



小特集 俯瞰と展望：磁気リコネクション研究の最前線

5. リコネクション研究の課題と将来

5. Problems and Future of Reconnection Research

5.1 シミュレーション研究の課題と将来

5.1 Problems and Future of Simulation Studies

宇佐見 俊介, 銭谷 誠司¹⁾

USAMI Shunsuke and ZENITANI Seiji¹⁾

核融合科学研究所, ¹⁾国立天文台

(原稿受付: 2013年11月7日)

今日, 計算機シミュレーションが磁気リコネクション研究になしてきた貢献は誰もが認めるところである. その一方で, その巨視的な発展から微視的な機構まで含めた全体像の理解にはまだまだ不十分と言ってよい. 数あるシミュレーションモデルはそれぞれ本質的ともいえる課題を抱えており, 全体像へのアプローチに必要な大規模かつ第一原理に基づいたシミュレーションを行うことができないためである. そこで, ここではグローバルな第一原理計算モデルをよく模擬できると注目されている多階層シミュレーションの一例を採り上げ, また, シミュレーション研究の今後について述べる.

Keywords:

simulation, magnetohydrodynamics (MHD), particle-in-cell (PIC), hybrid, Vlasov, first-principle, multi-hierarchy

5.1.1 はじめに

計算機シミュレーションは磁気リコネクション研究にとって非常に有用な手法である. これまでに, 磁気流体 (MHD), ハイブリッド, 粒子コードなど様々な手法のシミュレーションコードによる研究がなされ, 多くの成果が生み出されている. その一方で, これら「伝統的な」シミュレーションは, いかなるミクロな効果によって速いリコネクションを引き起こす電気抵抗が発生するのか? リコネクションのグローバルな構造はどう発展するのか? さらに, この2つは互いにどう関わっているのか? といった全体像を明らかにするまでには至っていない. ここでは, いくつかのシミュレーションモデルを採り上げて, その成果とそれぞれのモデルが持つ本質的ともいえる課題について述べたい.

5.1.2 シミュレーションの現状と課題

まずMHDモデルを採り上げる. MHDモデルはメモリや時間といった計算コストが低いため, 地球磁気圏全体などの大規模な系をターゲットとしたシミュレーションが行われている[1]. しかし, MHDモデルにおける磁気リコネクションの時間発展は, 散逸をもたらす電気抵抗の形に大きく左右されるが, 本来ミクロな効果によって生み出される電気抵抗をMHDモデルは求めることができないため, 何らかの仮定を導入して電気抵抗が与えられたものとして

解いている[1-3]. しかし, 今日に至るまで, 現実をよく再現する電気抵抗のクロージャー関係は知られていない. これはリコネクション物理における未解決の最重要課題だといえるだろう.

MHD系にHall項を追加したHall MHDモデルにも同じことがいえる. Hall項は速いリコネクション率を維持するために重要だとされている[4]が, エネルギー散逸には関与しないうえ, 電子流体の磁気凍結を破ることはできない. Hall MHD系では, ホイッスラー波が分散性をもつなど, 数値的な取り扱いも難しくなる.

では, 電子を流体法, イオンを particle-in-cell (PIC) 法のような粒子法で扱うハイブリッドモデルはどうであろうか. 後述するフル粒子モデルに比べて計算コストは低いが, 電子流体の磁気凍結を破る電子の非ジャイロ運動[5, 6]を扱えないことから, MHDモデルの電気抵抗と同じ問題を抱えている.

それでは, (電子, イオンとも粒子で扱う) 粒子モデルを考えよう. 粒子モデルは, 第一原理に基づいて電気抵抗を自己無撞着に求めることができるため, リコネクションの微視的構造を調べることに適している. しかし, 粒子モデルは計算コストが非常に高く, 広い領域を計算することは難しい. 近年, Daughton 等は 10^{12} 個の粒子を用いた大規模な粒子シミュレーションを行い, 電子スケールの運動論不安定によって, 磁力線が乱流的に発展することを報告し

Corresponding author's address: National Institute for Fusion Science, Toki, Gifu 509-5292, Japan

Corresponding author's e-mail: usami.shunsuke@nifs.ac.jp

ている (図1 参照) [7]. しかし, このシミュレーションの計算領域は, 地球磁気圏に当てはめると 1 万 km 程度のボックスに過ぎない. 仮に 100 万 km サイズである地球磁気圏全体を, Debye 長をグリッド幅として粒子モデルで扱おうとすると, 必要なメモリサイズは 10^{27} B 以上という極めて膨大な値となる [8].

