

氏名・(本籍)	わた なべ とも ひこ 渡 邊 智 彦
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理博第1306号
学位授与年月日	平成5年3月25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	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Simulation Studies on Auroral Arc Formation and Related Electrostatic Wave-Particle Interactions (オーロラアーク形成並びに関連する波動粒子相互作用のシ ミュレーション研究)
論文審査委員	(主査) 教 授 大 家 寛 教 授 福 西 浩 教 授 斎 藤 尚 生 助 教 授 森 岡 昭 助 教 授 岡 野 章 一

論 文 目 次

Abstract

Acknowledgments

Chapter 1 Introduction

1. 1 Preliminary remarks

1. 2 A review on studies on auroral arc formation

1. 2. 1 Brief history of previous works

1. 2. 2 Mechanism of the feedback interections associated with auroral electron
precipitation

1. 3 A review on studies on wave-particle interactions associated with auroral electron

precipitation

1. 4 Objectives and outline of this thesis

Part I Simulation Study on Self-Excitation of Auroral Arcs

Chapter 2 Local and Global Development of Auroral Arcs and Field-Aligned Potentials

2. 1 Introduction

2. 2 Numerical model and procedure

2. 2. 1 Governing equations and boundary conditions

2. 2. 2 Models of parallel resistivity and ionization effect

2. 2. 3 Numerical procedure

2. 3 Simulations without ionization: Dark arcs

2. 3. 1 A long time simulation run

2. 3. 2 Global distribution of auroral arcs

2. 4 Simulations with parallel potential generation and ionization: Bright auroral arcs

2. 4. 1 Generation of V-shaped parallel potential in the feedback system

2. 4. 2 Stabilization by nonlinear phase-mismatching

2. 4. 3 Ionization effect

2. 5 Discussion

2. 6 Summary

Part II Simulation Study on Electrostatic Wave-Particle Interactions

Chapter 3 Competing Process of Electrostatic Plasma Waves Excited by Auroral Electron Beam

3. 1 Introduction

3. 2 Observation results of the EXOS-D satellite

3. 3 Simulation of the competing processes

3. 4 Discussion and conclusion

Chapter 4 Parallel and Perpendicular Wave-Particle Interactions due to Beam-Excited Electrostatic Waves

4. 1 Introduction

4. 2 Simulation model

4. 3 Results

4. 3. 1 Simultaneous excitation of parallel and oblique mode waves

4. 3. 2 Wave-particle interaction processes

4. 3. 3 Time evolution of the velocity distribution function

4. 3. 4 Dependence of the perpendicular heating on the plasma parameter, ω_p/Ω

4. 4 Discussion and conclusion

Chapter 5 Concluding Remarks

Appendix

References

論文内容要旨

第一章 序論

地球の極域に出現するオーロラ現象は、一般に太陽風と地球磁気圏の相互作用の結果生ずると考えられており、磁気圏前面や尾部での磁気リコネクション、沿磁力線電位差による粒子加速などのエネルギー変換過程を経て、太陽風から電離層へ至るエネルギー流入過程の最終段階における現象としてとらえられている。こうしたオーロラ現象の中でも、地磁気静穏時に常時観測される東西方向にのびた静穏なオーロラアークは、地球磁気圏-電離層結合系に特有の電磁力学過程を通じて発生すると考えられる。その静穏なオーロラアークの励起機構として、地球磁気圏と電離層をつなぐ3次元電流回路でのフィードバック不安定性による発生機構がSato [1978]により論理的に提案され、オーロラアークの生成・発達過程に関して理論的示唆を与えている。これまでもその理論に基づいていくつかのシミュレーション研究がなされており、磁気圏と電離層の相互作用の重要性が認識されてきている。

一方、オーロラ現象の発達に伴い、オーロラ粒子降下域中で様々なプラズマ波動現象が引き起こされる。宇宙空間におけるプラズマ波動現象の多くは線形不安定性理論の枠内で論議され、観測結果とも良い一致を示しているが、近年、波動粒子相互作用の非線形性が本質的な役割を果たしている現象の存在が明らかとなってきた。特に、オーロラ降下電子によるビーム不安定性を源として成長する静電的プラズマ波動は、プラズマを構成する荷電粒子と強く相互作用する。この静電的波動粒子相互作用は、不安定性の発達における準線形もしくは非線形段階において、背景電子の異常加熱や降下電子の速度空間内での拡散をもたらし、オーロラ領域でのプラズマの諸特性に大きく影響する。こうした静電的波動粒子相互作用の重要性は、オーロラ現象の総合的解明を目指した科学衛星 EXOS-D (あけぼの) の観測により明らかにされてきている。

本論文は、オーロラ領域における巨視的現象と微視的現象の両方について計算機シミュレーションの手法を用い、線形段階から非線形段階にわたって定量的にオーロラ現象を解明していくことを目的としている。従って、本論文は主として二つの部分から構成されている。まず、第一部において、オーロラアークの大域的な発達特性、フィードバック不安定性の非線形発展、さらに、沿磁力線電位差の形成を伴うオーロラアークの発達過程について研究を行った。ここではプラズマの巨視的力学を扱う三次元磁気流体シミュレーションの手法を用いた。第二部では、EXOS-D衛星に搭載されたプラズマ波動観測装置(PWS)の観測データに基づき、オーロラ領域での静電的波動粒子相互作用について研究を行った。ここではプラズマの微視的・運動論的性質を取り入れた粒子シミュレーションの手法を用い、オーロラ電子降下現象に伴うプラズマ波動成長の競合過程、非線形波動粒子相互作用を明らかにした。

第一部 オーロラアークの自発的生成に関するシミュレーション研究

第二章 オーロラアークの局所的・大域的発達と沿磁力線電位差

地球磁気圏－電離層結合系のシミュレーションモデルを用いて、磁気圏と電離層のフィードバック相互作用によるオーロラアークの発生過程の研究を行った。ここでは、磁気圏を電磁流体モデルで表し、電離層を簡約化された二流体プラズマで表現した。これらの方程式系を解くことにより、電磁力を介して結合した磁気圏と電離層の相互作用を調べることができる。

まず始めに、沿磁力線電位差の形成を伴わない場合のオーロラアークの大域的な分布と非線形発展を明らかにした。その結果をまとめると、フィードバック不安定性によるオーロラアークの大域的な発達特性は、磁気圏赤道面内のプラズマ対流パターンに主に依存し、また、対流分布が朝夕半球で対称な分布を持つ場合にも、オーロラアークの発生分布は朝夕非対称性を示すことが分かった。また、様々な対流分布を与えてシミュレーションを行った結果、その大域的なオーロラアーク発達の朝夕非対称性は、電離層電流の非対称な分布に起因することが確かめられた。さらに、電離層中の荷電粒子の再結合によるプラズマ損失の効果は、昼夜半球でのオーロラアークの大域的な分布の相違を生ずると共に、その非線形性は電離層密度攪乱の非線形発展に大きく影響する。この非線形効果はオーロラアークの成長を抑え、アークにともなう沿磁力線電流回路を作り替えて、新たに別のオーロラアークの非線形成長をもたらすことが明らかとなった。

次に、沿磁力線電流の発達によって生ずる微視的なイオン音波不安定性の準線形緩和過程に着目し、これによって引き起こされる沿磁力線抵抗をモデル化して、磁気圏の電磁流体モデルに導入した。その結果、オーロラアークに伴う上向き沿磁力線電流の発達に応じて局所的に約200 V程度の沿磁力線電位差が形成された。この時、沿磁力線電位差の発達にともなって、オーロラアークの成長は次第に抑えられていく。これは、沿磁力線抵抗の発生により磁気圏の等価インピーダンスが変化し、フィードバック不安定性が安定化されてくるためである。このことは微視的なプラズマ波動現象と巨視的な電磁流体现象の非線形結合がオーロラアークの発達に重要な役割を果たしていることを示している。さらに形成された沿磁力線電位差に応じて、降下電子による電離層中性大気電離効果を導入したシミュレーションを行った。その結果、電離率がある程度高い場合には、沿磁力線抵抗による安定化効果を上回り、オーロラアークの成長が非常に活発化されることが見いだされた。

第二部 静電的波動粒子相互作用に関するシミュレーション研究

第三章 オーロラ電子ビームにより励起されたプラズマ波動の競合過程

本章では、オーロラ粒子降下域での高域混成波 (UHW) と低域混成波 (LHW) の成長の競合過程について研究を行った。まず始めに、EXOS-D 衛星に搭載された PWS 装置の観測結果を解析することにより、昼側オーロラ領域においてプラズマ密度の増減に呼応し、卓越して観測される波動モードが UHW と LHW とで切り替わる現象が見いだされた。そこでは、 $f_p > f_c$ の条件で UHW が、 $f_p < f_c$ では LHW が主に観測された (f_p はプラズマ周波数、 f_c は電子サイクロロン周波数を表す)。この観測事実は UHW と LHW の成長段階での競合過程が、実際にオーロラ領域で起きていることを強く示唆している。

さらに、超粒子モデルを用いた一次元静電粒子シミュレーションを行い、EXOS-D 衛星で観測された UHW と LHW の強度が切り替わる現象が、降下電子によるビーム不安定性の結果として理解され得ることを確かめた。シミュレーションでは、波数ベクトルが磁力線に対し小さな角度をなす UHW と LHW がそれぞれ $fp > fc$, $fp < fc$ の条件の下で優先的に励起された。この結果は EXOS-D 衛星の観測結果と良い一致を示している。

