

磁気リコネクションの運動論シミュレーション：微視的過程から巨視的過程への遷移

課題責任者

榊島 敬
発センター

海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 数理科学・先端技術研究開

著者

榊島 敬^{*1}

^{*1}海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 数理科学・先端技術研究開発センター

キーワード：太陽地球環境，運動論シミュレーション，磁気リコネクション

1. 初めに

太陽から惑星間空間を経て地球磁気圏へと至る宇宙空間は、太陽活動によってダイナミックに変動し、その影響は地球環境にまで及ぶ。太陽フレアや磁気嵐などの磁気リコネクションによって駆動される現象は、この変動の典型的な例である。これらの現象による地磁気変動は、現代社会のインフラに悪影響を及ぼす可能性がある。また、これに伴って発生する高エネルギー粒子は、人工衛星の故障や船外活動中の宇宙飛行士の被ばくなどの問題を引き起こすだけでなく、地球大気に振り込んで窒素酸化物を生成し、触媒反応を介して成層圏のオゾンを破壊する可能性もある。この研究の目的は、太陽地球環境変動の主要な原因である磁気リコネクションの物理過程を理解することである。

磁気リコネクションによる巨視的なエネルギー変換や構造変化は、磁気流体力学近似によって記述できる。しかし、磁気流体モデルでは磁気リコネクションにおいて重要な拡散過程をセルフコンシステントに扱うことが出来ず、第一原理運動論モデルが必要となる。微視的な運動論モデルでは高速なリコネクションが発生することが知られているが、それが巨視的スケールまでどのように維持されるのかは明確ではない[1]。この問題を解決するためには、運動論モデルを使用して磁気流体近似が成立するほどの大規模かつ長時間計算を実施することが直接的な方法だが、計算資源の観点から非現実的である。そこで、本研究では、運動論モデルにアドホックな緩和項を導入し、この項のオン・オフを制御することで、微視的過程から巨視的な過程への遷移を模擬し、巨視的スケールにおける高速リコネクションの解明を目指す。

2. 計算モデル

解くべき方程式は粒子位相空間分布 $f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t)$ に対するボルツマン方程式と、電磁場 $\mathbf{E}(\mathbf{x}, t)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ に対するマクスウェル方程式である。今回は特に、電子及び陽電子に対し、速度空間 3 次元、実空間 2 次元のボルツマン方程式を考える。

$$\begin{aligned} \partial f / \partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla_x f + (q/m)(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla_v f \\ = -\nu(f - f_0) \end{aligned}$$

ここで、 q, m はそれぞれ電荷素量と質量である。右辺に含まれる ν は緩和周波数、 f_0 は局所的な熱平衡分布である。緩和周波数が系の特徴的な周波数より十分速い場合、ボルツマン方程式を速度空間で平均操作すれば、磁気流体方程式に帰着する。数値計算では、系の発展途中に緩和周波数をオンにすることで、微視的過程から巨視的過程への遷移を人工的に引き起こす。

ボルツマン方程式を数値的に計算する手法として、位相空間に直接計算グリッドを配置するブラソフ法を採用する[2]。方程式を実空間移流部（左辺第二項）、速度空間移流部（左辺第三項）、および緩和部（右辺）に分離し、前二者には高精度保存型セミラグランジュ法を用いる[3]。並列化には、実空間のみを MPI 領域分割し、OpenMP スレッド並列と組み合わせ合わせたハイブリッド並列を用いる。

3. 計算結果

図 1 は、時刻 5000（プラズマ周波数で規格化）および 8000 における面に垂直な電流のスナップショットを示している。左から、緩和が無い場合、計算開始時から緩和がある場合、途中（時刻 5500）から緩和がある場合の結果である。緩和が無い場合(d)とある場合(e)を比較すると、緩和によって、 $y \sim 0, x \sim 0 - 2000$ に形成されていた電流層が局所化していることが分かる。また、局所化した電流層から斜め上方に伸びる電流構造も観察される。途中から緩和がある場合を見ると、緩和したあとの構造(f)は、計算開始時から緩和がある場合の構造(e)と大きな差は見られない。この観測結果のみから、運動論効果が系の発展に寄与したかどうかを判断することは難しそうに思われる。

