

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月14日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21740399

研究課題名（和文） 超高解像度電磁流体シミュレーションによる乱流的磁気リコネクションの探求

研究課題名（英文） Research of turbulent magnetic reconnection using high-resolution MHD simulations

研究代表者

三好 隆博（MIYOSHI TAKAHIRO）

広島大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：60335700

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、高磁気レイノルズ数領域における電磁流体乱流的磁気リコネクションの発現可能性を、直接数値シミュレーションを用いて探究することにある。そのため、高精度電磁流体シミュレーションが長時間安定に可能となる新たな数値手法を開発した。新開発の数値手法を用い、世界最高クラスの磁気レイノルズ数に達する磁気リコネクションシミュレーションが実現できた。シミュレーションの結果、二次的プラズモイドのバウンス運動とリコネクション率の上昇の関連性が見いだされた。

研究成果の概要（英文）：

The objective of this research is to study turbulent magnetic reconnection at high magnetic Reynolds numbers by using a direct magnetohydrodynamic (MHD) simulation. Therefore, brand new numerical techniques for MHD had been developed in order to perform highly accurate MHD simulations for a long time. These numerical techniques have enabled us to explore resistive magnetic reconnection at one of the highest magnetic Reynolds numbers ever. As a result of the simulations, a correlation was found out between the rapid increase of the reconnection rate and the bounce motion of a secondary plasmoid.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数値電磁流体力学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：磁気リコネクション，電磁流体力学，テアリング不安定性，数値シミュレーション，衝撃波捕獲法

1. 研究開始当初の背景

磁気リコネクションは、実験室プラズマや宇宙天体プラズマにおける爆発現象の鍵となる極めて重要なエネルギー変換機構であ

る。磁気リコネクション物理の最難題の一つは、超高磁気レイノルズ数プラズマにおける速い磁気リコネクションの物理機構とそのトリガ機構を解明することにある。磁気リコ

ネクションのトリガ機構に関しては、大規模な磁場構造と密接な関係があると考えられているが、未だ統一的な見解はない。一方、速い磁気リコネクションの物理機構については、近年行われている多くのシミュレーション研究から、Hall 効果など運動論的效果が本質的に重要であるとの理解に至っている [e.g., Birn, et al., 2001]。しかし、これらのシミュレーションモデルでは、あらかじめ運動論的效果が顕著になる薄い電流層を初期磁場配位として設定している。したがって、磁気リコネクションがトリガされる前の厚い電流層（すなわち、磁場の大規模構造）からイオンスケールの薄い電流層へと微細化する過程が全く不明である。

2. 研究の目的

超高磁気レイノルズ数プラズマにおける磁気リコネクション現象に生ずるスケールギャップを埋めるため、例えばフラクタル電流フィラメントモデル [Tajima and Shibata, 1991; Materassi and Consolini, 2007] など、乱流的磁気リコネクションに関するアイデアがかつてより提案されてきた。しかし、数値シミュレーションによる実証的な研究は未だなされていない。最近になって、磁気リコネクション電流層における 2 次の不安定性を伴う非定常磁気リコネクションの電磁流体 (MHD) シミュレーションが実現されつつある [Loureiro, 2005; Lapenta, 2008] が、空間解像度が全く不十分であり乱流構造は観測され得ない。また同時に、速い磁気リコネクションの実現可能性も指摘されたが、これらのシミュレーションコードでは原理的に不連続構造を鋭くかつ安定に解像できず、速い磁気リコネクションに伴う様々な不連続構造を数値的に解くことができない。

そこで本研究では、高磁気レイノルズ数領域において MHD 乱流的磁気リコネクションが発現・発達する可能性を、直接数値シミュレーションを用いて正面から探求することを目的とする。従来研究の限界を超え未踏のパラメータ領域を探求するため、新たな高性能 MHD 数値解法を開発し、世界最高解像度の抵抗性磁気リコネクション MHD シミュレーションを実現する。

