

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2016

課題番号：24740374

研究課題名(和文) 粒子・流体連結に基づく多階層シミュレーションモデルによる磁気リコネクション研究

研究課題名(英文) Studies on magnetic reconnection with a multi-hierarchy simulation model based on the PIC-MHD interlocking

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、実空間分割型に基づいた多階層シミュレーションモデルを開発・改良し、それを用いて磁気リコネクションの階層間相互作用を明らかにすることを目的とする。この多階層モデルについて、開放境界条件の導入、クーロン衝突効果の導入、連結の多方向化(多次元化)、適合格子細分化法などを含めた領域の自動変換などの改良・拡張を行った。さらに多階層モデルを用いて、磁気リコネクションの階層間相互作用を調べ、マクロ階層のインフローパターンによって定常的あるいは間欠的な磁気リコネクションに分けられることを見出した。さらに、その傾向について定量的に体系づけることに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this research topic we aim to develop and improve a multi-hierarchy simulation model based on the real-space decomposition method, and to clarify the interaction between multiple hierarchies in magnetic reconnection by using the multi-hierarchy model. We have performed the improvement and extension of the multi-hierarchy model such as employment of an open boundary condition, implement of Coulomb collision, two-dimensional interlocking, and the automatic conversion of domains with the adaptive mesh refinement method. By means of the multi-hierarchy model, we have investigated the influence of dynamics in the macroscopic hierarchy on microscopic physics of magnetic reconnection. It is observed that in one case, steady reconnection with a single X-point is driven, and in another case, intermittent reconnection with multiple X-points takes place. We have quantitatively obtained the tendency on the above influence.

研究分野：シミュレーションによるプラズマ物理学

キーワード：多階層シミュレーション 磁気リコネクション 粒子モデル MHDモデル

1. 研究開始当初の背景

プラズマ中には、プラズマを構成するイオンや電子の運動スケールに依存したミクロな過程から、領域全体にまたがるマクロスケールな過程まで、様々な時間・空間スケールの物理が混在している。そのため、プラズマはそれらが複雑に絡み合っており、階層横断現象(多階層現象)の宝庫であるといえる。そのような多階層現象の研究には、近年急速に発展している、計算機シミュレーションを用いてコンピュータの仮想環境上で実験を行う手法が、極めて有効である。

磁気リコネクションをはじめとする階層横断現象は、核融合から、プラズマ基礎、宇宙プラズマ物理に共通する研究課題であり、その解明には、分野という垣根を越えた研究交流が必要とされる。

また、その研究手段である多階層シミュレーションは、近年、プラズマ分野にとどまらず、気象学、宇宙天気予報、医学、自動車設計などの工学への応用等、様々な学問分野で開発が進められている。本研究課題で開発される多階層シミュレーションモデルは、様々な分野に貢献できる可能性が高い。

2. 研究の目的

本研究の目的は多階層シミュレーションモデルの開発とそれを用いての磁気リコネクション研究に分けられる。

開発する多階層モデルには、実空間分割法(領域分割法)を採用する。すなわち、シミュレーションの実空間をマクロとミクロの階層に分け、階層毎にアルゴリズムを変える多階層シミュレーションモデルの開発を進める。マクロ階層の物理はプラズマを1つの流体と近似して扱う磁気流体(MHD)アルゴリズムで解き、ミクロ階層の振る舞いは粒子1つ1つの運動を第一原理である運動方程式を解いて計算する粒子(PIC)アルゴリズムで求める。

開発した多階層モデルを、宇宙や実験室プラズマで共通して発生する普遍的なエネルギー解放過程であり、かつ典型的な階層横断現象である磁気リコネクションに適用し、その機構を理解することが研究面における目的である。たとえば、磁気圏尾部での磁気リコネクション、太陽風での衝撃波および磁場閉じ込めプラズマにおける鋸歯状現象などに多階層モデルを適用し、磁気リコネクションにおけるミクロ・マクロスケールの階層としての役割、階層同士の相互作用の物理的機構を明確にし、階層横断現象として磁気リコネクションを理解することを目指す。