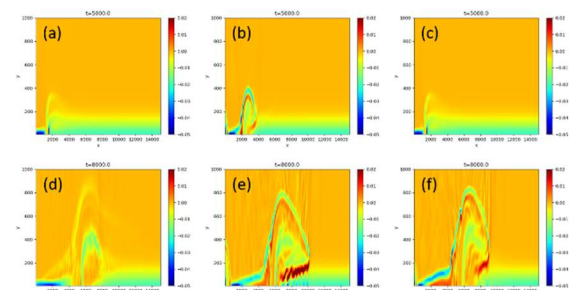


図 1: 面に垂直な電流の空間分布

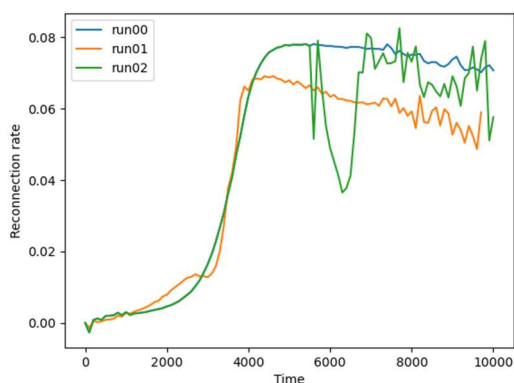


図 2: リコネクション電場の時間発展

図 2 は、リコネクションを駆動する拡散領域の電場の時間発展を示しており、この値が大きいほどリコネクションが速く進行している。青、橙、緑色はそれぞれ、緩和が無い場合、計算開始時から緩和がある場合、途中から緩和がある場合の結果である。緩和がある場合は、無い場合に比べて電場の強度が 80%程度となっている。一方、途中から緩和がある場合は、時刻 7000 付近で緩和が無い場合と同等の電場強度にまで回復している。つまり、緩和した後も、以前の速いリコネクションが（運動論効果が失われたにもかかわらず）維持されていることを示唆している。

図 3 は、途中から緩和がある場合の時刻 8000 における電場と電流の積を示しており、正の値を示すことで磁気エネルギーが変換されていることを表している。左側(a)は対流電場の寄与による理想磁気流体成分、右側(b)はそれ以外の電場の寄与による非理想磁気流体成分である。非理想磁気流体成分は、磁気流体近似では電気抵抗と電流の 2 乗の積としてモデル化されるものである。この結果、非理想磁気流体成分は $x = 500, y = 0$ 付近に非常に局在化しており、一方、理想磁気流体成分による磁気エネルギー変換はそこから斜め上方に広く発生していることがわかる。これは、局所異常電気抵抗モデルを磁気流体方程式に仮定した場合に生じるペチェック型の高速磁気リコネクションと類似した構造である[4]。この計算では、異常電気抵抗に相当するものが自発的に局所化することによって、このような磁気流体的構造が形成され、微視的過程から巨視的過程への遷移が起こったと考えられる。

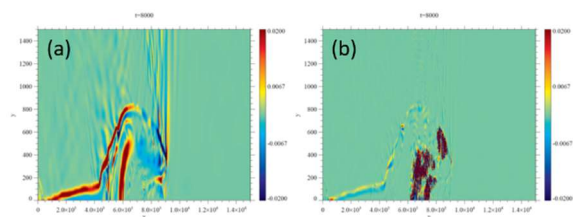


図 3: 途中から緩和がある場合の計算における磁気エネルギー変化率

4. まとめと今後

人工的な緩和項を含んだ第一原理運動論モデルを用いて、磁気リコネクションにおける微視的過程から巨視的過程への遷移を調査した。緩和がある場合、電流層は自発的に局所化し、高速磁気リコネクションの磁気流体モデルであるペチェック型リコネクションに類似した構造が観察された。運動論効果による速いリコネクションが達成された後に緩和が発生した場合、速いリコネクションを維持したままこの構造に遷移した。太陽フレアや磁気嵐などの現象では、巨視的スケールで高速リコネクションが維持されており、本計算結果はその理解に寄与する可能性がある。

この計算では、電子-陽電子系を扱ったため、運動論モデルは緩和により磁気流体方程式へと帰着した。しかし、現実的な電子-イオン系では Hall 磁気流体方程式へと帰着する。今後は、電子-イオン系の大規模な数値計算を実施し、巨視的スケールのリコネクションにおける Hall 効果の役割を調査する予定である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20K04056 の助成を受けて実施されました。

文献

- [1] J. Birn et al., “Geospace Environment Modeling (GEM) Magnetic Reconnection Challenge”, *Journal of Geophysical Research* 106, 3715-3719 (2001).
- [2] T. Minoshima, Y. Matsumoto, and T. Amano, “A finite volume formulation of the multi-moment advection scheme for Vlasov simulations of magnetized plasma”, *Computer Physics Communications* 187, 137-151 (2015).
- [3] S. Tanaka, K. Yoshikawa, T. Minoshima, and N. Yoshida, “Multidimensional Vlasov-Poisson Simulations with High-order Monotonicity- and Positivity-preserving Schemes”, *Astrophysical Journal* 849, 76 (2017).
- [4] S. Zenitani, and T. Miyoshi, “Magnetohydrodynamic structure of a plasmoid in fast reconnection in low-beta plasmas”, *Physics of Plasmas* 18, 022105 (2011).