

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740373

研究課題名(和文) 磁気リコネクションの多階層シミュレーション：メソスケール構造の効果について

研究課題名(英文) Multiscale simulation of magnetic reconnection -- A study of the effects of meso-scale structures

研究代表者

沼田 龍介 (Numata, Ryusuke)

兵庫県立大学・シミュレーション学研究所・准教授

研究者番号：30615787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、プラズマ中の基礎過程であって、磁力線のつなぎ替えとそれによるエネルギーの変換がおこる磁気リコネクション現象について、微視的な効果を正しく取り扱える包括的なシミュレーションを行った。シミュレーション結果からプラズマの粒子としての性質に起因する効果である位相混合によってプラズマが強く加熱されることを明らかにした。また、不安定性によって乱流などのメソスケール構造を引き起こす圧力勾配などの非一様性を取り扱うように、理論とシミュレーションモデルの拡張を行った。これにより電子圧力勾配が駆動する磁気リコネクションの理論を構築することができた。

研究成果の概要(英文)：We have carried out simulation study on magnetic reconnection--a fundamental process in plasmas where the magnetic field lines reconnect and the magnetic energy is converted in other forms of energies--using a holistic simulation model including microscopic physics. From the simulation results, we have revealed that plasmas are strongly heated via phase mixing due to particle nature of plasmas. We have also extended the theory and simulation model to include inhomogeneity, such as pressure gradients, which drives instability causing meso scale structures, e.g. turbulence. By this extension, we have constructed the theory of magnetic reconnection driven by electron pressure gradients.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：磁気リコネクション ジャイロ運動論 プラズマ加熱 マイクロテアリング 位相混合

1. 研究開始当初の背景

磁気リコネクション現象は、磁場構造の変化にともなって磁場に蓄えられた磁気エネルギーが解放され、プラズマのエネルギーに変換される過程であり、高温プラズマで重要な役割を果たしている。磁気リコネクションは、核融合プラズマの閉じ込め性能の劣化や、太陽表面、地球磁気圏などにおける爆発的な現象に関連していると考えられており、その理解は様々なプラズマ現象の理解に資するプラズマ物理の中心的なテーマの一つとなっている。

磁気リコネクション現象は、プラズマの粒子としての性質に起因するミクロな散逸機構を媒介として、マクロに爆発的な現象を引き起こされる、多階層の物理が関連した現象であり、それがこの問題の本質的な困難さの原因となっている。

磁気リコネクション現象に関して、1950年代から多くの理論・シミュレーション研究が行われているが、特に近年はプラズモイド不安定性と呼ばれる2次的な不安定性に起因する乱流構造による高速磁気リコネクションが注目を集めている。我々は、乱流などに起因するこのようなメソスケール構造に着目し、マクロスケールからミクロスケールまでを包括的に取り扱う多階層シミュレーションが必要ではないかと考えた。

我々が開発していたジャイロ運動論シミュレーションコード AstroGK は、磁気リコネクションを含むプラズマ中のダイナミクスを包括的に取り扱うことを目指して開発されており、磁化プラズマ¹⁾の微視的な挙動を正しく取り扱うことのできるコードである。本研究開始までに、磁気リコネクションの線形過程(テアリング不安定性)の解析や、太陽風における3次元電磁乱流の解析などによってコードの有用性が実証された状況にあった。

2. 研究の目的

本研究では、AstroGKコードを用いて、磁気リコネクションのメソスケール構造に着目した多階層シミュレーションを行い、以下のことを明らかにすることを目的とした。

1.) 磁気リコネクションの非線形過程の解析を行い、磁気リコネクションの時間スケールや、磁気リコネクションの結果として生じる磁気島の成長・飽和過程、および加熱や輸送など磁気リコネクションを通じたプラズマのエネルギー分配過程における運動論効果について明らかにする。

1) プラズマを構成する荷電粒子が、磁力線に強く巻き付いて運動している状態をいう。すなわち、平均磁場があることを意味する。強い磁場によって閉じ込められる核融合プラズマは明らかに磁化しているし、宇宙プラズマも磁化していると考えてよい場合が多い。

2.) プラズマのベータ (β) 値 (プラズマの圧力と磁気圧の比をあらわす) が高い場合、プラズマの微視的な運動論効果が卓越し流体モデルとの乖離が顕著になることが線形解析から明らかになっている。1)で調べた運動論効果に対するベータ値の影響を明らかにする。