3. 研究の方法

マクロ階層からマクロ階層の物理までを連結して、同時にかつ矛盾無く解くことができる多階層シミュレーションモデルを開発する。このモデルは、典型的な階層横断現象

である磁気リコネクションの全体像を解明することを目的として開発を進めてきたものである。本研究開始前までに、開発した簡易なモデル(図1)によって、磁気リコネクションの多階層シミュレーションを行うことに成功しており、さらに、その結果を以前の粒子シミュレーションの結果と比較し、物理的に正しいことを確認している。

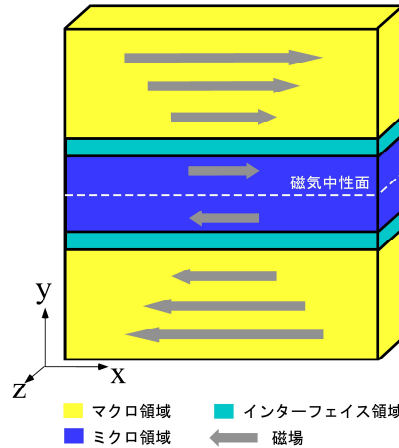


図1: 本研究開始前までに開発された多階層シミュレーションモデルの模式図。

本研究では、より大規模かつ長時間の多階層シミュレーションを行うため、この多階層モデルについて、開放境界条件の導入、クーロン衝突効果の導入、連結の多方向化(多次元化)、適合格子細分化法などを含めた領域の自動変換、MPI 並列による高速化などの改良・拡張を行い、磁気リコネクションの階層構造を調べることができるようにする。

4. 研究成果

(1) これまでの多階層モデルにおいては、リコネクション下流方向には周期境界条件が用いられていたが、この境界条件を改良して開放境界条件とした。この改良によって、リコネクションの結果生成されたアウトフローやプラズマモードがシミュレーション領域の外へ抜け出ることができるため、長時間の多階層シミュレーションを行うことが可能となった。

(2) これまで直接連結していたミクロ階層(PIC領域)とマクロ階層(MHD領域)の間に、クーロン粒子衝突効果を取り込んだPIC領域(衝突PIC領域と名付けた)を設け、図2で示したような3つの階層を連結する多階層モデルを構築した。この3階層連結による多階層モデルの検証として、磁気リコネクションの結果生じるアウトフローを模擬して、マクスウェル速度分布から大きくずれたプラズマフローがPIC領域から衝突PIC領域を経てMHD領域にスムーズに伝わることを確認した。

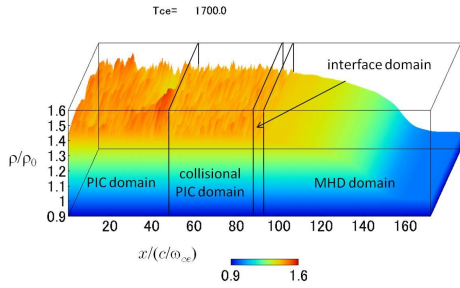


図2: 3階層連結による多階層モデル。PIC領域、衝突PIC領域、MHD領域が連結されている。

(2) 将来より現実的な広い領域を計算することを目指して、磁気流体で解くマクロ階層(MHD領域)に非一様格子を適用した。このモデルにより、磁気リコネクションが駆動される多階層シミュレーションを行うことに成功した。

(3) さらに、格子幅を物理状況に応じて動的に変化させる適合格子細分化法(AMR)を組み込んだ。このモデルを用いて、磁気リコネクションを駆動するシミュレーションに成功している。

(4) これまでのモデルでは、一方向の階層連結のみを扱ってきた。このモデルを発展させて、二方向の階層連結による多階層モデルを開発した。さらに、図3のように周囲のMHD領域から中央のPIC領域へと、2次元的な構造を持つプラズマフローがスムーズに伝播することを確かめた、その結果、2次元的に正しく連結されていることが検証された。

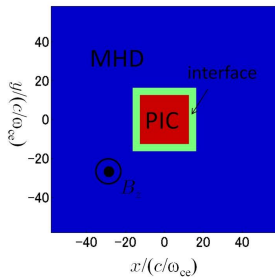


図3: 二方向階層間連結による多階層モデルの模式図。中央にPIC領域、周囲にMHD領域がある。

(5) 開発した多階層モデルを用いて、磁気リコネクションの階層間相互作用について世界で初のシミュレーション解析を行った。マクロ階層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詳しく調べ、マクロ階層から流入するプラズマフローのパターンによって、単一のリコネクション点を持つ定常なリコネクションが続くケース(図4) 複数のリコネクション点を持つ間欠的なリコネクションが発生するケース(図5)に分けられることが見出された。また、その傾向について定量的に体系づけることに成功した。

