

平成30年6月15日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05369

研究課題名(和文)粘性抵抗性磁気流体力学に基づく天体プラズマシミュレーション

研究課題名(英文)Astrophysical Plasma Simulations based on Dissipative Magnetohydrodynamics

研究代表者

簗島 敬 (MINOSHIMA, Takashi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・研究員

研究者番号：00514811

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：磁気流体力学(MHD)は天体プラズマ活動現象の研究に広く用いられる。本研究では、現実の天体プラズマ環境を考慮して、電気抵抗・粘性・熱伝導を加えた散逸性MHDを天体プラズマシミュレーションのための新たなパラダイムとして提案する。天体プラズマの重要なエネルギー解放過程である磁気リコネクションの散逸性MHDシミュレーションを実施し、電気抵抗のみならず粘性や熱伝導が衝突系のリコネクションに本質的な役割を果たすことを明らかにした。さらに、運動論プラズマの第一原理シミュレーションから、リコネクションに伴って実効的な粘性の発生を確認し、無衝突系のリコネクションにおいても重要となっている可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Magnetohydrodynamics (MHD) is a powerful mean to describe astrophysical plasma activities. This research aims to propose the dissipative MHD as a new paradigm for realistic astrophysical plasma simulations. We conduct dissipative MHD simulations of magnetic reconnection that is a fundamental energy-release mechanism in astrophysical plasma. The simulation reveals that the viscosity and the thermal conduction, as well as the electric resistivity, play an fundamental role for collisional reconnection. We further conduct a first-principle simulation of magnetic reconnection in kinetic plasma. We find a significant rise of an effective viscosity in association with reconnection, implying that it may be important also in collisionless reconnection.

研究分野：宇宙プラズマ物理学

キーワード：磁気リコネクション 磁気流体力学 プラズマ運動論 散逸

## 1. 研究開始当初の背景

天体プラズマの活動現象を理論的に解明する上で、磁気流体力学 (MHD) は広く用いられている強力な手法である。磁気流体力学方程式は極めて非線形なため、解析解を求めることはほぼ不可能であり、計算機を用いた数値シミュレーションによる研究が必要不可欠となっている。高温希薄な天体プラズマは衝突頻度が低いため、(磁気) レイノルズ数が高い。そのような状況を再現するために、粘性や電気抵抗を無視した理想磁気流体方程式が天体プラズマの MHD シミュレーションに対してまず用いられる。シミュレーション技術と計算機資源の発展によって、大規模・高解像度の理想 MHD シミュレーションが実施可能になり、乱流現象が捉えられるようになってきている。

そのような高解像度 MHD シミュレーションでは、理想磁気流体近似が不十分になりつつある。粘性や電気抵抗を無視しているため、乱流の散逸スケールが陽に決定されないからである。MHD の場合、粘性が決定する運動エネルギーの散逸スケールである渦層と、電気抵抗が決定する磁気エネルギーの散逸スケールである電流層が存在するが、これらが等しいとは限らず、その大小関係は系によって大きく異なる。理想 MHD シミュレーションでは、これら散逸スケールとその大小関係はシミュレーションコードの特性に依存して数値的に決まるため、散逸スケールが重要な役割を果たす現象に対して、妥当なモデルになっているとは限らない。

天体プラズマにおいて、散逸スケールが重要な役割を果たす現象の一つが、磁場のエネルギーを解放してプラズマのエネルギーに変換する磁気リコネクションである。リコネクションの MHD 研究では、磁場の散逸を陽に引き起こすために電気抵抗を加えた抵抗性 MHD 方程式がしばしば採用される。これは一方で粘性を考慮しないため、粘性と電気抵抗の比である磁気プラントル数が 1 よりずっと小さいことになる。ところが、現実の天体プラズマではむしろ磁気プラントル数は 1 よりずっと大きくなり得る。このことは、散逸スケールにおける運動エネルギーと磁気エネルギーの分配が、抵抗性 MHD と現実では逆になっていることを意味する。

磁気リコネクションはプラズマの階層現象の最たる例であり、粒子スケールから流体スケールまで、様々なスケールでの研究が進められている。これらのスケールのシミュレーションの比較研究から、抵抗性 MHD シミュレーションでは、粒子性を考慮した運動論シミュレーションで実現される速いリコネクションの再現が難しいことが知られている [1]。このことは、抵抗性 MHD は速いリコネクションに必要な物理過程を含んでおらず、近似として不十分である可能性を示唆している。