3.) プラズマの圧力が非一様になる場合、マイクロテアリング不安定性と呼ばれる新たな不安定性が磁気リコネクションを駆動する。圧力勾配のない一様プラズマにおける磁気リコネクションの線形・非線形シミュレーションを、圧力勾配を含む磁気リコネクションモデルに拡張する。

4.) プラズモイドやマイクロテアリング不安定性によって駆動される乱流などのメソスケール構造が存在する場合に、それらの構造が磁気リコネクション過程に与える影響を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、ジャイロ運動論コード AstroGKを用いて、運動論効果を取り入れた磁気リコネクション現象のシミュレーションを行う。シミュレーションの実行には、国際核融合エネルギー研究センター(IFERC-CSC)の大型計算機 Heliosを用いた。

本研究では、これまで我々が行ってきた磁気リコネクションのシミュレーションと同様に、電子と1種類のイオン種からなるプラズマを考え、ともにジャイロ運動論モデルにしたがうとする。本研究で取り扱うプラズマのパラメタ領域は、図1に示すように、プラズマベータ値およびプラズマの圧力勾配の有無によって整理される。ベータ値が小さい ($\beta \ll 1$) 場合は流体モデルがよい近似になり得るが、ベータが高くなる ($\beta \sim 1$) とイオンの運動論効果が卓越する。圧力勾配がない場合は、電流(磁場勾配)がテアリング不安定性を駆動するが、圧力勾配が存在する場合は、新たにマイクロテアリングモードが励起されることになる。本研究では、ベータ値が1程度で圧力勾配が存在する場合を含む領域を対象とする。

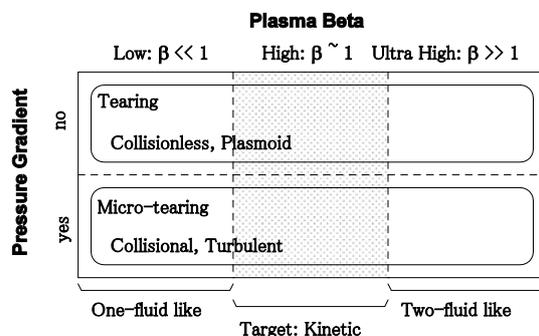


図1 キーパラメタと本研究が対象とするパラメタ領域。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を、プラズマの圧力勾配が存在する場合としない場合に分けて説明する。

位相混合効果によるプラズマ加熱機構

磁気リコネクションにおけるエネルギー変換過程に対する運動論効果を調べるために、圧力勾配が存在しないシンプルな系における非線形ジャイロ運動論シミュレーションを実施した。その結果、位相混合によるプラズマの効率的な加熱現象を新たに見出した。磁気リコネクションにおいては、解放された磁場エネルギーがプラズマの運動エネルギー・加熱・高エネルギー粒子の生成など様々な形態のエネルギーに変換されうるが、本研究の画期的な点は、プラズマの位相混合効果を正しく取り扱うことによって、弱衝突プラズマ²においてもプラズマが顕著に加熱されうることを初めて明らかにした点である。

位相混合効果は、プラズマを構成する粒子が電磁場と共鳴的な相互作用を起こすことによって、速度分布関数に急峻な構造が形成される現象である。例えば、磁力線方向の位相混合では、粒子は磁力線方向には自由に移動できるので、磁力線方向に変動する電磁場の中で様々な速度を持った粒子集団を考えると、波のある位相に見いだされる粒子集団は、その波の位相と特定の関係をもつ粒子のみによって構成される。ある位置におけるプラズマの速度分布を見たとき、共鳴粒子の数は多く、共鳴粒子とわずかに速度が異なる粒子は少ない。速度空間にこのような構造を持つプラズマは粒子間衝突の頻度が少ない場合であっても、速やかに熱化される。つまり、弱衝突プラズマにおけるプラズマ加熱は、運動論効果による速度空間の構造形成と衝突によるその緩和によって決定される。熱化を含んだプラズマのエネルギーの変換過程を正しく取り扱うためには、位相混合と衝突の効果を含んだモデルが必要であるが、AstroGK コードによってはじめて、磁気リコネクションの系においてこのようなシミュレーションを行うことが可能になった。

