適合格子細分化法を用いた電磁粒子コードの開発：地球磁気圏尾部への応用

Development of electromagnetic particle code using adaptive mesh refinement technique: Application to the Earth magnetotail

藤本 桂三[1]; 町田 忍[2]
Keizo Fujimoto[1]; Shinobu Machida[2]

[1] 京大・理・地球物理; [2] 京大・理・地球惑星
[1] Dept of Geophys Sci., Kyoto Univ; [2] Dept. of Geophys., Kyoto Univ.

磁気再結合現象は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。最近の粒子シミュレーションによる研究から、磁気再結合のトリガー機構や磁気拡散領域周辺における粒子の加速・加熱機構に関連して、イオンスケールと電子スケールの現象の結合過程が重要であることが指摘されている。このようなスケール結合過程の物理を解明するためには、さまざまなスケールの現象を自己矛盾なく記述できる数値シミュレーションを実施することが必要不可欠である。しかし、電子スケールの現象はイオンスケール・MHD スケールの系から見ると、きわめて局所的な領域で起きているので、全計算領域で格子間隔を等しくとっている従来の粒子コードでは、十分な精度で両者を記述することは困難である。

我々は、このような問題を解決するために、従来の PIC 法をもちいた電磁粒子コードに適合格子細分化（AMR）法を組み入れることによって、スケールの異なる現象を自己無撞着に記述できるシミュレーションコードを開発した。AMR 法とは、計算の経過に応じて格子を再構築し、効率的な高分解能計算を実現する手法である。実際、高分解能計算を必要とするのは電流層の中心付近のみであるので、その他の領域で必要最小限なところまで分解能を下げることができれば、大きなシミュレーション空間を確保することが可能になる。従来の AMR 法は並列化が困難であったが FTT(Fully Threaded Tree)アルゴリズム[Khokhlov, 1998]を用いることにより並列計算が可能になった。電磁粒子コードに適合格子細分化法を適用する際の問題点は、格子を細分化すると１格子当たりの粒子数が減少してしまうことである。特に、磁気再結合過程において X 型磁気中性線の近傍では電子の運動論的効果が重要になるため高分解能計算が必要であるが、ローブの希薄プラズマが流入するため１格子当たりの粒子数が減り数値ノイズが大きくなる。したがって、このような領域では、たとえ格子サイズを小さくしても数値ノイズが大きくなるため、期待される精度を維持しながら高分解能計算をすることはできない。今回、我々は、Lapenta [2002]によって開発された手法を用いて粒子の分割・統合を行い１格子当たりの粒子数を調節しながら計算を進めることに成功した。この結果、X 型磁気中性線近傍でも十分な粒子数が割り当てられ、電子スケールの詳細な構造が再現された。例えば、電子のメアンダリング運動による電流層の二重ピーク構造が明確に再現された。また、電子の磁気拡散領域の厚さや電子の流出速度、誘導電場の強さなどは過去の解析的な理論研究で推定された値とほぼ一致した結果が得られた。我々のシミュレーションでは、細分化格子は X 型磁気中性線付近にのみ存在するので、全計算領域で一様格子を採用した場合に比べて、平均で格子数が 14 分の１、粒子数が６分の１程度で実行可能となる。すなわち、従来の電磁粒子コードに比べて、大幅に記憶容量と計算時間を節約して効率的な計算ができるようになった。講演では、AMR 法および粒子分割・統合法を説明するとともに、効率性という観点から従来の電磁粒子コードと我々の開発したコードを比較考察する