

氏名	三宅 壯 聡
学位(専攻分野)	博士 (情報学)
学位記番号	情博第14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	情報学研究科通信情報システム専攻
学位論文題目	Computer Simulations of Electrostatic Solitary Waves (静電孤立波に関する計算機実験)

論文調査委員 (主査) 教授 松本 紘 教授 橋本弘藏 教授 大村善治

### 論文内容の要旨

本論文は、宇宙空間プラズマ中の静電孤立波の形成メカニズムを論じた結果をまとめたもので、7章からなっている。

第1章は序論で、地球磁気圏の説明及び広帯域静電ノイズのレビューを行っている。

第2章では静電孤立波の特徴をまとめており、Geotail 衛星などによる地球磁気圏尾部及びオーロラ域での観測の紹介を行い、それらの観測結果から仮定された静電孤立波のポテンシャルモデルの説明を行っている。これは静電孤立波のパルス状の波形が空間的に孤立したポテンシャル構造に対応しているというモデルである。

第3章では電子ビーム不安定性に関する理論的考察を行い、静電孤立波の形成メカニズムとして3種類の電子ビーム不安定性を仮定し、それらの線形解析を行っている。この線形解析では主に斜め方向の波動の成長率における外部磁場強度の影響を調べている。また、電子ビーム不安定性の非線形発展において重要な BGK 理論及びトラッピング理論の説明も行っている。

第4章は本研究用に新たに開発された静電粒子コードに関する説明であり、同時に粒子コードの並列化及び数値的熱擾乱の問題についても言及している。さらに本研究における一次元及び二次元計算機実験で用いられる数値モデルの説明を行っている。

第5章は一次元計算機実験のまとめで、まず電子の運動のみを考慮した計算機実験によって第3章で仮定した3種類の電子ビーム不安定性の時間発展を調べ、そのうち2種類の電子ビーム不安定性から静電孤立波が形成されることを確認している。続いてイオンの運動を考慮した計算機実験を行い、静電孤立波が安定に形成されるために必要な条件を明らかにしている。これら一次元計算機実験結果と観測データとの比較を行い、磁気圏尾部及びオーロラ域における静電孤立波の形成メカニズムとして可能性の高い電子ビーム不安定性を導き出している。

第6章では二次元計算機実験の結果をまとめている。まず磁気圏尾部で観測された一次元構造を持つ静電孤立波に関する計算機実験を行い、高温の背景電子に低温の弱電子ビームが入射する電子ビーム不安定性から一次元構造を持つ静電孤立波が形成されることを確認している。これは電子のサイクロトロン運動によって磁場に垂直方向のポテンシャルエネルギーが粒子の熱エネルギーに変換されて減衰するというを示している。さらに、外部磁場強度が比較的弱い場合にはこの効果が強く現れ、より明確な一次元構造を持つ静電孤立波が形成されることを見出した。一方でこのような弱い電子ビーム不安定性から励起される静電孤立波はポテンシャルエネルギーが小さく、数値的熱擾乱の影響を受け易いことも示している。

続いてオーロラ領域で観測された二次元構造を持つ静電孤立波に関する計算機実験を行い、二流体不安定性から二次元構造を持つ静電孤立波が形成されることを見出した。この場合、電子によって励起された空間ポテンシャル構造と共鳴する、斜め伝播の低域混成波が強く励起される。この波動がポテンシャルを磁場に垂直方向に分割するために、二次元構造を持つ静電孤立波が形成される、という機構を明らかにした。このようにして形成された静電孤立波の磁場に垂直方向の空間スケールはイオンのジャイロ半径程度であり、このことは衛星観測によって報告されているオーロラ域の静電孤立波の特徴と

一致している。二次元計算機実験結果と観測データとの良い相関は、本研究の計算機実験で仮定した磁気圏尾部及びオーロラ域における静電孤立波の形成メカニズムを立証するものである。

第7章は本研究のまとめ及び結論であり、一次元及び二次元の計算機実験結果をまとめ、磁気圏尾部及びオーロラ域において静電孤立波がそれぞれ異なる電子ビーム不安定性の非線形発展の結果、前者は主に電子のダイナミクスによって、後者は電子とイオンの相互作用によって形成されることを結論付けている。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、宇宙空間プラズマ中の静電孤立波の形成メカニズムを計算機実験を用いて研究した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

静電孤立波は地球磁気圏尾部をはじめ地球周辺の様々な領域で確認されている。磁気圏尾部で観測される静電孤立波は外部磁場に垂直方向に一様な一次元構造を持つのに対し、オーロラ域で観測されるものは孤立した二次元構造を持っている。このような空間構造の違いを再現し、その形成過程を明らかにするためには、二次元シミュレーションを行う必要がある。そのために二次元静電粒子コードを開発、また近年の計算機の並列化に対応して粒子分割法を用いた並列化の手法を確立した。

本研究では、まず一次元の計算機シミュレーションを行い、静電孤立波が外部磁場に平行な電子ビーム不安定性の非線形発展によって形成されることを明らかにした。またイオンの状態を変化させたシミュレーションを行い、静電孤立波が安定に形成される条件を特定した。

さらに二次元シミュレーションの結果、静電孤立波の空間構造は初期電子ビーム不安定性の強度と外部磁場強度及びイオンダイナミクスによって決定されることを明らかにした。磁気圏尾部で観測される一次元構造の静電孤立波は高温の背景電子に低温の弱電子ビームが入射する不安定性によって励起される。この弱電子ビームによる不安定性は磁場方向の成長率が高く、一次元的なポテンシャルを励起する。さらに電子サイクロトロン運動による拡散によって磁場に垂直方向のポテンシャルエネルギーが熱エネルギーに変換され、一次元ポテンシャルが形成されることを明らかにした。

一方、オーロラ域で観測される二次元構造の静電孤立波は、二流体不安定性に代表される強い電子ビーム不安定性によって励起される。この二流体不安定性は磁場方向だけでなく斜め方向の成長率も高く、二次元的なポテンシャルが励起される。これらのポテンシャルは上記の電子ダイナミクスにより、一次元ポテンシャルを形成しようとする。しかしポテンシャル強度が強いため、イオンの影響を強く受けて磁場に垂直方向に伝搬する低域混成波と共鳴を起こす。その結果ポテンシャルは磁場に垂直方向に分割され、孤立した二次元構造になることを明らかにした。このような共鳴結合はこれまでにない新しい考え方であり、学術上非常に大きな成果である。

よって、本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成12年2月18日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。