3. 研究の方法

本研究では、次世代の標準的 MHD 解法となり得る高性能 MHD 数値解法の開発と高磁気レイノルズ数磁気リコネクションの物理シミュレーション研究を同時に進行する。

MHD 数値解法は、不連続を鋭く解像できる HLLD 近似リーマン解法 [Miyoshi and Kusano, 2005] をベースに開発する。特に、高精度計算を長時間安定に継続できるよう、数値的な磁場発散の除去手法等について詳細に検討

を行う。

一方、磁気リコネクションの物理シミュレーションでは、極力シンプルな問題設定とし、シミュレーションの解像度を限界まで高めることに注力する。そこで本研究では、古くから詳細な研究がなされてきたハリス平衡配位における抵抗性テアリング不安定性について、高解像度 MHD シミュレーションを実行する。

4. 研究成果

(1) MHD 数値解法の開発

一般に、多次元に拡張した高解像 MHD 数値解法は、磁場のソレノイダル条件を満足するとは限らない。数値的な磁場発散が生ずると、非物理的な磁氣的力を受け、数値計算が破綻する。そこで本研究では、磁場のソレノイダル条件を計算機の丸め誤差程度に維持する Constrained-Transport (CT) 法に基づく、高安定な手法、HLL 型の flux-CT 法を新たに開発した。新開発の face-projection 法も含み、他の代表的な数値的磁場発散の除去手法を詳細に比較検討することによって、本手法のロバスト性と計算効率の高さを示した [Miyoshi and Kusano, 2011] (図 1)。

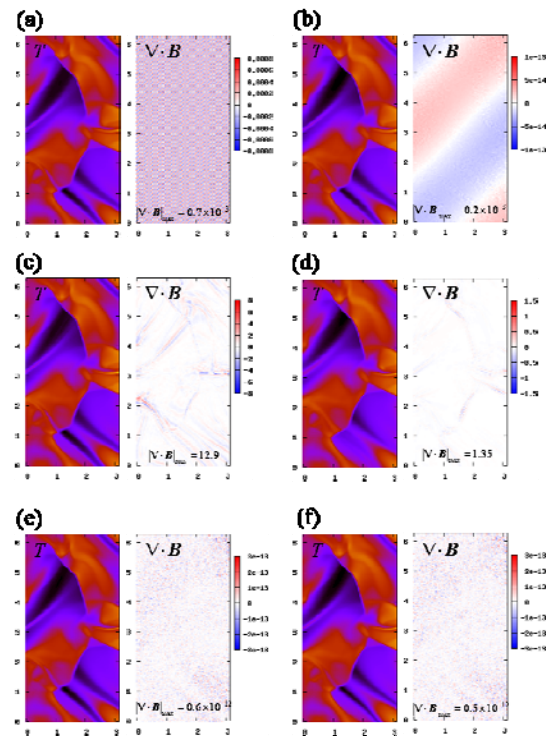


図 1: 2次元 MHD Orszag-Tang 渦問題の計算例。(a) projection 法、(b) face-projection 法、(c) 8-wave 法、(d) 9-wave 法、(e) flux-CT 法、(f) HLL-flux-CT 法。それぞれ、左図が温度、右図が $\nabla \cdot \mathbf{B}$ 。 $|\nabla \cdot \mathbf{B}|$ の最大値は、(a) 0.7×10^{-3} 、(b) 0.2×10^{-8} 、(c) 12.3、(d) 1.35、(e) 0.6×10^{-12} 、(f) 0.5×10^{-12} 。

また、MHD 数値解法に対する高次精度化のための変数補間法についても検討を行った。本研究では、高精度計算を安定に長時間できるように、新たな補間変数、近似的 MHD 特性変数を考案した。近似的特性変数による補間は、MHD 特性変数による補間と同等の安定性を示す一方で、計算効率が非常に高いことがわかった。

