

|           |                                                                                                                                                                                         |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名       | 矢 島 彰                                                                                                                                                                                   |
| 学位(専攻分野)  | 博 士 (理 学)                                                                                                                                                                               |
| 学 位 記 番 号 | 理 博 第 2304 号                                                                                                                                                                            |
| 学位授与の日付   | 平 成 13 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    | Electrostatic particle simulations of the weak double layer in the auroral plasma including the effects of up-flowing ions<br>(上向きイオンビームの効果を取り入れたオーロラプラズマ中のウィークダブルレイヤーに関する静電粒子シミュレーション) |
| 論文調査委員    | (主 査) 教 授 町 田 忍 教 授 荒 木 徹 教 授 家 森 俊 彦                                                                                                                                                   |

### 論 文 内 容 の 要 旨

極地方の夜空を彩るオーロラは超高層大気が発光現象であり、上空で生成された高速の電子が電離層中に降り込み、その領域の中性大気と衝突することによって発生する。オーロラの代表として知られるカーテン状のディスクリートアーク上空を飛行するロケット・人工衛星の観測から、この形状のオーロラを発光させる降下電子は沿磁力線方向に数 keV～10数 keV もの加速を受けていることが明らかになっている。さらに、この電子加速は沿磁力線方向に発生した電場の作用によることが判明している。この沿磁力線方向の電場を生成させ、粒子を加速させる機構を解明することは、単にオーロラの物理過程を理解するにとどまらず、広く、天文学、宇宙物理学、また、その基盤に位置するプラズマ物理学等の分野において、重要なテーマである「粒子加速」の一角を解明することを意味する。オーロラ領域に沿磁力線電場を発生させ、粒子を加速させる実体として、現在、最も有力視されているのは Weak Double Layer (WDL) と呼ばれる構造である。WDL は、沿磁力線電流によって励起されるイオン音波の非線形的な発展の結果として形成され、電子温度と同程度の沿磁力線方向の電位差を持っている。その構造一つあたりに伴う電位差は小さいが、それらが多数連なることによって、数 kV から10数 kV におよぶ電位差を形成し、電子を加速するものと考えられている。

無衝突プラズマ中における WDL はプラズマ粒子シミュレーションによって盛んに研究されてきた。その立場からは、位相空間に出現するイオンホールという概念が確立し、実際の衛星等による観測的な立場からはオーロラ粒子加速領域などでみられる静電孤立波という概念がある。従って、WDL の生成・発展・消滅を含めた物理機構をイオンホールと静電孤立波を関連づけた上で理解する要請がある。

また、オーロラ粒子加速領域では、沿磁力線方向の電位差によって、電子が下向き（電離層側）に加速されるのみならず、逆の電荷を持ったイオンが上向き（磁気圏側）に加速されてゆくことが観測的に明らかになっており、従って、その上向きイオンビームが WDL の形成に与える影響について考察し、その存在を含めたオーロラ粒子加速機構のシナリオを構築する必要がある。

本学位申請論文の研究では、上記の要請に応えるために、磁力線方向を空間座標軸に設定した1次元静電粒子コードによる数値シミュレーションを実施した。初期条件として、電離層起源の冷たいイオン、磁気圏起源の電子、電離層起源の上向きイオンビームを一様に分布させ、境界条件として、電流が常に一定に保たれるという制約を課し、系の時間発展を追った。

その結果、モードの異なるイオン音波から二種類の WDL が形成されることを見いだした。本研究で、負のポテンシャルをもつ孤立波が時間発展して形成された WDL をタイプ1と呼び、正のポテンシャルをもつ孤立波が時間発展したものをタイプ2と呼ぶことにしたが、従来の研究で存在が確認されていた WDL は、タイプ1 WDL に対応している。

シミュレーションの結果、まず、上向きイオンビームの密度が静止した冷たいイオンの密度に対してその比が増すことによって、タイプ1 WDL の性質が変化することを見いだした。密度比が増加することによって、タイプ1 WDL の両端の電位差は小さくなり、寿命が長くなる。電位差は孤立波の振幅の大きさに相関するものであり、この振幅の大きさは孤立波の

速度に依存する。密度比の増加によって孤立波の速度が減少し、結果としてタイプ1 WDLの両端の電位差は小さくなると理解される。

寿命が長くなることについては、二つの要因を見いだした。ひとつは孤立波の振幅が小さくなることによって、電子との単位時間当たりの運動量交換が少なくなることである。電子との運動量交換によって、タイプ1 WDLは加速され、位相空間上において冷たいイオンの分布する領域を横切り、そして消滅する。この横断に要する時間を見積もる際に、イオンホール運動に関する理論が適用可能であることを示した。また、別の要因として、位相空間上においてタイプ1 WDLが、冷たい静止イオンの領域から、引き続き、上向きイオンビームの領域に入りこんでゆくことが発見された。

タイプ2 WDLは上向きイオンビームの存在下においてのみ形成され、本研究において、初めて存在が確認された新しいタイプのWDLである。タイプ1 WDLとは電場極性の空間構造が異なり、また、電位差もやや小さく、周囲に比べて密度が増大するという特徴があるが、電子を電離層側へ加速する点においては同一である。