図 2~図 5 にシミュレーションから得られたプラズマ加熱および位相混合の様子を示す。β=1 とした。

図 2 は電子プラズマの加熱率(エネルギー散逸率と等価)の空間分布を示している。赤色が強く加熱が起こっている場所を示している。背景に描かれている点線は磁力線をあ

² 磁気リコネクション研究が対象とする多くのプラズマでは衝突はほとんど起こらないと考えられている。衝突が全くないと仮定したモデル(無衝突モデル)を考えることが多いが、衝突の頻度が少ないからといって、必ずしも衝突がもたらす効果を見捨てるわけではない。

らわす。図の中心で磁力線のつなぎ替えが起こっており、左右方向から中心に向かってプラズマが流入し、上下方向に流出する大きなプラズマの流れがある。リコネクション領域を通り X 型の磁力線構造(図 2 では色のついた領域にほぼ対応する)はセパトリクスと呼ばれ、上流と下流を隔てている。図から明らかのように電子の加熱はセパトリクス近傍で磁力線に沿って起こっていることが分かる。加熱が強く起こっている点における電子の速度分布関数を図 3 に示す。磁力線に平行方向速度(v_{\parallel})を横軸、垂直方向速度(v_{\perp})を縦軸とした平面に、それぞれの速度を持つ粒子の数を表示しており、赤(青)は初期状態に比べて増加(減少)していることをあらわしている。粒子の分布は、 v_{\perp} 方向には概ね一様であるのに対し、 v_{\parallel} 方向には振動する構造がみられる。これは、位相混合に特徴的な構造であり、電子の加熱は磁力線平行方向の位相混合が原因で起こっていることが実証された。

Dissipation Rate of electron at $t = 37.78 [\tau_A]$

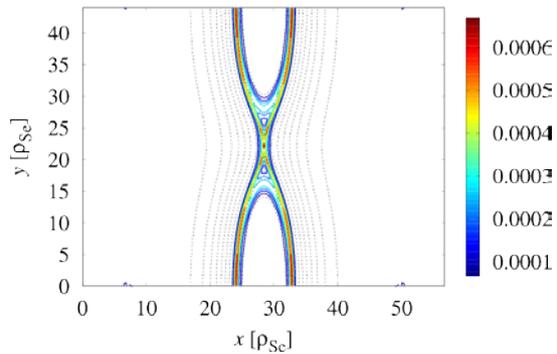


図 2 電子加熱の空間分布。

Dist. Func. of electron at $t = 37.78 [\tau_A]$
(x, y) = (32.77, 0.00) [ρ_{sc}]

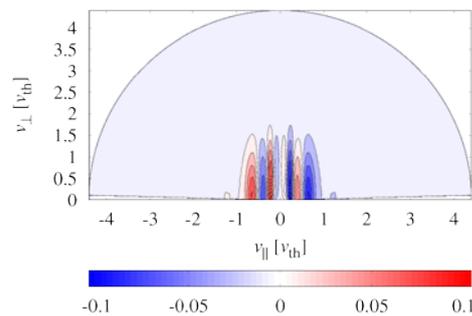


図 3 電子の速度分布関数の構造。

同様の測定をイオンに対して行った結果を図 4, 図 5 に示す。特徴的な構造が形成されている様子を捉えるため、図 2 に比べて時間が経過した時刻での様子を示している。この時刻では、新たな不安定性のため中心部分に島状の構造(磁気島)が形成されている様子が見て取れる。イオンは電子に比べて速度が遅いため、加熱領域がセパトリクスに沿って広がらず、形成された磁気島の中で主

に加熱が起こっている。分布関数の構造 (図 5) を見ると、電子と同様の v_{\parallel} 方向の構造に加えて v_{\perp} 方向にも振動構造が形成されている。これは有限ラーマ半径効果に起因する位相混合による加熱の特徴を表していると考えられる。磁化プラズマにおいては、粒子は磁力線に巻き付くように高速にラーマ回転運動をしており、ラーマ回転運動で平均された場の影響を受ける。(一般に電子のラーマ半径はイオンに比べて小さいため、有限ラーマ半径効果の影響を受けにくい。) 粒子の速度によって共鳴条件にばらつきが生じることが、 v_{\perp} 方向の位相混合の原因となっている。

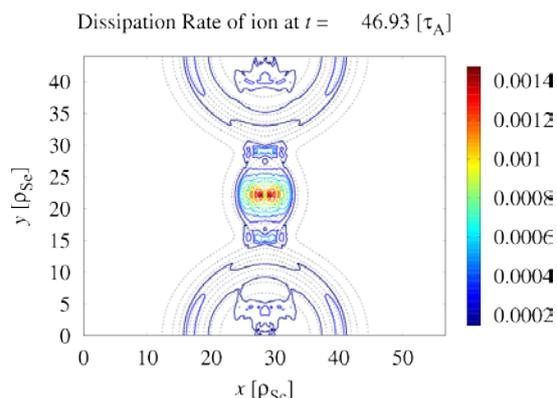


図 4 イオン加熱の空間分布。

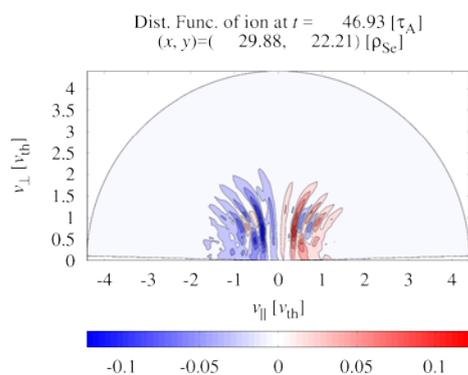


図 5 イオンの速度分布関数の構造。

磁気リコネクションを通じた電子とイオンの加熱の総量を調べると、イオンの加熱はベータ値が高いほど顕著になり、 $\beta \sim 1$ の時、イオンは電子と同程度加熱されることが明らかになった。

また、上記の基礎的な位相混合加熱機構の実証に加えて、この位相混合加熱は磁気リコネクションによって生成される磁場構造に大きく影響を受けることが分かった。図 4 でみられるような 2 次的な磁気島構造 (プラズモイド) およびその運動によって加熱が再度引き起こされることが明らかになったのである。多くのプラズマ環境において、磁気リコネクション時に乱流的な電磁場の乱れが存在するため、上記の知見から、現実にはより効率的に磁気リコネクションを通して

プラズマのエネルギーが熱に変換されていることが示唆される。

マイクロテアリング不安定性のメカニズム

テアリング不安定な磁場に加えてプラズマの圧力に勾配がある場合、マイクロテアリング不安定性と呼ばれる不安定性が存在することが知られている。核融合プラズマ実験において、マイクロテアリング不安定性に起因すると思われる電磁的なゆらぎが観測されているが、マイクロテアリング不安定性の不安定化機構は詳細に理解されているとは言えない。

我々は、核融合プラズマ特有のトロイダル状の磁場形状などの効果を排したスラブモデルにおいて、電子圧力勾配の効果を含む拡張した磁気リコネクションの運動論モデルを構築した。

低ベータプラズマに対しては、運動論方程式を簡略化することにより理論的な解析が可能となる。研究協力者とともに、低ベータプラズマにおける電子の運動を解析的に取り扱うことのできるモデルを導出し、線形安定性解析を行うことによって不安定性の分類・不安定領域の同定を行った。また、理論解析と運動論シミュレーションの結果を比較することにより、理論の妥当性の検証を行った。解析結果から、i) マイクロテアリング不安定性は衝突性の不安定性であり無衝突の極限では安定であること、ii) 無衝突の極限では静電的な電子温度勾配駆動型不安定性がリコネクションを駆動することを明らかにした。

並行してマイクロテアリング不安定性によって駆動される乱流の予備的な非線形運動論シミュレーションを実施した。圧力勾配は温度勾配と密度勾配の成分を持つが、電子・イオンそれぞれの温度勾配・密度勾配の項を入れたシミュレーションを行うことによって、電子のエネルギー輸送を増加させる微視的乱流の駆動には電子の温度勾配が重要な役割を果たしているという知見が得られた。

まとめと今後の展望

本研究では、プラズマの圧力勾配が存在しない通常の磁気リコネクションプロセスにおいて、新たな位相混合によるプラズマ加熱機構を明らかにした。一方、圧力勾配がある場合の磁気リコネクションに対して、低ベータプラズマにおける理論モデルを導出し、線形安定性解析を行うことによって、マイクロテアリング不安定性の不安定化機構を明らかにした。マイクロテアリング不安定性による乱流の予備的なシミュレーションを実施することはできたものの、乱流などのメソスケール構造が存在する場合の磁気リコネクションについて包括的な理解にまでは至っていない。我々は、引き続き乱流が存在する場合における磁気リコネクションのエネル

