



小特集 連結階層モデルによって見えてきたプラズマシミュレーションの新たな局面

2. プラズマにおける連結階層シミュレーション

2.2 磁気リコネクション研究をめざした多階層シミュレーションモデルの開発

宇佐見 俊介¹⁾, 大谷 寛明^{1,2)}, 堀内 利得^{1,2)}, 田 光江³⁾

¹⁾核融合科学研究所シミュレーション科学研究部, ²⁾総合研究大学院大学物理科学研究科,

³⁾情報通信研究機構電磁波計測研究センター

(原稿受付: 2009年5月25日)

階層横断現象である磁気リコネクション過程を理解するため、マクロな物理とミクロな物理を同時に、かつ自己無撞着に解く多階層シミュレーションモデルの開発を行っている。このモデルでは、ミクロ階層は粒子シミュレーション、マクロ階層は磁気流体シミュレーションを用いる。本節では、多階層モデルの開発経緯、連結の手法等について説明し、これまでに得られた多階層シミュレーションの結果を紹介する。

Keywords:

magnetic reconnection, multi-hierarchy, MHD, particle-in-cell, domain decomposition method

2.2.1 はじめに

異なる向きの磁力線が繋ぎ変わる磁気リコネクションは、宇宙や実験室プラズマで共通して発生する普遍的な基礎プラズマ過程の一つであり、例えば、太陽表面で発生する爆発現象である太陽フレア[1,2]や、地球磁気圏で起こるサブストーム[3]では、この磁気リコネクションが大きな役割を果たしていると考えられている。さらに近年、磁気リコネクションは階層横断現象として注目されるようになってきた。前述した太陽フレアや地球磁気圏サブストームでは、磁力線トポロジーの巨視的变化や、大規模なプラズマ輸送が起こるマクロスケールの現象が発生する。このような現象が起こるためには、磁気リコネクションが発生する点(磁力線が繋ぎ変わる点、リコネクション点)の近傍に、ミクロスケールの物理にコントロールされた電気抵抗の存在が必要となる。マクロスケールの磁気流体(MHD)シミュレーション[4,5]では、電気抵抗を人為的に仮定することにより磁気リコネクション現象を再現している。しかし、電気抵抗はMHDのフレームでは物理的に決定することはできない。一方、粒子シミュレーションでは、電気抵抗を自己無撞着に求めることが可能だが[6-8]、計算メモリの制限上、マクロスケールのダイナミクスを完全に取り込むことはできない。さらに、リコネクション点近傍におけるミクロスケールの挙動は、外部駆動源などのマクロスケールの物理に強く依存することが知られている[9]。

このようなマクロスケールの物理とミクロスケールの物理が絡み合った複雑な現象である磁気リコネクションを理解するため、我々は、MARIS (MAGnetic Reconnection Interlocked Simulation) プロジェクトを立ち上げ、マクロ階

層とミクロ階層を同時にかつ自己無撞着に解く、多階層シミュレーションモデルの構築に取り組んでいる[10-12]。この多階層モデルでは、マクロ階層はMHDシミュレーション手法を用いて、ミクロ階層はparticle-in-cell (PIC) 法による粒子シミュレーション手法[13-15]を用いて、それぞれの物理を記述する。

以下では、我々の多階層シミュレーションモデルについて詳しく述べ、モデル検証として行ったシミュレーション結果を紹介する。

2.2.2 多階層シミュレーションモデル

磁気リコネクションの階層構造の大きな特色として、領域によって現象の特徴的な時空間スケールが異なるという点がある。リコネクション点近傍では、現象の時空間スケールはミクロな物理のスケールと同程度である。例えば、電流層の幅や磁場の勾配の長さは、粒子のジャイロ半径程度となる[16]。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。リコネクション点から十分離れた領域では、プラズマの振る舞いは一流体的描像で記述できる。磁気リコネクションのこの特色を利用して、我々の多階層シミュレーションモデルでは、領域によってアルゴリズムを変える領域分割法(境界連結法とも呼ばれる)を採用する[11]。

問題は、運動論的に扱う必要がある領域と一流体として扱うことができる領域を物理的に正しく決定することである。これまで我々のグループは、主に開放系の粒子シミュレーションを用いて駆動型磁気リコネクションの研究を進めており、多階層モデル構築にとって重要となる知見を得

