

氏名	中 林 潤 哉
学位(専攻分野)	博士 (理学)
学位記番号	理博第2187号
学位授与の日付	平成12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	Numerical and observational study of the magnetic reconnection in the Earth's magnetotail (地球磁気圏尾部における磁気再結合現象の数値的・観測的研究)

論文調査委員 (主査) 助教授 町田 忍 教授 荒木 徹 教授 家森俊彦

### 論文内容の要旨

地球磁気圏におけるエネルギー輸送という視点に立つと、磁気圏尾部はそのエネルギーの貯蔵庫としての役割を果たしている。太陽風から取り込まれたエネルギーは磁気圏尾部中に磁場のエネルギーという形で蓄積される。そして、あることを契機として、それが爆発的に解放され、磁気圏の粒子加速や電離圏中のジュール加熱で消費される。これがサブストームと呼ばれる現象である。サブストームを駆動する物理機構として主要な役割を果たしているのが、磁気再結合過程である。本過程は、最初、作業仮説モデルとして登場し、以来多くの理論的研究がなされ、概念が確立してきた。さらに、実際の現象への応用という観点から、静穏な状態から磁気再結合を起こす状態への動的変化が重要であるという事実も認識されるようになってきた。地球の磁気圏における磁気再結合過程は、その中心部にある磁気拡散領域から延びる電流層の厚みがイオンのジャイロ半径よりも小さい時には、イオンを流体として取り扱うのが不十分であり、そのため、イオンに関しては速度分布関数の構造までも考慮に入れた運動論的な手法で取り扱う必要がある。

近年の科学衛星によるプラズマの観測では、電子およびイオンの3次元速度分布関数を高時間分解能で取得することが可能である。そのために、今まで盛んに行われてきた流体モデルを用いた理論は、観測と比べる上で限界があり、この理由からもイオンの速度分布を考慮した運動論的な理論モデルが必要であった。本研究では、上記の要請に応えるために、イオンを粒子として、一方、電子を流体として扱い、電磁場を含めた系を自己無撞着となる様に時間発展を解き進める電磁ハイブリッドコードを開発して使用した。シミュレーション系の次元は、実空間に2次元を仮定し、速度空間は3次元を仮定した。境界を開放端としたが、特に、新しい試みとして、イオン粒子速度分布関数の境界法線方向の微分値がゼロとなる様、独自のアルゴリズムを開発して適用した。

シミュレーション計算では、系中央の局所的な領域に異常抵抗を人工的に与え、磁気再結合を開始させた。その結果は次の様にまとめられる。(1) 磁気再結合に伴って粒子加速が起こりプラズモイドと呼ばれる高温・高速なプラズマの流れが生成されるが、その中のイオンの速度分布関数の形状は、南北方向に強い依存性を示し、同時に粒子加速機構を大きく反映していることがわかった。(2) 粒子加速は従来から指摘されている夕方向き電場によるものだけでなく、磁気拡散領域から離れる方向に向く電場も形成され、それが粒子加速に大きく寄与することを見いだした。また、磁気拡散領域を通過する磁力線の付近では、プラズマシートに向かう電場が発生し、粒子が朝向きに  $\mathbf{ExB}$  ドリフトすることを見いだした。(3) 磁気拡散領域を中心として複雑な電流系が形成され、それは、系内の朝夕方向の磁場成分の強度空間分布に八重極構造をもたらすことがわかった。(4) プラズモイドの部分では、高温の加速粒子の寄与によってプラズマ圧が増大する。また、その周辺の部分ではプラズモイドの通過によって、磁力線が外側の磁気境界面の方向に押しやられるために磁気圧が増大する。従って、それらの和である全圧が増大することが見いだされた。

さらに、本研究では、得られた、以上の結果を確認するために、仮想的な衛星をシミュレーション系内に置いて、予想さ

れる電磁場の変化と速度分布関数の変化を時間の関数として求めた。そして、実際の GEOTAIL (ジオテイル) 衛星観測データの中に類似の変化を求め、両者が良く合致する典型例について比較検討を行った。その結果、上記の特徴を確認すると共に、イオンの3次元速度分布関数の時間的な変化は、プラズモイドの内部に発生した夕方向きの電場の動きで定在イオンがピックアップされ、プラズモイド中の高温イオンビームと共に運び去られてゆくことを見いだした。また、高温イオンビームも、上記(2)の電場による加速に加え、磁気拡散領域を通過する際に、強い夕方向きの電場によって加速されていることを見いだした。本研究は、衛星による定点観測でも、粒子の3次元速度分布関数の構造と時間的な変化を調べることによって、周辺で起こっている物理過程を知ることができるという事実を極めて明快な方法によって示すことに成功した。