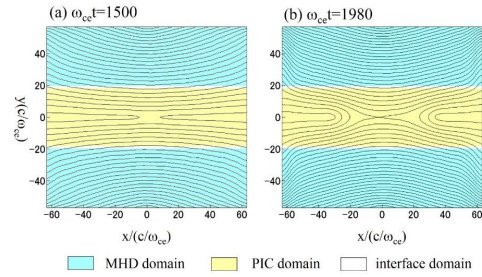


図4: 定常的な磁気リコネクション。

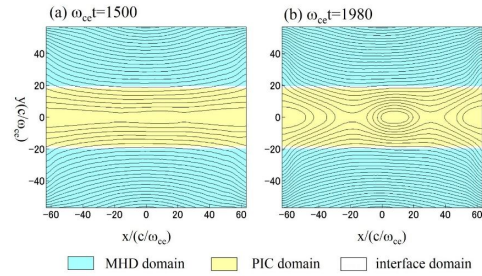


図5: 間欠的な磁気リコネクション。

(6) 磁気リコネクション下流をより適切に階層連結するため、Hall項や有限ラーマー半径効果といった理想MHDでは扱えない効果を取り込んだ拡張MHDモデルとPICモデルを連結した、新しい多階層モデルを開発し始めた。現在、ホイッスラー波を伝播させるなどの検証を行っている。

(7) 地球磁気圏観測衛星の測定値を模擬したデータを初期値として、磁気リコネクションの多階層シミュレーションを行った。まだ多くの課題が残されているものの、多階層シミュレーションが地球磁気圏の全体系に適用されて、宇宙天気予報の精度向上などに貢献できる可能性が示された。

(8) 下流方向を階層間連結するためには、磁気リコネクションのアウトフローにおけるプラズマの振る舞いを明らかにすることも重要な課題である。そこで、多階層モデルの一部として組み込まれているPASMOと名付けられた粒子モデルを用いて、シミュレーションを行った。その結果、図6のように、磁気リコネクション下流で、リング状の特徴的な粒子速度分布が形成されていることが分かった。

この成果は、この速度分布関数を考慮に入れた新しいMHD方程式系を作成することにより、より適切に階層間連結が行える可能性を示した。

このことから、イオンが非断熱的な運動をしており、実効的な加熱を受けていることが明らかになった。この実効的加熱は、pickupと呼ばれる機構とよく似ている。これまでpickupはプラズマにわずかに含まれる重イオンに対してのみ働くと考えられてきた。しかし、本成果により、主成分イオンである水素イオンがpickupされうることが示した。

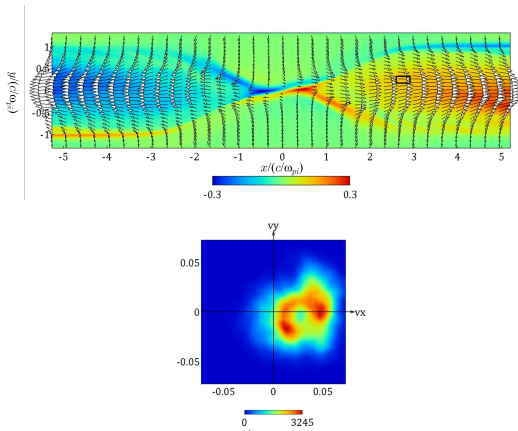


図 6: (上)イオンバルク速度のベクトルと電場 E_y 。(下)ボックスで囲まれた領域のイオン速度分布。

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 6 件)

Tomoya OGAWA, Shunsuke USAMI, Ritoku HORIUCHI, Mitsue DEN and Kazuyuki YAMASHITA: “Multi-Scale Simulations of Magnetic Reconnection Using Particle-in-Cell and Magnetohydrodynamics with Adaptive Mesh Refinement Technique”, Plasma Fusion Research 11, 2401096 (2016). 【査読有り】
DOI:10.1585/pfr.11.2401096

