

磁気再結合現象の大規模粒子シミュレーション：電子磁気拡散領域と磁気再結合率の時間変化

藤本 桂三 [1]; 島津 浩哲 [2]; 小原 隆博 [3]
[1] アルバータ大学; [2] 情通研; [3] 情報通信研究機構

Magnetic reconnection in large and fully kinetic system: Time evolution of electron diffusion region and reconnection rate

Keizo Fujimoto[1]; Hironori Shimazu[2]; Takahiro Obara[3]
[1] University of Alberta; [2] NICT; [3] NICT

Magnetic reconnection is widely believed to play an important role in the magnetospheric substorm and solar flares as a fast conversion process of the magnetic energy to plasma kinetic and thermal energies. However, many of detailed processes around the diffusion region are poorly understood. Because reconnecting process of field lines actually proceeds in the diffusion region, it is inevitable to understand physics around the diffusion region in considering energy conversion processes of magnetic reconnection.

Since ions (protons) have much larger inertia than electrons, the diffusion region should have a two-scale structure, embedding the electron diffusion region within the ion diffusion region. Inside the ion diffusion region but outside the electron diffusion region, ions are decoupled from the ambient magnetic field but electrons are frozen in to the field and move with the \mathbf{ExB} drift motion. This relative motion between ions and electrons produces a net current (the Hall current), generating the Hall effects. On the other hand, the magnetic dissipation in the electron diffusion region is supported by the electron inertial effects. Though the reconnecting process of field lines actually proceeds in the electron diffusion region, it has been suggested that the electron dynamics has little or no effect on the reconnection rate [e.g., Birn et al., 2001]. Instead, ion dynamics can control the reconnection processes, that is, the electron scale structure. They conclude that the inclusion of Hall effects is a sufficient condition to achieve fast reconnection. Though recent simulation studies comparing MHD, Hall MHD, hybrid, and full particle simulations confirmed the importance of the Hall effects, the system did not reach a steady state. This is because small cyclic systems tend to suppress the reconnection processes before a steady state is achieved. Large-scale simulations including the Hall effects were examined using two-fluid codes, but they excluded the effects of the off-diagonal electron pressure so that they could not describe the electron behavior adequately near the X-line. Furthermore, Karimabadi et al. [2004] recently found that fast reconnection can be achieved without the Hall effects. Thus it is good time to reconsider the previous model.

We have developed a new electromagnetic particle code using the adaptive mesh refinement (AMR) technique, which enables effectively high-resolution simulations for magnetic reconnection in kinetic system. We conduct very large-scale particle simulations of magnetic reconnection using this code and investigate longer time evolutions of the current sheet. It is found that fast reconnection is achieved at a moment as shown in the previous results, but the reconnection rate decreases soon and a quasi-steady reconnection is not realized. The key process responsible for slowing the reconnection processes is the extension of the electron diffusion region toward the outflow direction, which suppresses the electron inflow velocity, that is, the inflow velocity of the magnetic flux. The extension of the electron diffusion region is caused by the enhancement of the polarization electric field and resulting out-of-plane electron current arising in the electron inflow region. We have confirmed the effects of the polarization electric field by comparing two cases: one is the mass ratio 100, and the other is 1. These results clearly indicate that the previous model, which suggests that the inclusion of the Hall effects is sufficient for fast reconnection, is not adequate.

In this paper, we show the results of large-scale particle simulations and explain the mechanism of the extension of the electron diffusion region and the resulting suppression of magnetic reconnection. We also discuss how a quasi-steady fast reconnection can be achieved in space plasmas.