### 論文審査の結果の要旨

地球の磁気圏は太陽風からエネルギーを取り込んで、磁気圏尾部の領域に磁場という形でエネルギーを蓄積する。この過程が著しく進むと、突如としてそれが解放されプラズマ粒子の加速や電離層のジュール加熱などを駆動することに費やされる。この時のエネルギー解放機構として作用しているのが、磁気再結合であると考えられている。磁気再結合は地球磁気圏のみに存在する過程ではなく、例えば太陽面で起こるフレアなど、他の天文学的な現象においても、大きな役割を担っているものと考えられている。さて、近年の科学衛星によるプラズマ粒子の直接観測では、衛星位置におけるイオン・電子の3次元速度空間の分布関数を高い時間分解能で計測することが可能である。従って、今までは主として電磁流体的な枠組みで、現象を理解しようとされてきたが、観測の方は、それを超え、粒子の速度空間分布関数の情報まで提供してくれるようになってきている。よって、われわれは電磁流体的な枠を越え、粒子の運動論的な効果を含んだ議論を展開する必要性に迫られる状況になってきた。

一方で、磁力線を融合させる領域が、磁気再結合構造の中央に位置する。これは磁気拡散領域と呼ばれるが、そこから、地球側とその反対側に電流層が延びる形になっている。地球磁気圏では、この電流層の厚みがイオンのジャイロ半径に比べて小さい、もしくは同程度なために、必然的にイオンについて流体的な取り扱いが成立しなくなる。すなわち、イオンの運動論的な効果が重要になってくる。初期の理論研究では、磁気再結合の定常的な構造の解明が行われていたが、実際の衛星観測データと比較する段階になると、静穏な状態から磁気再結合が開始して、系が発展してゆく構造変化を考える必要がある。本研究では、その様な視点に立ち、イオンを粒子として扱い、その運動論的な効果を含め、一方電子は、慣性がゼロで電氣的な中性を保つ流体として扱いながら、プラズマと電磁場の系を自己無撞着に解き進める電磁ハイブリッドコードを独自に開発して研究を進めた。シミュレーションの空間は、実空間は2次元、速度空間は3次元と仮定した。また、申請者は、いずれの境界についても開放境界条件を課した。特に、粒子について、境界の法線方向の速度分布関数の微分値がゼロとなる手法を考案して適用したが、これは、今後、他の計算においても応用され成果を挙げるものとして高く評価される。

初期状態としては、地球磁気圏尾部を近似したハリス解を仮定し、系の中央部に局在した異常抵抗を与えて、磁気再結合過程を開始させた。その結果、(1)磁気再結合に伴う加速粒子の速度分布関数の形状は粒子加速機構を大きく反映し、南北方向に強い依存性を示す。(2)粒子加速に直接関与する電場は、従来指摘されている夕方向きの電場に加えて、プラズマシートに向かう方向の成分が大きく寄与する。(3)系内の閉じた電流系は磁気拡散領域を中心とした朝夕方向の磁場の空間強度分布に八重極構造をもたらす。(4)プラズモイドの部分では、加速粒子生成によりプラズマ圧の増大がみられ、南北周辺部では磁気圧増大がみられることなどの重要な事実を導くことに成功した。

申請者は、さらに、シミュレーション系内に仮想的に衛星を置き、観測されると予想される電磁場変動と速度分布関数の時間変化を求め、これと、実際に GEOTAIL (ジオテイル) 衛星で観測された現象の中で予想と適合する典型例について、両者の比較検討を行った。研究の過程で、上に列挙した特徴を確認し、さらに、両者のイオン3次元速度分布関数の構造および時間的な変化を調べ、プラズモイド中の高温イオンビームは、上記(2)の電場による加速に加え、磁気拡散領域を通過する際に、強い夕方向きの電場によって加速されていることを見いだした。さらに、プラズモイドの通過に伴う定在イオンのピックアップ現象を発見した。後者に関しては、一般の電磁流体的な描像においては、プラズモイドを構成する高温のプラズマとプラズモイドの到着する前から、その場所を占めていた定在イオンが混じりあうことはないで、まさに、イオンの運動論的な効果を取り入れた本研究によって、はじめて解き明かされた内容である。

本研究は、衛星による定点観測でも、現実に近い数値シミュレーションを行い、その結果、特に、粒子の3次元速度

分布関数の構造と、その時間変化を相互比較することにより、広域的な構造の変化や、周辺で生起する物理過程を高い精度で推定することが可能であることを示し、関連分野における将来の研究手法に新しい指針を与えた点で高く評価される。

以上の様な観点から、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た。なお、平成12年2月2日、主論文に報告されている研究内容と、それに関連する分野について口頭試問を行った結果、合格と認めた。