S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, and M. Den: “Multi-Hierarchy Simulation of Collisionless Driven Reconnection by Real-Space Decomposition”, Journal of Physics: Conference Series 561, 012021 (2014). 【査読有り】
DOI:10.1088/1742-6596/561/1/012021

Tomoya Ogawa, Shunsuke Usami, Ritoku Horiuchi, Mitsue Den, and Kazuyuki Yamashita: “Development of Simulation Code Connecting Particle-in-Cell and Magnetohydrodynamics on Hierarchical Mesh”, JPS Conference Proceedings 1, 016013 (2014). 【査読有り】
DOI:10.7566/JSPC.1.016013

宇佐見俊介、銭谷誠司:「シミュレーション研究の課題と将来」(小特集 俯瞰と展望:磁気リコネクション研究の最前線)、プラズマ核融合学会誌 Vol.89, 861-863 (2013). 【査読無し】

http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2013_12/jspf2013_12-861.pdf

https://nifs-repository.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri&item_id=16

S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, and M.

Den: “Development of Multi-Hierarchy Simulation Model with Non-Uniform Space Grids for Collisionless Driven Reconnection”, Physics of Plasmas 20, 061208 (2013). 【査読有り】

DOI:10.1063/1.4811121

https://nifs-repository.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri&item_id=220

Ritoku Horiuchi, Mitsue Den, Takashi Tanaka, Hiroaki Ohtani, and Shunsuke Usami: “Macro- and Microphysics of Magnetic Reconnection in a Multi-Hierarchy Open System”, Plasma Physics and Controlled Fusion 55, 014008 (2013). 【査読有り】

DOI:10.1088/0741-3335/55/1/014008

〔学会発表〕(計 42 件)

宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明:「Studies on proton effective heating in magnetic reconnection by means of particle simulations」、The US-Japan Workshop and School on Magnetic Reconnection (MR2017)、2017年3月19日 - 22日、ひめぎんホール(愛媛県松山市)

宇佐見俊介、堀内利得、小川智也、大谷寛明、田光江:「Macro- and microscopic physics of collisionless driven reconnection」、18th International Congress on Plasma Physics (ICPP2016)、2016年6月27日 - 7月1日、高雄(台湾)

宇佐見俊介、三浦英昭、堀内利得、大谷寛明、田光江:「Improvement of the Multi-Hierarchy Model for Magnetic Reconnection Studies - Interlocking between PIC and Extended MHD -」、The 24th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas (ICNSP2015)、2015年8月12日 - 14日、ゴールドデン(米国)

宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明、田光江:「Multi-Hierarchy Simulation of Collisionless Driven Reconnection by Real-Space Decomposition」、Joint Varenna-Lausanne International Workshop THEORY OF FUSION PLASMAS、2014年9月1日 - 5日、ヴァレンナ(イタリア)

宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明、田光江:「Multi-Hierarchy Simulation with 2D Interlocking Scheme for Magnetic Reconnection Study」、23rd International Toki Conference、2013年11月18日 - 21日、セラトピア土岐(岐阜県土岐市)

宇佐見俊介、大谷寛明、堀内利得、田光江:「Multi-Hierarchy Simulation for Magnetic

Reconnection - 2D Hierarchy-Interlocking Model-」, 第 55 回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会、2013 年 11 月 11 日-15 日、デンバー（米国）

宇佐見俊介、堀内利得、大谷寛明、田光江：
「Development of Multi-Hierarchy Simulation Model by MHD-PIC Interlocking for Magnetic Reconnection」、12th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space (IPELS2013)、2013 年 7 月 1 日 - 5 日、白馬東急ホテル（長野県白馬村）

宇佐見俊介、大谷寛明、堀内利得、田光江：
「Multi-Hierarchy Simulation of Magnetic Reconnection - Hierarchy-Interlocking in the Downstream Direction -」, 第 54 回アメリカ物理学会プラズマ物理分科会、2012 年 10 月 29 日-11 月 2 日、プロビデンス（米国）

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

なし

取得状況 (計 0 件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

核融合科学研究所 数値実験炉研究プロジェクト WEB ページ

<http://nsrp.nifs.ac.jp/index.html>

核融合科学研究所 ヘリカル研究部 基礎物理シミュレーション研究系 WEB ページ

<http://fps.nifs.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし