

|             |                                                                                                                                       |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名         | う え の げん た<br>上 野 玄 太                                                                                                                 |
| 学位(専攻分野)    | 博 士 (理 学)                                                                                                                             |
| 学 位 記 番 号   | 理 博 第 2402 号                                                                                                                          |
| 学位授与の日付     | 平 成 13 年 11 月 26 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      | Study of magnetotail dynamics including the effects of normal field<br>and nonequilibrium plasma<br>(縦磁場と非平衡プラズマを考慮した磁気圏尾部のダイナミクスの研究) |
| 論文調査委員      | (主 査)<br>教 授 町 田 忍 教 授 荒 木 徹 教 授 家 森 俊 彦                                                                                              |

### 論 文 内 容 の 要 旨

本学位申請論文は磁気圏などの自然界に存在するプラズマの振る舞いを理解するためには、通常の空間的な分布に加えて、速度位相空間における粒子の分布を知ることが重要であるという認識に出发点がある。

本論文の前半部では、速度位相空間における粒子分布が不安定であるために磁気圏尾部に励起される低域混成波について詳細な線形理論が展開されている。磁気圏尾部領域では、通常仮定される様な単純な反平行の磁場構造でなく、それに直交する縦磁場が加わった構造をしている。過去において、縦磁場成分のある際に起こる電子の磁場湾曲ドリフトをエネルギー依存性のない一般力によるドリフトで便宜的に置き換えて線形解析が行われた。しかし、磁場湾曲ドリフトの速度は磁力線に沿った粒子の運動エネルギーに比例するため、その解析方法に問題のあることが指摘されていた。この問題を厳密に扱うには、運動論的なプラズマの線形解析の常套手段、すなわち、与えられた磁場・電場の空間構造の中を粒子が0次運動をする軌道に沿って解析的に積分計算を行う処方箋が適用できず、厳密な取り扱いが不可能であるとされてきた。ところが、近年、摂動論を発展させた新しい方法が提案され、申請者は、その方法を用いて、電子の磁場湾曲ドリフトを正確に取り扱いながら、低域混成波ドリフト不安定性に関する線形分散式を導いた。その式は磁場の曲率が無限大の極限をとると、これまで、多く用いられてきた線形分散式に帰着するが、その中に重大な誤りがあることを発見した。従来、0および1とされてきた2つの係数が、実はその様な単純な定数にならないことを見いだした。電子の磁場湾曲ドリフトを取り入れた線形分散関係式を解いて、不安定励起波の波数と線形成長率を求めたが、その結果、これらが過去の研究で得られたものよりも、個々の電子の共鳴条件を運動論的に正しく扱ったために、電子のサイクロトロン半径よりも波長の短い(波数の大きい)領域で著しく成長率の下がることになった。

実際の衛星観測によって得られるプラズマの3次元速度分布関数は一般的に複数の粒子群によって構成されている。したがって、それらを別々の成分に分離して取り扱って研究を進める必要があるが、申請者は粒子群ごとに密度、速度ベクトル、温度テンソルを求める手法を開発した。これは Expectation Maximization (EM) 法と呼ばれる統計手法に基づくもので、観測で実際に得られた3次元速度分布関数データを用いて対数尤度と呼ばれる量を定義し、その値が最大となる様に各正規分布(Maxwell分布)の中心位置や分散を求めるものである。密度、速度ベクトル、温度テンソルなどはその速度モーメントを計算することによって得られる。また、粒子群の個数を自動的に求めるにあたって、3次元的な分布関数をそのまま取り扱うのではなく、一旦、問題を1次元的な分布関数の問題に帰着させて取り扱う手法を開発した。さらに、本手法の応用として、Geotail衛星によって磁気圏尾部で観測されたイオンの3次元速度分布関数の成分分離を行った。そして、ロープ起源の低温度プラズマがプラズマシート境界層、さらに、その内側のプラズマシートに存在する興味深い現象や、また、中間のエネルギー領域にはロープ起源の低温のイオンが加熱されてゆく過程が事例解析によって示された。さらに、プラズマシート境界層において、これらの2成分が存在する場合の波動の分散式を求め、その解析を行ったところ、従来の1成分として扱う方法では不安定と考えられてきた Fire Hose 不安定性が、実は安定であり、そのかわりに、より低周波領域にお

る電磁イオンサイクロトロン不安定が成長する可能性のあることが示された。本手法は今後のプラズマの速度分布関数を研究する際の有効な解析手法として広い応用が考えられる。

## 論文審査の結果の要旨

本学位論文において申請者は2つのテーマを取り扱っているが、それらはいずれも磁気圏などの領域におけるプラズマ粒子の特性を理解するうえで、空間的な分布と共に速度位相空間における粒子分布を知ることが重要であるとの認識で統一されている。

第一の研究課題はプラズマ粒子の速度空間を知り、電子の磁場湾曲ドリフトを正確に取り入れた上で、磁気圏尾部領域における低域混成波ドリフト不安定性に関して線形解析を行ったものである。磁気圏尾部領域では多くの場合、反平行の磁場構造を有していると単純に仮定されるが、実際には、地球の双極子磁場に起因する縦方向の磁場成分がそれに加わった構造をしている。過去に縦磁場成分とそれに伴う磁場湾曲ドリフトを電子について考慮した線形理論があった。しかし、本来、沿磁力線方向の電子の運動エネルギーに比例するドリフト速度をその研究では一定と仮定していた。これは、従来の運動論的理論の枠組みにおける0次の粒子軌道に沿った積分が磁場湾曲ドリフトの含まれた場合に実行できないことによる近似であった。近年になって、その困難を克服する方法が、摂動論に即した方法を模索する過程で見いだされ、申請者はその方法を本研究に適用して線形分散式を導くことに成功した。求めた式は磁場曲率が無限大の極限操作を行うことで、過去に導かれた線形分散式に帰着するはずであるが、この過程で、申請者は、今まで用いられてきた式中の係数の値に誤りのあることを発見した。極限をとった際の分散関係式は低域混成波に関連した不安定性を議論する際に広く用いられてきたもので、その式に誤りのあることはこれまでの研究結果の定量的な見直しが必要であること意味し、学術的に極めて重要な内容である。また、本論である、電子の磁場湾曲ドリフトを考慮した低域混成波ドリフト不安定性については、電子のサイクロトロン半径よりも短波長の波動の線形成長率が、エネルギー依存性を無視した過去の研究結果に比べて大幅に減少することを見いだした。この成果も、磁気圏尾部領域における衝撃波安定化との関連、また、磁気再結合領域の中央にある磁気中性線の異常抵抗の問題を考える上で重要な示唆を含んでいる。以上の結果は学術誌 *Physics of Plasmas* に掲載され、磁気圏尾部のダイナミクスを考える上で、さらには、分野を越えて一般のプラズマの振る舞いを理解する上で、大きな寄与をなすものと考えられる。

自然界では3次元的速度位相空間で、多成分の粒子群が同時に存在することが、しばしば起こるが、第二の研究課題は、その様な複数の粒子成分を自動的に分離して抽出する手法の開発である。申請者は、粒子の3次元速度分布関数の0, 1, 2次のモーメントとして与えられる密度、速度ベクトル、温度テンソルを求める際に、従来は多くの場合、単一成分と仮定して扱っていたことに疑問を抱き、これらの構造をより正確に記述し理解するために、多成分からなる3次元の速度分布関数を、単一成分では正規分布(Maxwell分布)とみなせる粒子群の集まりであると仮定して、統計学で用いられる Expectation Maximization (EM) 法によって、成分分離の実現を試みた。その原理は、粒子の3次元速度分布のデータを用いて対数尤度を定義し、それを最大とらしめる様に各正規分布の中心位置と分散を求めるというものである。また、粒子群の数を決定するために、独自の判定方法を開発した。従来、少数ではあるが、個々のデータについて手作業で成分分離を行った報告がある。しかし、定量的な判断基準を設けて自動的に成分分離・抽出を実行できるようになった点は、今後のプラズマ観測データの解析に新しい途をひらいたという観点から高く評価される。特に、2つ以上の分布が速度空間上で重なり合う場合には、本研究による手法が大きな威力を発揮する。

申請者は本研究手法の有効性を実証するために、Geotail 衛星に搭載されたプラズマ計測器で取得されたイオンのデータにこの解析手法を適用してローブ起源の粒子がプラズマシート境界層で加速される様子を明確に示したり、ローブ起源の粒子がプラズマシート境界層、さらにはプラズマシート中に加速されないまま低温のイオン群を形成している興味深い場合のあることを事例解析によって示した。また、プラズマシート境界層においては1成分と仮定して求めた Fire Hose 不安定が成長するという結果が、本解析手法では2成分と判定されたので、その結果に基づいて線形分散解析を行うと、上記不安定は成長せず、より低周波の領域で電磁イオンサイクロトロン不安定が成長することが求められた。これらの研究内容は *Journal of Geophysical Research* 誌に受理され掲載が決定している。解析手法の開発とそれを用いた事例解析は申請者の

開発した解析手法が磁気圏など自然界に存在するプラズマの研究に極めて有効であることを示し、今後、関連分野で広く普及することになるであろうと考えられる。

本学位申請論文の研究は、磁気圏の現象を理解する上で、プラズマの3次元的速度位相空間における分布が重要であるとの認識から、磁場彎曲ドリフトの効果を取り入れた低域混成波ドリフト不安定性の厳密な線形解析を行い、従来の結果の誤りを指摘し、同時に新しい知見をもたらしたこと、また、多成分から構成される3次元速度分布関数の自動成分分離・抽出の方法を開発して、磁気圏尾部領域の衛星観測データにそれを適用し有効性を示し、今後の関連分野の研究に新しく有効な解析法を提供し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判断した。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い合格と認めた。