さらに、HLLD 近似リーマン解法の質量流束を修正することによって、極超音速多次元衝撃波における数値不安定性に対してロバストな MHD 数値解法を構築した。本解法については、さらなる詳細な調査が必要であるが、接触不連続や回転不連続を正確に解像しつつ、衝撃波数値的不安定性を抑制できる画期的な MHD 衝撃波捕獲法となる可能性がある。

(2) 高解像度シミュレーションの実行

地球シミュレータ 2 等のスーパーコンピュータを駆使し、(1)で開発した数値解法を用いて、ハリス平衡配位における抵抗性テアリング不安定性の高解像度長時間計算を行った。本研究で用いた磁気レイノルズ数は、世界最高クラスの 1.57×10^5 である。

運動エネルギー、リコネクション率、0-point の数 (プラズモイドの数) の時間変化を図 2 に示す。線形成長、Rutherford 領域を経て、Sweet-Parker (SP) 的な電流シートが一旦形成される。その後、SP 電流シートの自発的薄化が進行し、電流シートのアスペクト比が 10^2 程度以上を超えると、高い成長率を持つ二次的プラズモイドが生成された [Loureiro, 2005]。二次的プラズモイドの生

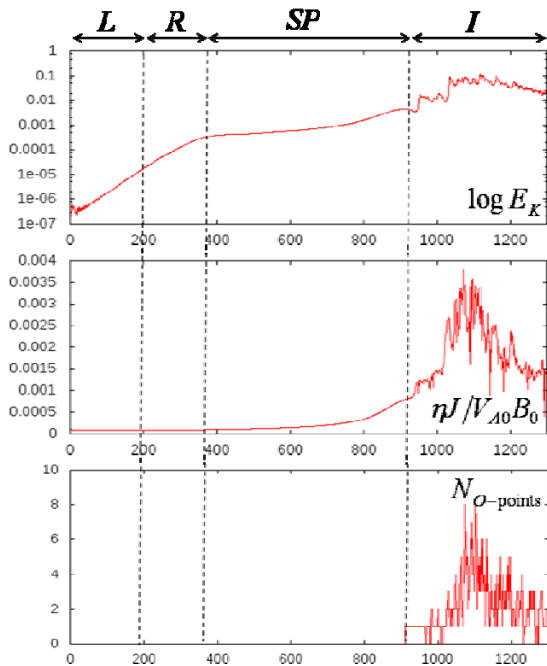


図 2: 上図から、運動エネルギー、リコネクション率、プラズモイド数の時間変化。

成・放出に伴い、短時間で二次的プラズモイド間の電流シートが再び引き伸ばされ、多数のプラズモイドが間欠的に生成・放出を繰り返す乱流的状态に達することが明らかになった。また同時に、リコネクション率も間欠的に上昇することが確認された。

多数生成されるプラズモイドの内、特に初期の移動速度が遅いプラズモイドは、プラズモイド放出までの間に、二次的電流シートの厚さに比べ極めて大規模に成長することができる。磁気リコネクション過程の詳細解析から、一部の大規模プラズモイドがバウンス運動を行い、リコネクション率の急上昇と関連していることが明らかになった。大規模プラズモイドは、進行方向の電流シートを圧縮し、結果として電流をプラズモイド先端に強く局在化させる。この電流が局在化した領域において、強い磁気リコネクションが生じ、大規模プラズモイドの進行方向を反転させると考えられる。同時に反対方向には超磁気音速のプラズマ流れが観測された。また、大規模プラズモイド放出による電流シートの薄化の促進もリコネクション率の上昇に関連していると予想され、今後さらなる詳細解析を行う。

また、二次的プラズモイド自体非常に複雑な構造を有している。特に、磁気リコネクションの上流側 (電流シートに垂直方向) にも、プラズモイドのダイナミクスの影響が観測される。そこで、プラズモイド単体の超高解像度 MHD シミュレーションを行った。その結果、プラズモイドに付随し磁気リコネクション上流側に延伸した新しい二つの遅進衝撃波を発見した [Zenitani and Miyoshi, 2011] (図 3)。その他にも、多彩な構造を観測、同定した。さらに、新たな不安定性も予想されており、極めて重要な研究課題である。今後も精密なシミュレーション研究を進める。

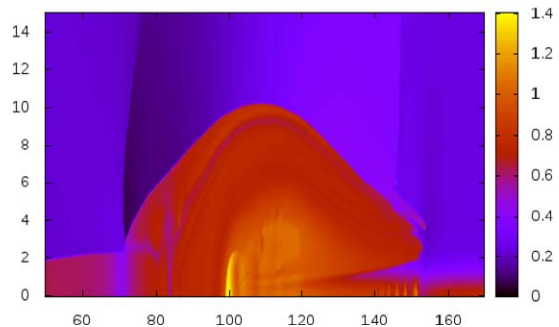


図 3: 発達したプラズモイドの微細構造。圧力の等高色。

本研究課題では、非常に高い解像度を持つ MHD シミュレーションを用いることによって、高磁気レイノルズ数磁気リコネクションの多様性や階層性を明らかにした。一方で、微

細構造の発現に伴い、運動論的效果は無視できなくなると予測できる。また、速い磁気リコネクション過程では、運動論的效果は重要である。そこで今後は、運動論的效果も含めた乱流的磁気リコネクションの高解像度シミュレーションモデルを構築し、研究を展開していくことが極めて重要である。

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 7 件)

1. T. Miyoshi, K. Kusano, A Comparative Study of Divergence-Cleaning Techniques for Multi-Dimensional MHD Schemes, Plasma and Fusion Research, 査読有, 6, 2401124, 2011
2. S. Zenitani, T. Miyoshi, Magnetohydrodynamic structure of a plasmoid in fast reconnection in low-beta plasmas, Physics of Plasmas, 査読有, 18, 022105, 2011
3. T. Umeda, T. Kimura, K. Togano, K. Fukazawa, Y. Matsumoto, T. Miyoshi, N. Terada, T. K. M. Nakamura, T. Ogino, Vlasov simulation of the interaction between the solar wind and a dielectric body, Physics of Plasmas, 査読有, 18, 012908, 2011
4. K. Fukazawa, T. Umeda, T. Miyoshi, N. Terada, Y. Matsumoto, T. Ogino, Performance measurement of magnetohydrodynamic code for space plasma on the various scalar-type supercomputer systems, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, 38, 2254-2259, 2010
5. T. Miyoshi, N. Terada, Y. Matsumoto, K. Fukazawa, T. Umeda, K. Kusano, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, 38, 2236-2242, 2010
6. Y. Matsumoto, N. Terada, T. Miyoshi, K. Fukazawa, T. Umeda, T. Ogino, K. Seki, Comparative study of global MHD simulations of the terrestrial magnetosphere with different numerical schemes, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, 38, 2229-2235, 2010
7. S. Tanaka, T. Umeda, Y. Matsumoto, T. Miyoshi, T. Ogino, Implementation of non-oscillatory and conservative scheme into magnetohydrodynamic equations, Earth, Planets and Space, 査読有, 61, 895-903, 2009

[学会発表] (計 34 件)

1. 三好隆博, 草野完也, 修正 HLLD 近似リーマン解法の開発, 日本物理学会第 67 回年

次大会, 2012 年 3 月 26 日, 関西学院大学(西宮市)