最後に, 粒子モデルと同じく第一原理手法である Vlasov モデルを考える. Vlasov モデルは, Lagrange 粒子の運動の代わりに位相空間密度という Euler 量を扱うため, 領域分割を用いた超並列計算に適しており, 次世代の計算手法だと考えられている. しかし, 要求される計算量が粒子モデルよりも大きいことや, ジャイロ運動の安定性やエネルギー保存といった数値解法の課題も多く残されている. 最近, 初期結果が出始めたところであるが [9, 10], 本格的な研究に使われるようになるのはもう少し先であろう.

ここまでシミュレーション分野が直面している課題について述べたが, 磁気リコネクションを引き起こすミクロな非線形過程の解明に大きな課題がある現状では, リコネクション研究に第一原理シミュレーションを用いることは必須である. その一方, これからは磁気リコネクションのグローバルな構造発展をみるため, 非常に大規模な 3 次元シミュレーションを行っていく必要性が増していくであろう. すなわち, 系全体に及ぶような大規模 3 次元の第一原理に基づいた計算を行うことが, シミュレーションによる磁気リコネクション研究の理想といえる.

5.1.3 多階層シミュレーション

しかし, 前節で述べたように第一原理計算は負荷が非常に高いという壁があり, 理想とするシミュレーションの実現にはコンピュータ技術の途方もない進歩を待たねばならない. そこで, その理想的シミュレーションの前駆段階として, グローバルな領域を現在レベルのスパコンで扱うことができ, かつ第一原理シミュレーションの結果をよい精度で模擬できる多階層もしくはマルチスケールシミュレーションが期待されている. 多階層モデルは, 世界で多くの研究者が注目して取り組み始めているホットなトピックである [11]. 一口に多階層モデルといっても, その種類は多岐多様にわたり, その全てをここで紹介することはできない. 本節では, 宇佐見等が取り組んでいる, MHD 手法と PIC 手法で解く領域 (階層) を連結する多階層モデルについて述べる.

図2 は磁気リコネクションの上流方向についての階層構造を模式的に示したものである [12]. リコネクション点付近では, 粒子が非ジャイロ的なメアンダリング運動をしている. リコネクション点からイオンメアンダリング運動の振幅程度までの領域は, 電流層の幅や磁場の勾配スケールが粒子のミクロ運動のサイズと同程度であり, 運動論的效果が重要な役割をする (運動論領域). 一方, リコネクション点から離れるにしたがって, 現象は空間スケールの大きいゆっくりとした振る舞いへ移行していく. 運動論領域の外側では, 二流体として扱えるようになる (中間領域). さらに, リコネクション点からイオン慣性長より離れた場所

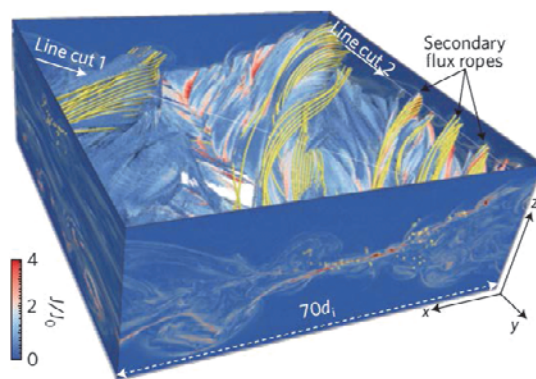


図1 大規模粒子シミュレーションの結果. 電子の運動論的な物理により, 乱流的に生成された 2 次的なねじれた磁力線構造が見えた ([7]より引用).