## 2. 研究の目的

このように、しばしば採用される理想 MHD や抵抗性 MHD は、天体プラズマの諸現象に対して十分なモデルとなっていない可能性がある。そこで本研究では、電気抵抗に加えて粘性や熱伝導も考慮した散逸性 MHD を天体プラズマシミュレーションのための新たなパラダイムとして提案した。前述のとおり、現実の天体プラズマ環境では粘性が電気抵抗より速く、熱伝導はさらに速い場合があるため、これまでの抵抗性 MHD 近似は必ずしも整合的でない。また、磁気リコネクションの粒子スケールでは、広いイオン散逸領域と狭い電子散逸領域が存在するが、イオンと電子がそれぞれマクロな運動量と電流を担っているので、この状況は運動エネルギーの散逸スケールが磁気エネルギーの散逸スケールより大きい、すなわち実効的な磁気プラントル数が 1 より大きいと見なすことができるかもしれない。

以上の考察を踏まえて、本研究ではまず散逸性 MHD による磁気リコネクションの非線形発展をシミュレーションし、これまで考慮されてこなかった磁気プラントル数とプラントル数 (粘性と熱伝導の比) に対する依存性を調べ、複数の異なる散逸スケールがリコネクションの発展に及ぼす影響を明らかにすることにした。さらに、粒子スケールとの類推から、これら散逸スケールの実体を明らかにするために、無衝突リコネクションの第一原理シミュレーションを実施して、実効的な散逸過程についても調べた。

## 3. 研究の方法

(1) 天体プラズマの MHD シミュレーションでは、高速流による様々な MHD 衝撃波を正しく捕獲すること、高レイノルズ数流れによる乱流や小スケール構造を高解像度で表現すること、磁場のソレノイダル条件の数値的な破れに対し堅牢であること、を満たすことが必要不可欠である。これらを同時に満たす新しい数値計算手法の開発を行った。

(2) 上記シミュレーションコードを用いて、磁気リコネクションの散逸性 MHD シミュレーションを実施し、磁気プラントル数とプラントル数依存性を調べた。特に、現実の天体プラズマ環境や粒子スケールとの類推から、磁気プラントル数が 1 より大きくプラントル数が 1 より小さい状況 (熱伝導 > 粘性 > 電気抵抗) に注目した。

(3) 粒子スケールの無衝突磁気リコネクションと流体スケールの散逸性 MHD シミュレーションの整合性・相違性からリコネクションの階層性を調べるために、無衝突リコネクションの第一原理シミュレーションを実施し、結果を流体方程式系と比較することで、実効的な散逸過程の担い手とその分布を調べた。

#### 4. 研究成果

(1) 現在、実用的に用いられている MHD シミュレーションコードの多くは、2 次精度有限体積法に基づいており、波動の解像度に難点がある。より高次の補間を用いれば、解像度を改善することができる。但し、多次元の有限体積法で 3 次以上の精度を達成するには、計算の煩雑さを伴う。そこで本研究では、物理量の非線形重み付き高次補間と、MHD コードの業界標準である HLLD 近似リーマン解法 [2] を組み合わせた有限差分法を提案した。

MHD シミュレーションの課題の一つは、磁場のソレノイダル条件の保証にある。特に、近似リーマン解法に基づく多次元 MHD シミュレーションコードは、これを数値的に満たさなくなる。この問題を回避するために、本研究では、数値的なソレノイダル条件を厳密に満たし、近似リーマン解法と整合的で、高次精度を維持する新たな手法を提案した。

図 1 には、新たなシミュレーションコードのテスト結果を示している。図 1(a), (b) はケルビン・ヘルムホルツ不安定をそれぞれ 2 次精度、4 次精度のスキームで解いたものである。2 次精度の計算では、各次元方向に倍の計算グリッド (計 4 倍) を用いているのにもかかわらず、4 次精度の計算の方が解像度の高い結果が得られた。4 次精度計算は、グリッド数が 4 倍の 2 次精度計算に対して計算時間が約 4 倍速く、効率的な性能向上が達成された。

図 1(c) は磁気リコネクションによるプラズマモード (大小様々な円形構造) の発生である。この問題では、近似リーマン解法の解像度や磁場のソレノイダル条件の処方が不十分だと、非物理的な解を導いてしまう場合があるが、本手法では解像度と堅牢性に優れた計算結果を得ることができた。これらの結果をまとめて、現在論文として投稿中である。

