and gyro-viscous effects in instability and turbulence”, H. Miura, K. Araki, and A. Ito, *The 25th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas* (12-14 August, 2015, Golden, Colorado, U.S.A.) [招待講演]
- ③ “Macro-Micro Interlocked Simulation for Multiscale Plasma Phenomena like Magnetic Reconnection”, R. Horiuchi, H. Ohtani, and S. Usami, *12th International School/Symposium for Space Simulations* (July 6-10, 2015, Prague, Czech) [invited]
- ④ “バーチャルリアリティ技術が切り開くプラズマ物理・核融合プラズマ研究”, 大谷寛明, 第 20 回ビジュアライゼーションカンファレンス, (2014 年 11 月 7 日、

- 東京)[招待講演].
- ⑤ “Multi-Hierarchy Simulation of Collisionless Driven Reconnection by Real-Space Decomposition”, S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, and M. Den, *Joint Varenna-Lausanne International Workshop THEORY OF FUSION PLASMAS* (1-5 September, 2014, Varenna, Italy).[招待講演]
- ⑥ “Dynamical Evolution of Collisionless Driven Reconnection under the Influence of Strong Guide Magnetic Field”, R. Horiuchi, S. Usami, H. Ohtani, *11th Asia Pacific Plasma Theory Conference*, (1-4 July, 2014, Jeju Island, Korea) [招待講演].
- ⑦ “多階層物理に支配されたエネルギー開放系での磁気リコネクション”, 堀内利得, 宇佐見俊介, 大谷寛明, 第30回プラズマ・核融合学会年会(2013年12月3-6日, 東京工業大学、東京)[招待講演].
- ⑧ “Micro- and macroscopic approaches towards full understanding of multi-scale physics of collisionless driven reconnection”, R. Horiuchi, M. Den, T. Tanaka, S. Usami, H. Ohtani, *The 12th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space (IPELS)* (1-5 July, 2013, 白馬、長野).[招待講演].
- ⑨ “Macro and micro physics of magnetic reconnection in a multi-hierarchy open system”, R. Horiuchi, S. Usami, H. Ohtani, and M. Den, *The 18th International Stellarator/Heliotron Workshop & 10th Asia Pacific Plasma Theory Conference*, (29 January-3 February, 2012, Canberra & Murrumbidgee, Australia)[招待講演].
- ⑩ “Microscopic triggering mechanism of collisionless reconnection and its role in multi-hierarchy system”, R. Horiuchi, *Workshop on “MHD and Kinetic Processes in Laboratory, Space and Astrophysical Plasmas”* (6-9 June, 2012, Beijing, China) [招待講演].
- ⑪ “Effective Approach to Plasma Physics and Fusion Plasmas by Virtual-Reality Visualization”, H. Ohtani, A. Kageyama, Y. Tamura, M. Nunami, S. Ishiguro, M. Shohji, N. Ohno, D. Matsuoka, R. Horiuchi, *18th International Stellarator/Heliotron Workshop & 10th Asia Pacific Plasma Theory Conference*, (29 January-3 February, 2012, Canberra & Murrumbidgee, Australia)[口頭発表].
- ⑫ “An anomalous resistivity in collisionless driven reconnection and its role in multi-hierarchy system”, R. Horiuchi, S.

Usami, H. Ohtani, and M. Den, *22nd International Conference on Numerical Simulation of Plasmas* (7-9 September, 2011, Long Branch, USA) [招待講演].

- ⑬ “Anomalous resistivity and multi-scale simulation of collisionless driven reconnection in an open system”, R. Horiuchi, S. Usami, H. Ohtani, T. Moritaka, and M. Den, *The 11th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space* (11-15 July, 2011, Whistler, Canada) [招待講演].

[図書] (計1件)

- ① 堀内利得、内藤裕志: 「MHDシミュレーションと磁気リコネクション」(“原子力・量子・核融合事典”、丸善出版、2014年)、I-156-I-157.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀内 利得 (HORIUCHI, Ritoku)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号: 00229220

(2) 研究分担者

田 光江 (DEN, Mitsue)
独立行政法人情報通信研究機構・電磁波計測研究所宇宙環境インフォマティクス研究室・主任研究員
研究者番号: 10202194

三浦 英昭 (MIURA, Hideaki)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授
研究者番号: 40280599

小川 智也 (OGAWA, Tomoya)
北里大学・一般教育部・講師
研究者番号: 70392719

大谷 寛明 (OHTANI, Hiroaki)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号: 90332189

宇佐見 俊介 (USAMI, Shunsuke)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号: 80413996

(3) 連携研究者

()

研究者番号: