

開放境界を用いた磁気リコネクションの大規模粒子

シミュレーション

藤本 桂三 (国立天文台)

1940年代後半に太陽フレアにおける粒子加速機構を説明するモデルとして磁気リコネクション過程が提唱された。それ以来、磁気リコネクションは天体プラズマや、惑星磁気圏プラズマ、実験室プラズマなど、さまざまな磁化プラズマ中で磁場を散逸させ爆発的に粒子を加速・加熱させることができるプロセスとして注目をあびてきた。しかし、実際の現象における磁気リコネクション過程の役割は必ずしも明らかにはなっていない。これは、対象とする現象の時間・空間スケールに対して、磁気リコネクション領域におけるマイクロ過程（例えば、磁気散逸過程）のスケールが極めて小さく、かつ、プラズマの粒子性が重要となるため、両者を統一的に扱うことが非常に困難であることに起因する。我々は、この難問に挑戦するため、従来の粒子法 (Particle-In-Cell (PIC) 法) に適合細分化格子 (Adaptive Mesh Refinement (AMR)) を適用した新しい電磁粒子コード (AMR-PIC コード) を開発し、効率的なプラズマ粒子計算手法を確立してきた。その結果、磁気 X 線近傍の電子スケールの構造はかなり明らかになってきた[1]。一方、電子スケールと流体スケールをつなぐイオンスケールの構造は、計算機資源の制約から、ほとんど解明されていない。

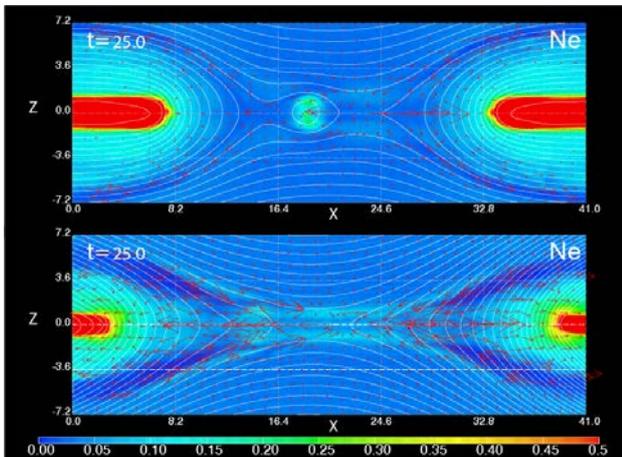


図1：磁気リコネクション過程における電流層の様子。カラーは電子数密度、白線は磁力線、矢印は電子フローベクトルをそれぞれ示す。上図が周期境界、下図が開放境界の場合である。

以上のような背景から、本研究では、より長時間かつ大規模な粒子計算を実現するために、開放境界を用いた AMR-PIC コードの開発をおこなった。開放型粒子コードの計算スキームは未だに確立されているとは言えないため、今年度は、まず2次元コードの開発を進めた。開放境界条件として、 $\partial f(\mathbf{x}, \mathbf{v})/\partial \mathbf{n} = 0$ 、および、 $\partial \mathbf{J}/\partial \mathbf{n} = 0$ を仮定した。ここで、 $f(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ はプラズマ分布関数、 \mathbf{J} は電流密度、 \mathbf{n} は境界垂直方向の単位ベクトルである。図1に、周期境界を用いた従来の結果 (上図) と新しく開発した開放型 AMR-PIC コードによる結果 (下図) を示す。周期境界を用いた場合は、下流域にプラズマと磁気フラックスが蓄積するためアウトフローが妨げられるのに対し、開放境界を用いた場合は、それらが自由に計算領域から流出するため強い電子流が維持されていることがわかる。同様に、リコネクション効率も、周期境界の場合には短時間で減衰してしまうのに対し、開放境界の下では長時間にわたって高効率で維持されることが示された (図2)。これらのことから、開放型 AMR-PIC コードが磁気リコネクションの長時間シミュレーションを実現するうえで有効であることが実証された。今後は、より大規模な計算を実施することによって、電子スケールと流体スケールをつなぐ、言わば、メソスケールの物理過程を解明する。

参考文献

- [1] K. Fujimoto, R. D. Sydora, Phys. Rev. Lett., 109, 265004, 2012.

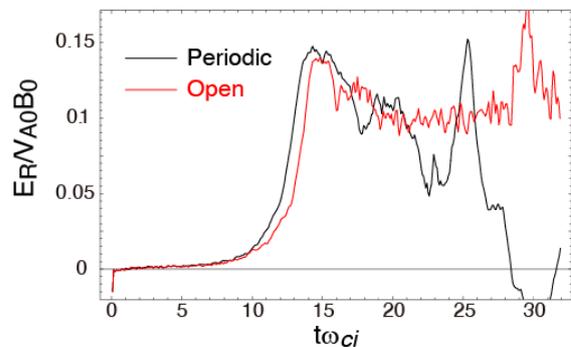


図2：リコネクション効率の時間発展。黒線が周期境界、赤線が開放境界の場合。