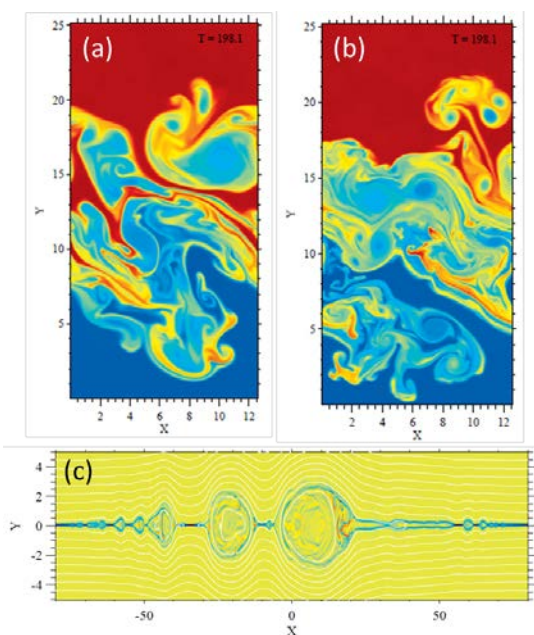


図 1 MHD シミュレーションのテスト

(2) 前述の MHD シミュレーションコードに、電気抵抗、粘性、磁力線方向の熱伝導を考慮した散逸性 MHD シミュレーションコードを用いて、磁気プラントル数とプラントル数を計算パラメータとした磁気リコネクションの非線形発展を調査した。

図 2(a) は磁気リコネクションに伴ってつなぎ変わった磁気フラックスの量の時間変化をプロットしたものである。黒破線で示した従来の抵抗性 MHD による計算結果に対し、実線で示した散逸性 MHD の計算では、磁気プラントル数が大きくなるにつれて (黒⇒青⇒赤) リコネクションの速度が増していることがわかる。

図 2(b), (c) はそれぞれ抵抗性 MHD, 散逸性 MHD の場合の密度分布のスナップショットである。抵抗性 MHD の場合、細長い電流層 ( $x=30-80$ ) が形成され、その内部で複数のプラズマモードが成長しているのに対して、抵抗性 MHD ではリコネクション領域が原点付近に局在化し、下流 ( $x$  正方向) に向かうジェットの流れが次第に広がっている。この構造は、速いリコネクションで観測される構造と類似している。この原因は、リコネクションによって生成された  $X$  方向の運動量が、粘性によって下流でジェット進行方向と垂直方向 ( $Y$  方向) に輸送されたからである。磁気プラントル数  $>1$  かつプラントル数  $<1$  のケースではこのような構造と速いリコネクションが観測されたことから、粘性や熱伝導といった散逸過程がリコネクションにとって本質的な役割を果たすことが明らかになった。本研究結果を論文としてまとめて、Physics of Plasmas 誌にて発表した。

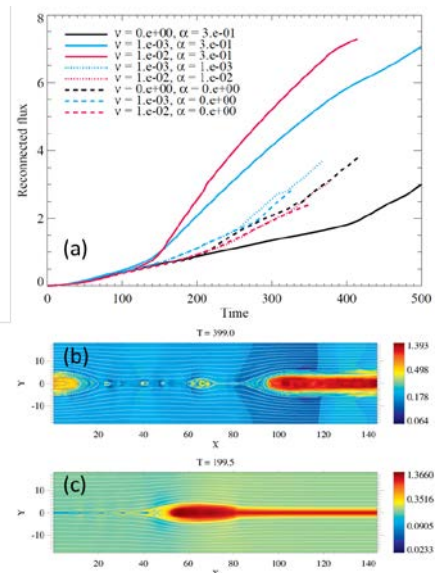


図 2 磁気リコネクションの散逸性 MHD シミュレーション

(3) 散逸性 MHD シミュレーションで扱った電気抵抗・粘性・熱伝導の起源を MHD の範疇で議論することはできない。また、このモデルが運動論モデルの良い近似となっているかも明らかではない。運動論モデルにおける速いリコネクションの散逸過程を調べ、散逸性 MHD との類推を議論するために、無衝突電子・陽電子プラズマの磁気リコネクションのブラソフシミュレーションを実行した。ブラソフシミュレーションには、共通の計算手法を用いる自己重力系の研究グループ（筑波大学）との共同研究で開発した 7 次精度セミラグランジュ法を用いた。