第四章 ビームにより励起された静電波と粒子の並行及び垂直方向の相互作用

ここでは二次元静電粒子シミュレーションを行い、様々な方向の波数ベクトルを持つ静電波が電子ビームにより励起される過程、さらに成長した一群の波動がもたらす非線形波動粒子相互作用について研究を行った。その結果、十分に大きなシミュレーション領域を用いた場合には、並行方向に波数ベクトルを持つ静電波が優先的に励起されることに加え、斜め方向に波数ベクトルを持つ波動も同時に電子ビームによって励起され得ることが示された。このとき、励起された静電波はいずれも UHW と LHW の競合過程の結果成長したものであり、 $fp > fc$ では UHW, $fp < fc$ では LHW が卓越した。

また、いずれの場合においても、電子ビームにより励起された静電波は、背景電子を磁力線に並行方向に効率的に加速した。さらに、 $fp > fc$ の場合に副次的に励起される斜め方向に波数ベクトルを持つ UHW は、ビーム不安定性の発展における線形及び非線形段階において、磁力線に垂直方向に背景電子を加熱することが見いだされた。一方、 $fp < fc$ の場合に励起された LHW は垂直方向の加熱は起こさなかった。この背景電子加熱の相違は UHW と LHW の準線形緩和過程の特徴を反映している。このように、励起される波動モードの種別に加え、背景電子の加熱過程も fp と fc の条件に依存して変化することが明らかとなった。このシミュレーション研究はオーロラ粒子降下域での電子加熱について有用な示唆を与えている。

第五章 結論

この章ではオーロラアークの自発的発生、及びオーロラ現象に関連した静電的波動粒子相互作用についての本論文での研究成果をまとめている。本論文では、主として計算機シミュレーションの手法により、オーロラ領域での電磁流体プラズマ現象と運動論的プラズマ波動現象の双方について研究を行ってきた。この一連の研究は、非常に多様性に富むオーロラ現象を、微視的スケールと巨視的スケールの両面からとらえたものである。その結果、オーロラ現象においては、微視的現象と巨視的現象の非線形結合が重要な役割を果たしているという知見を得ることが出来た。これは、今後のオーロラ現象の研究に有用な示唆を与えるものである。また、本研究の特徴的なところは、計算機シミュレーションの結果の検討にとどまらず、実際に観測を行っている EXOS-D 衛星データと対比できることにある。今後、巨視的、微視的の差を問わず、観測された自然現象の本質を理解するための計算機シミュレーションの重要性を確認するものとなっている。

論文審査の結果の要旨

渡邊智彦提出の論文は、宇宙空間プラズマにおける最も大きな問題とされているオーロラの発生機構と、オーロラ発生にかかわる粒子加速の結果生ずるプラズマ波動に関し、大規模なコンピューターシミュレーションを行ったものである。また結果は、実際観測された現象をコンピューターシミュレーションを通じてその複雑な現象の解明に成功したのである。なお論文は、オーロラの静穏時アーク構造と変化にかかわる巨視的スケールのシミュレーションを行った第一部とオーロラ粒子の降下にともなって発生するプラズマ波動の解明を行った微視的スケールのシミュレーションにかかわる第二部よりなっている。

第一部では、静穏時、オーロラアークの究明を目的として磁気圏プラズマ対流にもとづく発電現象と極域の電離層中の電流及び密度の変化を起こす粒子の流入を沿磁力線電流で結合するシステムを取り扱い、フィードバック不安定性の発達がオーロラを生むメカニズムを三次元的にシミュレーションしている。その結果は、磁気圏の対流域が対称でもオーロラアークは、電離層状態の非対称を反映して、非対称になること、フィードバック系の自己振動性を反映して多数の微細構造をもつ等、実際観測されている事実を説明する重要な知見を得た。さらに沿磁力線電流中に生ずる波動等の障害によって惹起する抵抗が原因で静穏時でも200 Volt に達する加速電位差が生じうることを示した。

第二部はオーロラの沿磁力線電場によって加速される粒子の降下によって発生するプラズマ波動について、250万個の粒子を取り扱う粒子コードによってシミュレーションを行った。その結果、

- i) 電子ビームによって励起される静電的プラズマ波動は、周囲プラズマの密度が高く $f_p > f_c$ (f_p : プラズマ周波数, f_c : 電子サイクロトロン周波数) の時、高域ハイブリッド波が卓越する。また $f_p < f_c$ の時、低域ハイブリッド波が卓越することを明らかにした。これは EXOS-D 衛星の観測結果と一致するものである。
- ii) 二次元のシミュレーションで、高域ハイブリッド波の発達によりプラズマが加熱されることが実証された。特に、ビームによって磁力線方向に加速される以外、磁力線に直角方向にも加熱されるというプラズマ物理学上貴重な知見も得られた。

以上、渡邊智彦提出の論文は、高い独創性をもつとともにオーロラ形成及び、宇宙空間プラズマ研究において多大な貢献をするものであり、また著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示していて、博士（理学）の学位として合格と認める。