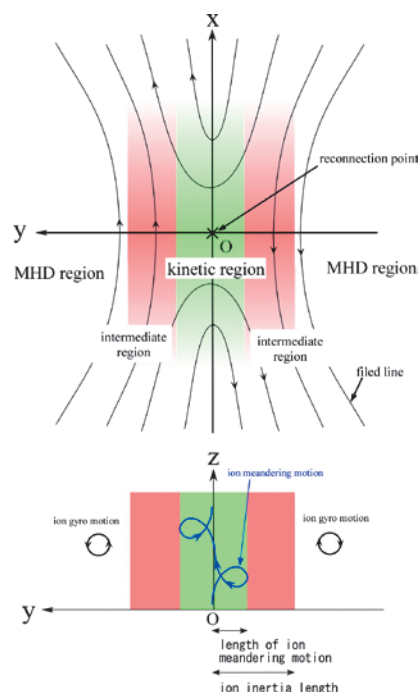


図2 上流方向についての磁気リコネクション階層構造を模式的に示した図. リコネクション点からの距離によって, 運動論領域, 中間領域, MHD 領域に分けられる.

では, プラズマの振る舞いは一流体的な描像で記述できる (MHD 領域).

この階層構造の特徴を利用して, 宇佐見等は領域によって計算手法を変える領域分割法 (境界連結法とも呼ばれる [13]) に基づいた多階層シミュレーションモデルを開発した. シミュレーション領域は図3のように上流方向について分割されている (MHD 領域: $19.875 < |y|/(c/\omega_{ce})| < 57.375$, インターフェイス領域: $17.875 < |y|/(c/\omega_{ce})| < 19.875$, PIC 領域: $|y|/(c/\omega_{ce})| < 17.875$, ここで ω_{ce} は電子サイクロトロン振動数, c は光速). 磁気中性面およびその近傍は PIC 手法を用いて解き, この領域を PIC 領域と呼ぶ. PIC 領域は図2で示された運動論領域と中間領域をカバーする. 一方, PIC 領域の外側は MHD 手法によって解き, この領域を MHD 領域と名付ける. 磁気リコネクションを発生させる電気抵抗は, PIC 領域における運動論的效果から自己無撞

着に生成されると仮定しているので、MHD 領域には理想 MHD 方程式を用いる。2つの領域の間には、有限幅のインターフェイス領域を設け、ここでPIC, MHD の情報を交換する。この領域の物理はMHD手法, PIC手法の両方を用いて解く。紙面が限られている関係上、連結手法の詳細と検証結果については、文献[14-16]を参照されたい。

多階層モデルの結果として、図3の左図に磁力線、右図に流体速度ベクトルが描かれている[16]。わかりやすくするため、流体速度ベクトルについては、下流境界近くのインターフェイス領域周辺を拡大表示している。プラズマおよび磁場がMHD領域からインターフェイス領域を経てPIC領域へスムーズに伝わり、PIC領域の中央で磁気リコネクションが駆動されていることがわかる。

多階層モデルの次の段階として、磁気リコネクション下流方向の階層間連結がある。しかし、磁気リコネクションの発生にともない様々な加熱・加速が起こり、下流では粒子速度分布がMaxwell分布から大きくずれているなど[17]、下流方向の階層連結には解決すべき物理的・技術的課題が残っている。また、リコネクション点は一般には時間変動するので、PIC領域をダイナミックに動かす必要があるであろう。

5.1.4 まとめと展望

計算機シミュレーションは磁気リコネクション研究に非常に有用なツールであり、世界中で様々な手法のモデルが用いられ、多くの成果を上げている。その一方、マクロな発展からミクロの機構まで含めたりリコネクションの全体像の理解にはまだまだ不十分である。これまでの「伝統的な」手法には本質的ともいえる課題があり、現在および近い将来のスパコンを持ってしても、グローバルな規模で第一原理に基づいたシミュレーションを行うことができないためである。

そこで、グローバルな第一原理シミュレーションをよい近似で模擬できると期待されている多階層シミュレーションの一例を挙げた。この多階層モデルでは領域分割法を採用し、磁気中性面近傍のミクロな物理が重要な領域は第一原理計算であるPIC法を、遠方の領域はMHD法を用いて解き、インターフェイス領域でPICとMHDの情報をやりとりする。現在、MHD領域からPIC領域へプラズマを流入させてPIC領域で磁気リコネクションを駆動する多階層シミュレーションに成功している。