2.2 Development of Multi-Hierarchy Simulation Model for Holistic Understanding of Magnetic Reconnection Phenomena

USAMI Shunsuke, OHTANI Hiroaki, HORIUCHI Ritoku and DEN Mitsue

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

ている。最近、磁気リコネクションを引き起こすために必要な磁場凍結の破れは、磁気中性面付近のメアンダリング運動に起因する圧力テンソル項であることが石澤および堀内[17]によって明らかにされた。このことは、無衝突磁気リコネクション起動に本質的な役割を果たす物理機構が何かという論争に、決着をつける成果と言えよう。文献[17]では、メアンダリング振幅によって特徴づけられるイオン散逸領域内では、粒子速度分布がマクスウェル分布から大きくずれ、プラズマは運動論的に扱わなければならないことが示されている。一方、磁気中性面からイオンのメアンダリング振幅の数倍離れた上流では磁場凍結が満たされており、プラズマの振る舞いはMHDのスキームで記述できることが示された。

この知見により、磁気リコネクションの多階層シミュレーションモデルを開発するにあたって、まず、上流境界においてPIC-MHD連結を行うことにした。本節では、この上流方向を連結した多階層モデルへの発展経緯を述べたい。図1に、領域の分割方法を模式的に示した。マイクロ階層の領域は、磁気中性面およびその近傍である。この領域を前述したように粒子(PIC)アルゴリズムを用いて解くので、この領域を「PIC領域」と名付ける。一方、マクロ階層は、磁気中性面から(少なくとも)イオンメアンダリング振幅の数倍離れた、マイクロ階層の外側である。この領域はMHDアルゴリズムによって表されるので、この領域を「MHD領域」と呼ぶことにする。リコネクションを引き起こすトリガとなる電気抵抗は、PIC領域における運動論的効果から自己無撞着に作られる[6-8, 18]と仮定している。MHD領域の基礎方程式は理想MHD方程式を用いる。図1中にある「インターフェイス領域」は2つの領域をつなぐための領域であるが、これについては、次節に譲る。

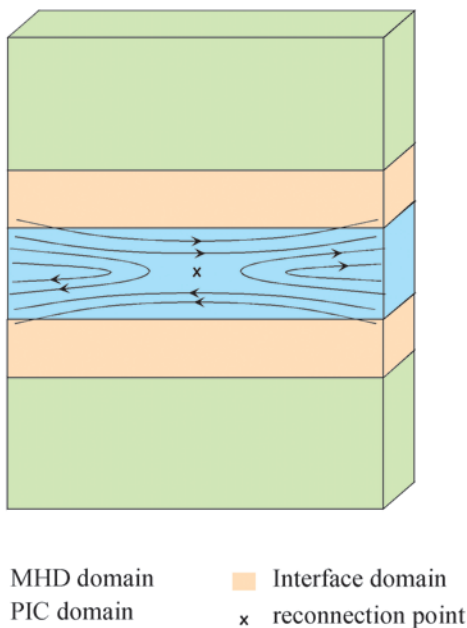


図1 磁気リコネクションの多階層シミュレーション。上流境界においてPIC-MHD連結を行う場合の領域分割を模式的に表している。

2.2.3 連結手法：空間

アルゴリズムが異なる、PIC領域とMHD領域をなめらかに接続するためには、インターフェイス領域の位置と結合アルゴリズムが重要となる。インターフェイス領域の物理は、PICモデル、MHDモデルの両モデルを用いて求められる。そのため、この領域では、適切な近似の範囲で両モデルが成立する必要がある。ここでは、PICモデル内の粒子の磁場凍結条件を満たす領域に適切な幅を持ったインターフェイス領域を設定し、外側のMHD領域に接続するものとする。

インターフェイス領域におけるマクロな物理量の値は、PICシミュレーション結果の統計操作により求められた値とMHDモデルから得られた値の内挿値として与えられる[11, 12, 19]。一方、インターフェイス領域でPICシミュレーションを実行するにはマイクロな物理量を決定する必要がある。ここでは、粒子速度分布はマクスウェル分布を満たすと仮定し、上記の手法から得られたマクロな物理量から粒子1つ1つの情報を与える。このような手法をHand-shaking法と呼び[11, 19]、PIC領域とMHD領域がスムーズに繋がることを期待される。

