

並列計算機を用いたリコネクション現象の計算機実験:2次元ハイブリッドコードと2次元MHDコードの比較

Simulations of the Magnetotail Reconnection on Parallel Computer: via 2D hybrid code and 2D MHD code

岡島 利仁 [1], 村田 健史 [2]

Toshihito Okajima [1], Takeshi Murata [2]

[1] 愛大・理・情報, [2] 愛大・工・情報

[1] Computer Science, Ehime Univ, [2] Computer Sci, Ehime Univ

<http://sp.cs.ehime-u.ac.jp>

従来、地球磁気圏尾部におけるリコネクション現象の理解に、MHDコードが果たしてきた役割は大きい。しかしMHDコードは、その基本方程式において、ホール項や電子圧力勾配を無視しているなどの仮定を含んでいる。そのため、尾部領域でのこれらの影響について評価する必要がある。一方、粒子コードは有効な手段であるが、膨大な粒子計算が必要となるという欠点がある。しかし、並列計算機の登場により、このような計算が可能となった。

本研究では、ハイブリッドコードの並列化を行なう。そして、この並列化したコードを用いてリコネクション現象の解析を行ない、MHDコードで得られた結果との比較を行なう。

従来、広大な宇宙空間におけるプラズマ現象の解析には、プラズマを流体として近似し、巨視的なスケールを扱うことができるMHDコードが用いられてきた。しかし、MHDコードは、その基本方程式において、ホール項、電子圧力勾配を無視しているなどの仮定を含んでいる。さらに、実際に人工衛星による観測において、プラズマの流体近似では解析することができないデータが得られ、宇宙プラズマ現象においては、その粒子性が重要となることがわかっている。そのため、MHDコードのモデルが、リコネクション現象の全てを説明してはいないのではないかと考えられる。

そこで、このMHDコードの結果が本質的なものであるかの検証のためには、プラズマを流体としてではなく、粒子として扱う粒子コードを用いる必要がある。粒子コードは個々の粒子の運動を解析することができ、MHDコードにおいて、流体近似の際に無視した各物理量に関しても取り扱うことができる。ところが、粒子コードを用いると、数十から数百万の粒子の運動の計算が必要となるため、膨大な計算量になってしまう。そのため、近年までは、粒子計算による巨視的なスケールの現象の解析を行なうことは、計算機の性能上困難であり、これまでの粒子コードを用いた研究は、流体計算領域のごく一部だけを取り出して行なわれてきた。ところが、並列計算機の登場は、このような粒子コードによるMHDコードと同領域の計算を可能とした。

本研究では、粒子コードの一つであるハイブリッドコードの並列化を行なう。そして、この並列化したコードを用いて、リコネクション現象の解析を行ない、MHDコードで得られた結果との比較を行なうことを目的とする。

並列化を行なう際には、分散メモリ型の並列計算機を用いる。そして、プロセッサ間の通信には、MPI(Message-Passing Interface)を用いる。並列化には、空間分割法を用いて場の物理量の計算を並列化し、粒子の配列を分割する方法を用いて粒子の計算を並列化する方法を用いた。ハイブリッドコードでは、粒子の計算が全体の計算の大部分を占める。そこでまず、粒子の計算の並列化を行なった。次に場の物理量の計算の並列化を行なった。その結果、8つのプロセッサを用いた場合、計算時間は逐次処理の場合の5.57分の1に短縮された。

ハイブリッドコードによる解析での問題点としては、MHDコードとは境界条件、計算領域が異なるという点が上げられる。そこで、次にハイブリッドコードの境界条件を自由境界へと変更した。本コードでの自由境界は全ての波動が透過する完全な自由境界ではないが、反射する波動成分は現象に対して十分小さいことを確認した。

このコードを用いて、MHDコードと初期状態、パラメータを合わせたリコネクション現象の計算を行ない、結果を比較した。シミュレーションモデルには、ハリス平衡状態の反平行磁場を用い、ニュートラルシートのある一点を中心に電気抵抗を与え続けることによって、リコネクション現象の再現を試みた。

MHDコードでは、抵抗を与えている領域において、磁力線がつながり変わり、テイル方向のプラズマ流速が発生する。このテイル方向のプラズマ流速により、x点でプラズマ密度が減少することから、プラズマ圧と磁気圧のバランスが崩れ、ローブの広い領域からx点に向けたプラズマ流速が発生し、プラズマシートが薄くなる。また、スローショックが発生し、テイル方向のプラズマ流速が爆発的に発展し、これによってリコネクションは爆発的に進行するという結果を得た。

一方、ハイブリッドコードでも、抵抗を与えている領域において磁力線はつながり変わり、テイル方向に向けたイオン、電子流速が発生する。しかし、x点において電子圧力が上昇することから、プラズマ圧と磁気圧の balan

スは崩れず、ローブの広い領域からx点に向けた流速は発生しない。また、電場が発生し、イオンの動きを妨げることから、爆発的なイオン、電子流速に発展しないという結果を得た。ハイブリッドコードでは、電気抵抗を与えている領域においてクロステイル電場が発生する。この電場によって電子はダスク方向に加速され、加速された電子が電場を形成する。

MHDコードでは電子流速は仮定において無視されている。しかし、ハイブリッドコードでは電子流速が重要な役割を果たしていることから、リコネクション現象を扱う上で無視することはできないと考えられる。