多階層モデルが進展しつつあるとはいえ、やはり、理想である第一原理計算で系全体の領域を扱うことをめざすべきであろう。その際に懸念されるのは、シミュレーションの大規模化によるデータの増大である。2000年初頭に性能世界一であったスパコン（地球シミュレータ）の演算速度は40 TFlops、メモリサイズは10 TBであった。それから約10年後の2013年6月現在、世界最高性能レベルのスパコンの多くは1 PB以上のメモリを持つに至っている[18]。今後スパコン性能が向上し続けていくことは間違いない。それにより、シミュレーション規模をますます大きくすることができ、出力されるデータは近い将来ペタバイト、エク

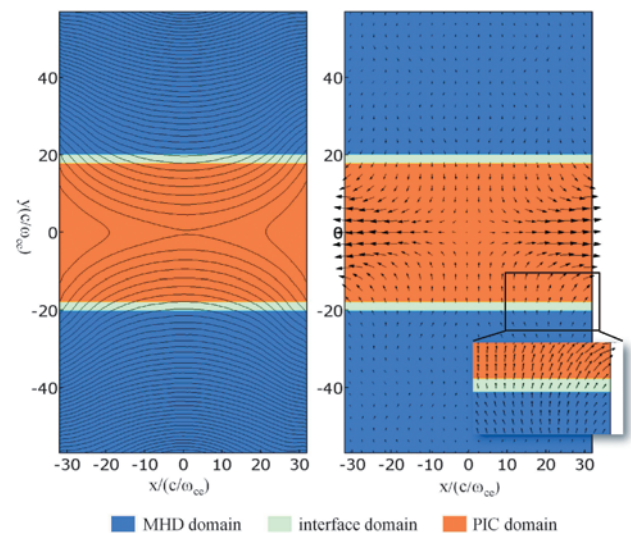


図3 磁気リコネクションの多階層シミュレーションの例。左図は磁力線、右図は流体速度ベクトルを表している。MHD領域からPIC領域へプラズマを流入させることにより、PIC領域中央で磁気リコネクションが駆動された。

サバイトへと増加していくのは明らかである。このような膨大なシミュレーションデータから何かを導き出すためには、解析手法やデータの解釈を含めて、広い意味での「理論」の発展・改良が不可欠になるであろう。また、際だって大きなスケールのシミュレーションが行われると、そのこと自体の話題性・インパクトから、ともすればその結果は無批判に科学的事実であると受け入れられてしまうこともある。しかし、多くのシミュレーション結果は、それぞれのモデルの仮定から導かれた結果であり、現実世界ではこうした仮定で扱えない想定外の要素が働いている可能性もある。そのためにも、シミュレーション研究で予言された物理過程を観測・実験で実証することは非常に重要である。

参考文献

- [1] T. Tanaka *et al.*, J. Geophys. Res. **115**, A05220 (2010).
- [2] M. Ugai, Phys. Fluids **B4**, 2953 (1992).
- [3] M.M. Kuznetsova *et al.*, J. Geophys. Res. **112**, A10210 (2007).
- [4] J. Birn *et al.*, J. Geophys. Res. **106**, 3715 (2001).
- [5] R. Horiuchi and T. Sato, Phys. Plasmas **1**, 3587 (1994).
- [6] M. Hesse *et al.*, Phys. Plasmas **6**, 1781 (1999).
- [7] W. Daughton *et al.*, Nature Phys. **7**, 539 (2011).
- [8] R. Horiuchi *et al.*, *private communication* (2013).
- [9] H. Schmitz and R. Grauer, Phys. Plasmas **13**, 092309 (2006).
- [10] T. Umeda *et al.*, Comput. Phys. Comm. **180**, 365 (2009).
- [11] 草野完他 他：プラズマ・核融合学会誌 **85**, 577 (2009).
- [12] A. Ishizawa and R. Horiuchi, Phys. Rev. Lett. **95**, 045003 (2005).
- [13] T. Sugiyama and K. Kusano, J. Comput. Phys. **227**, 1340 (2007).
- [14] S. Usami *et al.*, Plasma Fusion Res. **4**, 049 (2009).
- [15] S. Usami *et al.*, Comm. Comput. Phys. **11**, 1006 (2012).
- [16] S. Usami *et al.*, Phys. Plasmas **20**, 061208 (2013).
- [17] J. Drake *et al.*, J. Geophys. Res. **114**, A05111 (2009).
- [18] <http://www.top500.org/>