これまで1次元アルヴェン波の伝播等の比較的簡単な場合に関してその有効性が確認されてきているが[11, 19]、磁気リコネクションのような激しい動的現象においてそうした方法が有効に働くかどうかを調べることは今後の課題として残されている。ここでは磁気リコネクションへの適用をめざした試みとして、電磁場、流体速度、圧力(熱速度)、密度などの磁気リコネクションの物理を支配する全てのマクロな物理量をHand-shaking法で連結した多階層モデルの場合について解説する。

2.2.4 連結手法：時間

多階層シミュレーションの時間の進め方について述べる。MHDモデル側とPICモデル側では互いにタイムステップ幅が異なる、マルチタイムステップ法を採用している。図2に多階層シミュレーションの時間の流れを示した。図中の大きなタイムステップはMHDモデル、小さなタイムステップはPICモデルの時間ステップである。下記に、時刻 t_1 から t_2 まで、MHDモデルとPICモデルがどのように情報のやりとりをして、多階層シミュレーションの時間が進められるかを示す[11]。

1. 時刻 t_1 において、MHD領域、PIC領域の物理量が求められている。

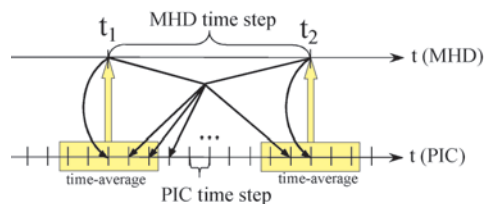


図2 多階層シミュレーションの時間の進め方。

2. 時刻 t_1 の MHD 情報を PIC モデルに送る.
3. PIC モデルを時刻 t_1 の少し先まで進める.
4. 時刻 t_1 周辺の PIC 領域の情報を時間平均して, MHD モデルに送る.
5. MHD モデルを 1 ステップ計算し, 時刻 t_2 まで進める.
6. 3 で計算された時刻 t_1 の少し先の PIC 情報を破棄し, PIC モデルの時刻を t_1 まで戻す.
7. 時刻 t_1 と t_2 の MHD 情報を PIC モデルに送る.
8. PIC モデルの計算を進め, 時刻 t_2 まで進める. 時刻 $t_1 < t < t_2$ のとき, PIC モデルが参照する MHD 情報は, 時刻 t_1 と t_2 の MHD 情報の内挿値とする.

以上によって, 2つの階層の同時性を保ちながらシミュレーションを進める.

2.2.5 モデル検証

ここまで述べてきた多階層シミュレーションモデルを磁気リコネクションに適用することが目的であるが, その前に, MHD 領域と PIC 領域が物理的に正しく連結できているか検証しなければならない. まず, 杉山および草野[19]のモデルにおいても実施された線形アルヴェン波のシミュレーションを行った[11]. その結果, 我々のモデルにおいてもアルヴェン波がスムーズに伝播することが確かめられた.

次に, MHD 領域から PIC 領域へのプラズマ流入シミュレーションを実施した. 図3にシミュレーションボックスの模式図を示す. シミュレーション自体は $8c/\omega_{ce} \times 176c/\omega_{ce} \times 1c/\omega_{ce}$ の3次元であるが, まずはシンプルな連結を検証するため, 階層接続は y 方向のみに依存する1次元的と仮定する(ここで ω_{ce} は電子サイクロトロン振動数, c は光速である). 中央に PIC 領域をおき ($32 < y/(c/\omega_{ce}) < 144$), 両側が MHD 領域 ($0 < y/(c/\omega_{ce}) < 24, 152 < y/(c/\omega_{ce}) < 176$), その間にインターフェイス領域が挿入される形である ($24 < y/(c/\omega_{ce}) < 32, 144 < y/(c/\omega_{ce}) < 152$). PIC 領域, MHD 領域は, それぞれ, x, z 方向が周期境界条件, y 方向が自由境界条件であり, また, 一様な外部磁場が x 方向にかかっている. 左右のシミュレーション領域全体の境界に z 方向の電場を人工的にかけることによって, 内向きのプラズマの流れを発生させる.

図4に様々な時刻における, プラズマ質量密度の増分

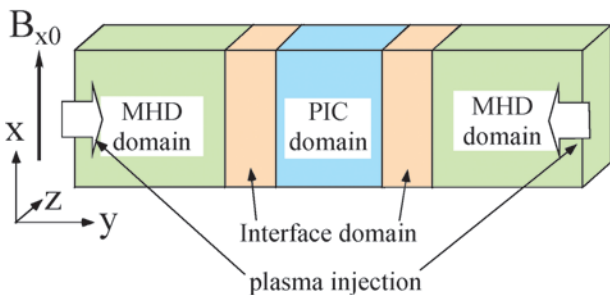


図3 シミュレーションボックスの模式図. MHD領域の左端と右端からプラズマが流入する.