ギー変換機構の研究を進めている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① A. Zocco, N. F. Loureiro, D. Dickinson, R. Numata, C. M. Roach, "*Kinetic microtearing modes and reconnecting modes in strongly magnetized slab plasmas*," *Plasma Phys. Control. Fusion* **57**, 065008 (2015). [査読有]
DOI: [10.1088/0741-3335/57/6/065008](https://doi.org/10.1088/0741-3335/57/6/065008)
- ② R. Numata, N. F. Loureiro, "*Ion and electron heating during magnetic reconnection in weakly collisional plasmas*," *J. Plasma Phys.* **81**, 305810201 (2015). [査読有]
DOI: [10.1017/S002237781400107X](https://doi.org/10.1017/S002237781400107X)
- ③ S. Kobayashi, B. N. Rogers, and R. Numata, "*Gyrokinetic simulations of collisionless reconnection in turbulent non-uniform plasmas*," *Phys. Plasmas* **21**, 040704 (2014). [査読有]
DOI: [10.1063/1.4873703](https://doi.org/10.1063/1.4873703)
- ④ R. Numata, N. F. Loureiro, "*Electron and ion heating during magnetic reconnection in weakly collisional plasmas*," *JPS Conf. Proc* **1**, 015044 (2014). [査読有]
DOI: [10.7566/JPSCP.1.015044](https://doi.org/10.7566/JPSCP.1.015044)
- ⑤ 沼田 龍介, 「磁気リコネクションにおけるプラズマの熱力学特性」日本物理学会誌, **68** 98-102 (2013). [査読有]
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009594079>

[学会発表] (計9件)

- ① 沼田 龍介, 「磁化プラズマにおける磁気リコネクションの運動論シミュレーション」MHD Workshop, 2015年12月16~17日(核融合科学研究所, 岐阜県土岐市). [招待講演]
- ② R. Numata, N. F. Loureiro, "*Energy partition in kinetic turbulent reconnection*," 42nd EPS Conf. on Plasma Phys., 2015年6月22~26日(Lisbon, Portugal).
- ③ 沼田 龍介, N. F. Loureiro, 「弱衝突プラズマ中の磁気リコネクションにおけるイオン・電子加熱」日本物理学会 第70回年次大会, 2015年3月21~24日(早稲田大学, 東京新宿区).
- ④ R. Numata, N. F. Loureiro, "*Ion and electron heating during magnetic reconnection in weakly collisional plasmas*," 41st EPS Conf. on Plasma Phys., 2014年3月3~5日(Berlin, Germany).
- ⑤ 沼田 龍介, 「テアリング不安定性のジャ

イロ運動論シミュレーション」磁気リコネクションと太陽プラズマ研究会, 2014年3月3~5日(京都大学東京オフィス, 東京品川区). [招待講演]

- ⑥ R. Numata, N. F. Loureiro, "*Electron and ion heating during magnetic reconnection in weakly collisional plasmas*," 2013 US-Japan Workshop on Advanced Control and Confinement Improvement of Innovative Compact Troidal Configurations, 2013年9月24~26日(神戸国際会議場, 兵庫県神戸市).
- ⑦ 沼田 龍介, "*Thermodynamic properties of plasmas in magnetic reconnection*," 第19回数値トカマク研究会, 2013年8月29~30日(京都大学桂キャンパスローム記念館, 京都府京都市). [招待講演]
- ⑧ R. Numata, N. F. Loureiro, "*Electron and ion heating during magnetic reconnection in weakly collisional plasmas*," 第12回アジア・太平洋物理会議, 2013年7月14~19日(幕張メッセ国際会議場, 千葉県千葉市).
- ⑨ R. Numata, N. F. Loureiro, "*Nonlinear gyrokinetic simulations of tearing instability*," 54th Annual Meeting of APS Div. of Plasma Phys., 2012年10月29日~11月2日(Providence, USA).

[その他]

ホームページ等
<http://rnumata.org>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

沼田 龍介 (NUMATA, Ryusuke)

兵庫県立大学・大学院シミュレーション学
研究科・准教授

研究者番号: 30615787