

氏 名	ふじもと けいぞう 藤 本 桂 三
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3006 号
学位授与の日付	平 成 18 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 地 球 惑 星 科 学 専 攻
学位論文題目	Studies on Large-Scale Evolution of Magnetic Reconnection Using Full Particle Simulations With Adaptive Mesh Refinement Technique (適合格子細分化法を用いた粒子シミュレーションによる磁気再結合現象の大規模発展に関する研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 町 田 忍 教 授 家 森 俊 彦 教 授 淡 路 敏 之

論 文 内 容 の 要 旨

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メカニズムとして、地球磁気圏サブストームや太陽フレアにおいて重要な役割を果たしていると考えられている。しかしながら、磁気再結合現象を理解する上で重要な磁場を融合させる機構、その過程の進行する領域と周辺領域との結合の仕方、粒子加速の過程などに関して未解決な問題が多く残っている。磁気再結合現象を自己矛盾無く理解することが困難なのは、その大規模構造がプラズマの運動論的效果が重要となる局所的な物理過程に強く影響されるからである。これまでは、計算機資源に制約があるため、プラズマの運動論的效果を取り入れた磁気再結合現象の大規模な数値計算を行なうことは困難であった。

本研究では上記の問題を解決するため、適合格子細分化法 (AMR 法) と粒子分割法を用いた 2 次元電磁粒子コードを世界に先駆けて開発した。AMR 法とは、与えられた指標に従って格子を動的に分割・統合することによって、空間解像度を局所的に上げる手法である。一方、粒子分割法は細分化格子内に存在する超粒子を分割し、格子あたりの粒子数を調節する手法である。これは、格子あたりの粒子数が少なくなると数値ノイズが増大してしまう欠点を補うためである。新規開発したコードについて幾つかのテスト計算を行い、AMR 法と粒子分割法が従来の粒子コードにうまく適用できることを確認した。また、AMR 法と粒子分割法の適用によって、磁気再結合現象にともなう電流層の時間発展を効率よく記述できることを確認した。

この結果を受けて、磁気再結合現象について大規模計算を行い、磁気再結合が定常状態に達して、高い再結合率を維持し得るか否かを調べた。計算を実行したところ、系は、一度は高い再結合率を実現するが定常状態に至らず、再結合率は時間的に減衰することが判明した。申請者は、それが電子とイオンの運動論的效果の差に起因することを突き止めた。

次に、磁気再結合現象が大規模に発展する際の、プラズマシート-ロープ境界領域における電子の加熱過程について研究した。この領域では、人工衛星による直接観測によってフラットトップ型の電子の速度分布関数がしばしば観測されているが、その生成機構は未だに特定されていない。大規模数値計算の結果、背景にある低温電子と加速されたビーム電子との間で励起される電子二流体不安定性に伴う電子加熱・混合が、フラットトップ型の分布関数を形成することがわかった。また、磁気再結合現象に伴う電子二流体不安定性が非線形的に発達することによって静電孤立波 (ESW) が生じることを見出した。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

本学位申請論文は、新しい方式を適用した数値シミュレーションコードの開発と、それを用いた磁気再結合現象に関する研究である。主論文は大きく分けて、次の 3 つの部分で構成されている。

第 1 部においては、適合格子分割法 (AMR 法) と呼ばれる方法と、電子やイオンの集団を表現する超粒子を、予め設けた指標に従って分割・統合させる方法を組み合わせた 2 次元電磁プラズマ粒子コードの開発に関する研究成果が示されてい

る。新しい方式を導入することにより、計算機の使用メモリーや計算時間を大幅に通減させながら、大規模な計算を行い、かつ同時に、必要な領域だけを細かい格子を用いて調べることが可能となった。このコードは今後、分野を越えて、核融合や天文学など、プラズマを扱う広い領域の問題に応用されて、発展してゆくことが期待される。

第2部においては、地球の磁気圏尾部で起こることが知られている磁気再結合現象に、新しいコードを適用して行った研究結果が示されている。申請者は、反平行磁場構造を持つハリス解から出発して、系の中で磁気再結合を起こすことに成功した。反平行の磁力線が相接する領域において、初期には、まず、点状の局在化した部分で磁力線が融合し、さらに、磁気拡散領域と呼ばれるこの領域が磁力線に沿った方向に伸張する。これまで報告されている例よりも長時間計算した結果、本研究では、その伸張が止まらずに発展し、それに関連して磁気再結合率が低下する現象を見出した。従来の粒子コードに比べて、磁気拡散領域を精密に扱うことのできる新コードを用いて初めて見出した有意義な結果であり、それが電子とイオンの運動論的效果の差に起因することを突き止めた点は評価に値する。

第3部においては、磁気再結合によって、磁気拡散領域周辺で加速された電子が磁力線に沿って周辺領域に飛び出して行く際、背景電子との間に二流体不安定を発生させる現象について論じられている。両電子は不安定励起波動によって磁力線方向に加熱・混合され、フラットトップ型の速度分布関数を生成する。また、その励起波動の非線型的な発展として静電孤立波（ESW）が形成されることを見出した。従来、フラットトップ型分布関数は、その領域にスローショックが形成され、その際に起こるショック加熱に原因があると考えられていたが、それと異なる新しい解釈を与えた。静電孤立波と併せて、衛星観測によって存在の確認されている現象との比較研究を実施し、その物理的機構を明らかにしたことは評価に値する。

一つの系の中に、磁気拡散領域の形成や電子ビーム不安定性の発生と静電孤立波の生成といったマイクロ過程を実現し、かつ、それら一連の過程が結合したMHD的なマクロな構造を世界に先駆けて実現した先駆的な研究として高く評価される。

以上の観点から、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。