$(\rho - \rho_0)/\rho_0$ のプロファイルを表す (ρ_0 は初期の質量密度である). z 方向を平均した (x, y) 平面を表示している. まず, 初期において MHD 領域の密度が増大し, 時間とともにインターフェイス領域を経て PIC 領域へとプラズマが流入し, PIC 領域の密度が増大していく様子が見られる.

2.2.6 MARIS プロジェクトのまとめと今後の展望

磁気リコネクションを階層横断現象として理解するため, MARIS プロジェクトとして開発を進めている多階層シミュレーションモデルについて紹介した. このモデルでは, シミュレーション領域を分割して領域によってアルゴリズムを変える領域分割法を採用している. 即ち, 磁気中

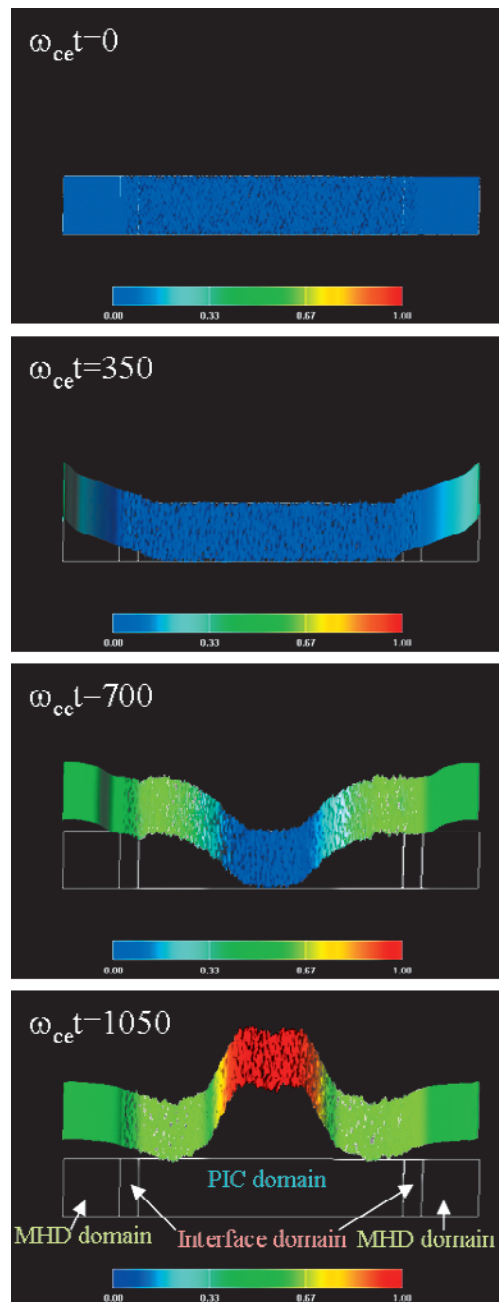


図4 様々な時刻における, プラズマ質量密度の増分 $(\rho - \rho_0)/\rho_0$ のプロファイル. 縦軸は x 方向, 横軸は y 方向であり, ρ_0 は初期の質量密度, ω_{ce} は電子サイクロトロン振動数を示す.

性面近傍の領域はマイクロ階層として粒子 (PIC) シミュレーションを、遠方の領域はマクロ階層としてMHDシミュレーションを用いている。

我々の多階層モデルにおいて、マイクロ階層とマクロ階層がどのように接続され、同時性を保ちながらシミュレーションが進められるか解説した。これまでに、アルヴェン波の伝播、プラズマの流入 (密度伝播) に関するシミュレーションを実行し、我々の開発したモデルがこれらの物理過程を適切に記述できていることを確認した。現在、磁気リコネクションの多階層シミュレーションの第一段階として、上記のプラズマ流入が存在するモデルを改良し、PIC領域の中心で磁場の向きが逆転する配位での磁気リコネクション現象のシミュレーションに取り組んでいる。