磁気再結合現象は、磁気エネルギーをプラズマの運動エネルギーに効率よく変換することによって、磁気圏サブストームや太陽フレアの発生過程において重要な役割を担っていることが示唆されているが、磁気拡散領域周辺の詳細な物理素過程については未解明な点が多い。磁気再結合現象は、電流層の構造をMHDスケールで大規模に変化させることが知られているが、磁力線の繋ぎ変わりは磁気中性線周辺に形成される磁気拡散領域で起きている。このことは、磁気再結合によるエネルギー変換過程を理解する上で、磁気拡散領域周辺の構造を明らかにすることが非常に重要であることを意味する。

磁気拡散領域は、イオン（陽子）と電子の慣性の違いから、電子の運動論的效果が重要となる電子磁気拡散領域がイオンの運動論的效果が重要となるイオン磁気拡散領域に内包された構造をもつ。イオン磁気拡散領域内で電子磁気拡散領域の外側に当たる領域では電子のみが磁力線に凍結して \mathbf{ExB} ドリフトを行うため、正味の電流（ホール電流）が流れホール効果を生み出している。一方、電子磁気拡散領域内では、電子慣性の効果によって磁場の散逸が維持されていることが知られている。近年のモデル [e.g., Birn et al., 2001] では、磁力線の繋ぎ変わりそのものが起きているのは電子磁気拡散領域内であるにもかかわらず、電子の運動論的效果は磁気再結合率にほとんど影響を与えないことが示唆されている。そのかわり、イオンのダイナミクスが磁場の散逸過程、つまり、電子磁気拡散領域の構造を制御しており、ホール

効果さえあれば速い磁気再結合が実現可能であると結論付けている。このモデルは、これまで MHD、Hall MHD、ハイブリッド、粒子コードを用いた計算結果を比較することによって実証されてきた。しかしながら、準定常的な速い磁気再結合過程を実現するには至っていない。これは、計算機資源の制約のため、十分大きな計算領域を確保できず、磁気再結合現象が十分発達する前に境界条件の影響が出てしまうからである。ホール効果を取り入れた大規模シミュレーションとしては、2 流体コードを用いたものがあるが、電子圧力の非対角成分の効果を無視しているため、X 型磁気中性線近傍の電子の振る舞いを記述できていない。さらに、最近、Karimabadi et al. [2004] によってホール効果がなくても速い磁気再結合が起こりうる事が確認された。以上のことから、従来のモデルをもう一度検証し直す必要がある。

我々は、これまで従来の 2 次元電磁粒子コードに適合格子細分化法 (AMR 法) を適用した新しい粒子コードの開発に成功した。このコードは、磁気拡散領域周辺やセパトリス周辺など特定の領域のみを高分解能計算することによって、効率よく磁気再結合の粒子シミュレーションを実施することを可能にしている。本研究では、このコードを用いて従来よりも非常に大きな計算領域で磁気再結合の粒子シミュレーションを行い、より長時間にわたる電流層の時間発展を調べた。その結果、これまでのモデルと同様、テアリング不安定性が励起された後、一旦速い磁気再結合が実現されるが、準定常的な状態には至らずすぐに抑制されてしまうことが明らかになった。この原因は、電子磁気拡散領域が x 方向 (電子が流出する方向) に伸びることによって電子の流入速度、つまり、磁気フラックスの流入速度が抑制されるためであると考えられる。電子磁気拡散領域の伸長は、電子流の流入域に生じる分極電場およびそれによる計算面に垂直な電子電流の強化によって、電子流の流出口近傍で磁力線の曲率が減少するためであると考えられる。我々は、分極電場の効果を検証するため、イオンと電子の質量比が 100 の場合と 1 の場合の結果を比較した。その結果、質量比が 1 の場合 (分極電場が生じない場合) には準定常的な磁気再結合が実現されることがわかった。このことは、分極電場の効果によって電子磁気拡散領域が伸長を受け、その結果として磁気再結合過程が抑制されるというシナリオを裏付けるものである。同時に、ホール効果さえあれば速い磁気再結合が実現可能であるとする従来のモデルが不十分であることも意味する。

講演では、大規模電磁粒子シミュレーションの結果を用いながら、電子磁気拡散領域が伸長し、その結果、磁気再結合率が減衰するメカニズムを説明するとともに、宇宙プラズマで準定常的な磁気再結合を実現する可能性について議論する。

< 参考文献 >

- Birn et al., J. Geophys. Res., 106, 3715, 2001.
- Karimabadi et al., J. Geophys. Res. 109, A09205, 2004.