計算結果である電磁場、および速度分布関数を積分して得られるモーメント量を、それぞれ一般化されたオームの法則と運動方程式と比較することで、非 MHD 効果を実効的な散逸項として評価する。図 3(a) はオームの法則の散逸項の空間分布を示している。この時点で電流層は  $X=20$  まで伸びており、それに比べて散逸領域は  $0 < X < 10$  に局在化している。散逸項は一般化されたオームの法則の圧力項(図 3(b))が主として担っている。図 3(c, d) はそれぞれ、 $X$  方向の運動量に作用するローレンツ力と圧力非対角成分の勾配の空間分布である。リコネクションジェットにはこれら 2 つの力が主な加速項と減速項として作用している。図 3(d) から、ジェットの運動量は進行方向 ( $X$  方向) と垂直方向 ( $Y$  方向) に輸送されていることがわかる。これは実効的な粘性による運動量輸送とみなすことができる。

図 3(b, d) から、実効的な電気抵抗及び粘性を見積もった。両者はいずれも電流層の厚さで定義したレイノルズ数が 10 程度に相当し、電気抵抗は原点付近に局所化しているのに対して、粘性は下流広くに発生していた。この結果は散逸性 MHD モデルと整合的であり、リコネクションジェットのダイナミクスには、電気抵抗に加えて粘性も重要な役割を果たしていることが示唆された。本研究成果は現在論文投稿準備中である。

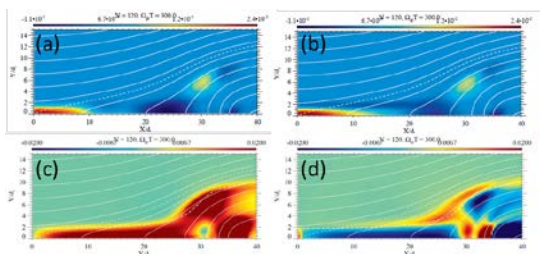


図 3 無衝突磁気リコネクションのブラソフシミュレーション

<引用文献>

[1]: Birn, J. et al. (2001), J. Geophys. Res. 106, 3715  
 [2]: Miyoshi, T., Kusano, K. (2005), J. Comput. Phys. 2008, 315

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

1. 田中賢、吉川耕司、籾島敬、吉田直紀、  
 “Multidimensional Vlasov-Poisson Simulations with High-order Monotonicity- and Positivity-preserving Schemes”,  
 Astrophys. J., 査読あり、849 (2017) 76-96  
 DOI: 10.3847/1538-4357/aa901f
2. 籾島敬、三好隆博、今田晋亮、  
 “Boosting magnetic reconnection by viscosity and thermal conduction”,  
 Physics of Plasmas, 査読あり、23 (2016) 072122  
 DOI: 10.1063/1.4959852

[学会発表] (計 9 件)

1. 籾島敬、「圧縮性 MHD の高精度数値計算手法」 MHD 研究会 (2017 年 12 月) (招待講演)
2. 籾島敬、「磁気リコネクションの散逸性 MHD シミュレーションと運動論シミュレーション」 宇治リコネクションワークショップ (2017 年 10 月)
3. 籾島敬、「散逸性磁気流体シミュレーション」 磁気流体プラズマで探る高エネルギー天体現象研究会 (2017 年 8 月)
4. 籾島敬、“Designing high-order finite difference scheme for magnetohydrodynamics”,  
 JpGU-AGU Joint Meeting 2017, (2017/5)
5. 籾島敬、「磁気リコネクションに対する拡散過程の影響」 日本流体力学会 年会 2016 (2016 年 9 月)
6. 籾島敬、“Boosting magnetic reconnection by viscosity and thermal conduction”, 18th International Congress on Plasma Physics ICPP 2016 (2016/6)
7. 籾島敬、「磁気リコネクションに対する拡散過程の影響」 日本地球惑星科学連合 2016 年連合大会 (2016 年 5 月)
8. 籾島敬、「高粘性プラズマにおける磁気リコネクション」 日本流体力学会 年会 2015 (2015 年 9 月)
9. 籾島敬、「高粘性プラズマにおける磁気リコネクション」 日本地球惑星科学連合 2015 年連合大会 (2015 年 5 月)

[その他]

1. プレスリリース  
 「ニュートリノや宇宙プラズマのシミュレーション精度が飛躍的に向上-ブラソフ方程式の高精度数値解法を開発」  
 (筑波大学発表)、2017 年 11 月
2. Blue Earth 153 号記事「粒子と流体。2 つの性質を持つプラズマの振る舞いを

第一原理と磁気流体力学で解く」、2018  
年3月、海洋研究開発機構

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蓑島 敬 (MINOSHIMA, Takashi)  
国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理  
科学・先端技術研究分野・研究員  
研究者番号：00514811

(2) 連携研究者

三好 隆博 (MIYOSHI, Takahiro)  
広島大学・理学研究科・助教  
研究者番号：60335700