次の段階として、磁気リコネクション下流方向における多階層モデルを検討する必要がある。開放系粒子シミュレーションによると、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、粒子分布はマクスウェル分布から大きくずれる[20]。この運動論効果が重要となるマイクロ領域はリコネクション点から遠く離れた下流域まで続いており、粒子シミュレーションの下流境界においても、プラズマを一流体として扱うことができなくなっている。下流方向の階層連結は解決すべき多くの課題が存在しており、二流体モデルのような中間領域を挿入するなど、さらなる多階層への拡大も視野に入れてモデルを改良する必要がある。

また、リコネクション点はしばしば時間とともに移動するので、MHD領域、PIC領域、インターフェイス領域の位置も系のダイナミカルな挙動に従って動かす必要がある。シミュレーションを実行しながら、ミクロスケールの物理計算が必要な領域を検出し、自動的に領域を切り替える手法の開発を行う予定である。

我々の多階層モデルを実際の現象に適用するにあたっての当面の対象として、太陽風と相互作用している地球磁気圏尾部でのリコネクション現象のシミュレーションを検討している。地球磁気圏の系全体スケール 10^9 m に対して、ミクロスケール (イオンメアングリング振幅のスケール) は 10^5 m であり、スケール比が 10^4 程度と比較的小さい。そのため、連結の技術的な面から見ても、領域分割型の多階層モデルを用いるのに適した対象といえよう^{注)}。

最初に述べたように、磁気リコネクションは宇宙から実験室まで、様々な場所で見られる現象である。トラス状

の磁場閉じ込め装置トカマクでも磁気リコネクションが発生し、磁場閉じ込め配位を壊すことが知られている。多階層モデルを用いるに当たっては、基礎・天体プラズマの範囲にとどまらず、核融合プラズマのような様々な分野にも目を向けて、研究の進展に貢献していきたいと考えている。

参考文献

- [1] S. Masuda, T. Kosugi, H. Hara, S. Tsuneta and Y. Ogawara, *Nature* **371**, 495 (1994).
- [2] K. Kusano, T. Yokoyama, T. Maeshiro and T. Sakurai, *Adv. Space. Res.* **32**, 1931 (2003).
- [3] A. Nishida, *Geomagnetic Diagnostics of the Magnetosphere* (Springer-Verlag, New York, 1978).
- [4] R. Horiuchi and T. Sato, *Phys. Fluids B1*, 581 (1989).
- [5] M. Den, T. Kuwabara, T. Ogawa *et al.*, *J. Plasma Phys.* **72**, 837 (2006).
- [6] T. Moritaka, R. Horiuchi, H. Ohtani and A. Ishizawa, *J. Plasma Phys.* **72**, 961 (2006).
- [7] T. Moritaka, R. Horiuchi and H. Ohtani, *Phys. Plasmas* **14**, 102109 (2007).
- [8] T. Moritaka and R. Horiuchi, *Phys. Plasmas* **15**, 092114 (2008).
- [9] W. Pei, R. Horiuchi and T. Sato, *Phys. Plasmas* **8**, 3251 (2001).
- [10] R. Horiuchi, H. Ohtani and A. Ishizawa, *J. Plasma Phys.* **72**, 953 (2006).
- [11] S. Usami, H. Ohtani, R. Horiuchi and M. Den, *Comm. Comput. Phys.* **4**, 537 (2008).
- [12] R. Horiuchi, S. Usami, H. Ohtani and M. Den, *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, accepted (2009).
- [13] R. Horiuchi, H. Ohtani and A. Ishizawa, *Comput. Phys. Commn.* **164**, 17 (2004).
- [14] H. Ohtani, R. Horiuchi and A. Ishizawa, *J. Plasma Phys.* **72**, 929 (2006).
- [15] H. Ohtani and R. Horiuchi, *Plasma Fusion Res.* **4**, 024 (2009).
- [16] R. Horiuchi and T. Sato, *Phys. Plasmas* **1**, 3579 (1994).
- [17] A. Ishizawa and R. Horiuchi, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 045003 (2005).
- [18] K. Nishimura, R. Horiuchi and T. Sato, *Phys. Plasmas* **6**, 3459 (1999).
- [19] T. Sugiyama and K. Kusano, *J. Comput. Phys.* **227**, 1340 (2007).
- [20] M. Hesse, *Phys. Plasmas* **13**, 122107 (2006).

注) 一方、太陽フレアでは、系全体のスケールが 10^7 m、ミクロスケールが 10^{-1} m のようにスケール比が 10^8 程度と非常に大きく、階層の連結にさらなる技術的な工夫が必要になると考えられる。