2. 三好隆博, 草野完也, HLLD 近似リーマン解法における衝撃波数値異常への処方, 日本天文学会 2012 年春季年会, 2012 年 3 月 22 日, 龍谷大学(京都市)
3. 三好隆博, HLLD 法による磁気流体シミュレーション, 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションワークショップ(招待講演), 2012 年 3 月 5 日, 千葉大学(千葉市)
4. T. Minoshima, S. Masuda, Y. Miyoshi, T. Miyoshi, K. Kusano, Energetic electron distribution in the solar flare, American Geophysical Union, Fall Meeting 2011, 2011 年 12 月 9 日, Moscone Convention Center (San Francisco, USA)
5. 三好隆博, 草野完也, HLLD 近似リーマン解法における粒子速度の選択について, 地球電磁気・地球惑星圏学会第 130 回講演会, 2011 年 11 月 3 日, 神戸大学(神戸市)
6. 三好隆博, Hall-MHD 方程式の陰的数値解法, 太陽地球惑星系科学シミュレーション・モデリング技法勉強会(招待講演), 2011 年 9 月 15 日, 九州大学(福岡市)
7. 三好隆博, HLL 型近似リーマン解法における数値的衝撃波不安定性とその回避, プラズマシミュレータシンポジウム 2011, 2011 年 9 月 13 日, 核融合科学研究所(土岐市)
8. T. Miyoshi, On numerical shock instabilities of Harten-Lax-van Leer (HLL)-type approximate Riemann solvers, 6th International Conference on Numerical Modeling of Space Plasma Flows (招待講演), 2011 年 6 月 16 日, Hotel Las Arenas Valencia (Valencia, Spain)
9. 三好隆博, 草野完也, ラグランジュ座標系における HLLD 近似リーマン解法, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 25 日, 幕張メッセ国際会議場(千葉市)
10. 簗島敬, 三好隆博, 草野完也, 高レイノルズ数磁気リコネクション下流域における高エネルギー粒子分布, 日本天文学会 2011 年春季年会, 2011 年 3 月 19 日, 筑波大学(つくば市)
11. 銭谷誠司, 三好隆博, 低ベータプラズマ中の磁気リコネクションの衝撃波構造, 日本天文学会 2011 年春季年会, 2011 年 3 月 18 日, 筑波大学(つくば市)
12. 三好隆博, 高解像度電磁流体シミュレーションによる磁気リコネクション研究, 名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「磁気リコネクション研究の現状と展望」(招待講演), 2011 年 3 月 21 日, 名古屋大学(名古屋市)
13. 三好隆博, MHD 近似リーマン解法の現状と課題, 名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「太陽地球惑星系科学シミュレーシ

ン技法勉強会」, 2011年3月1日, 九州大学 (福岡市)

14. T. Miyoshi, K. Kusano, Dynamics of secondary islands in collisional magnetic reconnection, American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, 2010年12月17日, Moscone Convention Center (San Francisco, USA)

15. T. Miyoshi, K. Kusano, A comparative study of divergence cleaning techniques for multi-dimensional MHD schemes, 20th International Toki Conference on The Next Twenty Years in Plasma and Fusion Science, 2010年12月8日, Ceratopia Toki (Toki)

16. T. Miyoshi, K. Kusano, Multiscale structures of resistive magnetic reconnection at high magnetic Reynolds numbers, COSPAR 2010, 38th Scientific Assembly of the Committee on Space Research, 2010年10月24日, Fair and Congress Center Bremen (Bremen, Germany)

17. D. Shiota, K. Kusano, T. Miyoshi, K. Shibata, MHD modeling for formation process of coronal mass ejections: Interaction between ejecting flux rope and ambient field, COSPAR 2010, 38th Scientific Assembly of the Committee on Space Research, 2010年10月23日, Fair and Congress Center Bremen (Bremen, Germany)

18. 三好隆博, 草野完也, Current sheet thinning in high Lundquist number plasmas, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2010年10月31日, 沖縄県市町村自治会館 (那覇市)

19. 三好隆博, ロバスト高解像度電磁流体解法の開発(2), 第4回シミュレーション科学シンポジウム, 2010年9月14日, 核融合科学研究所 (土岐市)

20. 梅田隆行, 松本洋介, 中村琢磨, 加藤雄人, 寺田直樹, 深沢圭一郎, 三好隆博, 杉山徹, 篠原育, 荻野竜樹, ジオスペースシミュレーションの展望, 日本地球惑星科学連合2010年大会, 2010年5月25日, 幕張メッセ (千葉市)