タイプ2 WDLの寿命は、隣どうしの同一タイプのWDLで反射された電子が、お互いの電子分布関数の構造を乱すことによって決定されること、また、運動論的な効果を取り入れた孤立波の基礎方程式によって振幅や空間長が説明されることが明確にされた。

さらに、タイプ2 WDLが存在するためには、上向きイオンビームのドリフト速度に制限があることが見いだされたが、これはオーロラ粒子加速領域の全域で、タイプ2 WDLが形成されているわけではないことを示す。タイプ2 WDLは、タイプ1 WDLによってイオンビームが加速されることによって形成可能となり、さらに電子を加速することによってタイプ1 WDLの電位差が大きくなるという正帰還回路を構成していることが予想される。

## 論文審査の結果の要旨

本学位論文において申請者は、オーロラ粒子加速領域におけるイオン音波の励起とその非線形的な発展による静電孤立波の形成、さらにそれが発展した静電 Weak Double Layer (WDL)の生成・消滅過程を1次元静電粒子コードを用いて数値シミュレーションを行い、一連の物理過程を解明すべく研究を遂行した。

現実のオーロラ加速領域では磁力線に沿って磁気圏に向かう静電的な電場が生成され、それによって電子が下方の電離層に向かって加速される。それと同時に、イオンは磁気圏側に上方に向かって加速されるので、オーロラ加速領域の高々度の部分では、イオンビームの存在を含めてモデルを構築する必要がある。しかしながら、これまでのWDLのモデルでは、その様なイオンビームの存在が考慮されていなかった。申請者は、この点に着目して、従来のモデルに、新たにイオンビーム成分を加えて、モデルの再検討を行った。

その結果、従来から知られる電離層方向に伝搬するイオン音波に加えて、反対方向に伝搬する新しいイオン音波が系内に励起されることを見いだした。さらに、これらが共に、電場のエネルギーを空間的に局在化した静電孤立波へと発展し、さらに、その構造の両端における電位差がゼロでなくなって静電WDLが形成される過程を見いだした。申請者は、前者の電離層に向かうWDLをタイプ1 WDL また、後者の磁気圏に向かうものをタイプ2 WDLと呼ぶことを提唱したが、タイプ2 WDLは、今回の研究によって発見された、新しいタイプのWDLである。

タイプ2 WDLは、タイプ1 WDLが中央部で周囲に比べて負の電位、また低い電子・イオン密度を持つのに対して、正の電位で高い密度を持ち、また、その電位の最大振幅は、やや小さいことを見いだした。ただし、両者が共に、磁気圏側で、より高い電位を有することで共通しており、電子を電離層側に、また、イオンを磁気圏側に加速する性質を持っている。

申請者は、両方のタイプのWDLが、共に、完全に定常で安定に存在するのではなく、生成と消滅を繰り返して存在することを見だし、その寿命とさらに振幅に関して、解析理論的な扱いによって解釈を試みた。特に、静止した冷たいイオン成分に対するイオンビーム成分の密度の比が増大すると、タイプ1 WDLに発展する前の静電孤立波の伝搬速度が減少し、それが、タイプ1 WDLの振幅を減少させることを波動粒子相互作用の観点から説明することに成功した。また、寿命に関しては、イオンホールに関する運動量交換の理論を適用することによって、数値的に良い精度で予想を与えることに成功した。その際に、イオンビームが十分に存在すると、位相空間上でタイプ1 WDLに対応したイオンホールが静止イオン成分の領域を動いた後に、イオンビーム成分の位相空間領域にまで引き続き運動してゆくために寿命が延びる、極めて興味深い

過程を見いだした。

また、タイプ2 WDLに関して、その寿命が隣りどうしのタイプ2 WDLで反射された電子が、お互いの安定な電子分布関数の構造を乱すことによって、崩壊してしまうことを見だし、その性質に着目して理論的に予測を行い、シミュレーション結果を説明したが、この観点も興味深く、高く評価される。

本論文では、さらに、運動論的な効果を取り入れた孤立波に関する基礎方程式を用いて、タイプ2 WDLの振幅や空間特性長がその方程式の解と近似的に一致していることを示した。これは、自己無撞着な数値シミュレーションによって求めた結果に対して、解析理論的な解釈を与え、より一層、結果の信頼性を高めたという観点から評価される。

シミュレーションの結果から推定して、オーロラの加速領域では、先ず、タイプ1 WDLが生成され、そこでイオンが上向きに加速され、より高い高度に移動してゆくことが予想される。そこでは、タイプ2 WDLの寄与が重要となってくる。また、タイプ2 WDLで加速された電子が下方に運動してゆき、電子ビームの速度を高めるために、タイプ1 WDLがさらに成長し、一連の過程が正帰還的に発展してゆく可能性のある事を指摘した。この予想の観測的な検証は、さらなる研究の成果を待つ必要があるが、興味深い予測を与えたことで意義が認められる。

本学位申請論文の研究は、オーロラの粒子加速領域に必然的に発生する加速イオンビームの存在を考慮して、モデルの構築を行った結果、新しいタイプのWDLを発見して、その性質を従来から知られているタイプのWDLを含めて、解析理論と照らし合わせて、確固たる理論的な基盤を与え、今後の関連分野の研究に、重要な示唆と、新しい研究の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判断した。なお、平成13年2月1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い、合格と認めた。