

適合細分化格子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。それにもかかわらず、いかに効率よく磁場を散逸させ磁気エネルギーを粒子の運動エネルギーに変換するか、という根本的なメカニズム(磁気拡散機構)が未だに解明されていない。この難問に挑戦するため、これまで我々は従来の粒子法(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、従来よりも大幅に効率の良い粒子計算手法を確立してきた。

本研究では、3D-AMR-PIC コードを用いて、磁気リコネクションの大規模3次元粒子シミュレーションを実施し、3次元的な磁気拡散機構を調べた。計算は、Fujitsu FX1の256ノード(1024コア)を合計30日程度占有しておこなった。イオン(陽

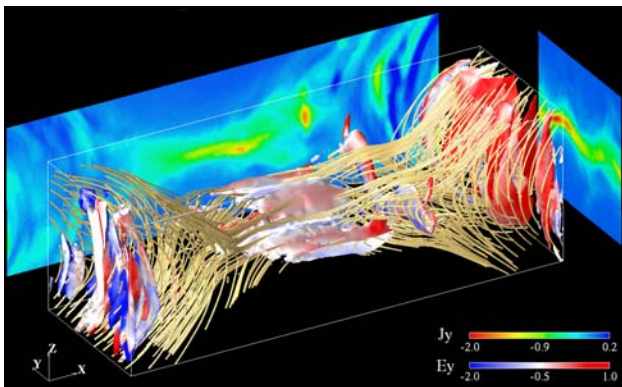


図1: 高速磁気リコネクション過程における磁気X線近傍の様子。等値面は $|J|/J_f=0.4$ を示し、等値面上に電場 E_y 、側面に電流密度 J_y がそれぞれ描かれている。また、実線は磁力線を示す。

子)と電子の質量比は100とし、粒子数は両者をあわせて最大で 10^{11} 個程度まで使用した。図1に高速磁気リコネクション過程における磁気X線近傍の様子を示す。大規模な粒子シミュレーションを実施した結果、高速磁気リコネクションにともなう磁気X線近傍に電子電流層をキンクさせるような電磁波動が励起することが明らかになった。線形波動解析の結果、このモードは従来考えられていたようなイオン-電子の相対運動によって駆動されるドリフトモードではなく、空間的な速度シアによって駆動される新しいタイプのモードであることがわかった。さらに、線形成長率は現実的な質量比の下でも十分大きな値をとることが示された。

図2に電磁擾乱による電子運動量の異常輸送効果を示す。磁気X線近傍の局在化した領域で、シア駆動型モードによる異常運動量輸送が顕著であることがわかる。リコネクション電場は $E_y \approx 0.1$ 程度であるから、高速磁気リコネクションにともなう磁気拡散の50%程度が電磁波動による異常輸送効果で与えられていることになる。さらに、異常輸送効果はプラズモイドの放出にともなう強化されることも見出された。

以上のことから、本研究は、3次元リコネクション過程においてシア駆動型の電磁波動が磁気拡散過程で重要な役割を果たすことを初めてシミュレーションによって実証したと言える。

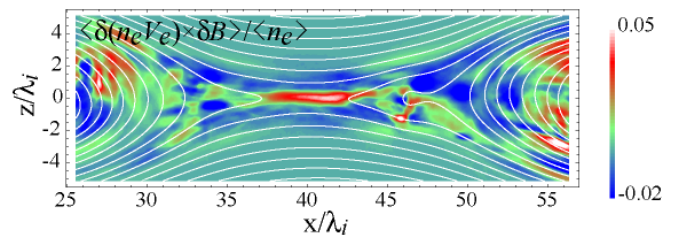


図2: 電磁擾乱による電子運動量の異常輸送効果(y 方向の平均値)。実線は磁力線を示す。