21. 三好隆博, 高解像度電磁流体シミュレーションの数値技法, 日本地球惑星科学連合2010年大会(招待講演), 2010年5月24日, 幕張メッセ (千葉市)

22. T. Miyoshi, High-resolution simulation of resistive MHD reconnection, Physics and Modeling of Multi-scale Interaction in Plasmas, 2010年3月9日, 京都大学 (京都市)

23. T. Miyoshi, K. Kusano, High-resolution MHD simulation of magnetic reconnection, American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, 2009年12月17日, Moscone Convention

Center (San Francisco, USA)

24. K. Fukazawa, T. Umeda, T. Miyoshi, N. Terada, Y. Matsumoto, T. Ogino, Performance measurement of electromagnetic fluid codes for space plasma on the various scalar type supercomputer systems, 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas 2009, 2009年10月8日, Congress Center of Pavilhão Atlântico (Lisbon, Portugal)

25. T. Miyoshi, N. Terada, Y. Matsumoto, K. Fukazawa, T. Umeda, K. Kusano, The HLLD approximate Riemann solver for magnetospheric simulations, 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas 2009, 2009年10月8日, Congress Center of Pavilhão Atlântico (Lisbon, Portugal)

26. T. Miyoshi, K. Kusano, Very high resolution MHD simulation of magnetic reconnection at high magnetic Reynolds numbers, 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas 2009, 2009年10月8日, Congress Center of Pavilhão Atlântico (Lisbon, Portugal)

27. N. Terada, Y. Matsumoto, T. Miyoshi, K. Fukazawa, T. Umeda, MHD and multi-fluid simulations of a planetary magnetosphere based on a semi-discrete central scheme, 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas 2009, 2009年10月6日, Congress Center of Pavilhão Atlântico (Lisbon, Portugal)

28. Y. Matsumoto, N. Terada, T. Miyoshi, K. Fukazawa, T. Umeda, K. Seki, Comparative study of global MHD simulations of the terrestrial magnetosphere with different modern numerical schemes, 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas 2009, 2009年10月6日, Congress Center of Pavilhão Atlântico (Lisbon, Portugal)

29. T. Umeda, T. Kimura, Y. Matsumoto, T. Ogino, T. Miyoshi, K. Fukazawa, N. Terada, T. K. M. Nakamura, Vlasov simulation on the interaction between solar wind and dielectric body, 21st International Conference on Numerical Simulation of Plasmas 2009, 2009年10月6日, Congress Center of Pavilhão Atlântico (Lisbon, Portugal)

30. 三好隆博, 草野完也, MHD スキームに対する変数補間について, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 2009年9月30日, 金沢大学 (金沢市)

31. 寺田直樹，陣英克，松本洋介，梅田隆行，深沢圭一郎，三好隆博，加藤雄人，鈴木朋憲，三好勉信，藤原均，品川裕之，寺田香織，村田健史，吉川顕正，三好由純，中田裕之，数値計算プロジェクトの将来像と惑星電磁圏の理解の今後，第126回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会（招待講演），2009年9月27日，金沢大学（金沢市）
32. 三好隆博，ロバスト高解像度電磁流体解法の開発，第3回シミュレーション科学シンポジウム，2009年9月18日，核融合科学研究所（土岐市）
33. 三好隆博，宇宙プラズマ流体計算法の課題と展望，太陽地球惑星系科学シミュレーション技法勉強会（招待講演），2009年8月5日，九州大学西新プラザ（福岡市）
34. 塩田大幸，草野完也，三好隆博，柴田一成，コロナ質量放出の形成過程における大規模磁場との相互作用，日本地球惑星科学連合2009年大会，2009年5月18日，幕張メッセ国際会議場（千葉市）

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三好 隆博 (MIYOSHI TAKAHIRO)

広島大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：60335700