

京都大学	博士 (工学)	氏名	野 儀 武 志
論文題目	Study on Whistler-mode Triggered Emissions in the Magnetosphere (磁気圏におけるホイッスラーモード・トリガード放射の研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、磁気圏におけるホイッスラーモード・トリガード放射の発生をホイッスラーモード波の非線形成長理論と計算機シミュレーションにより明らかにしたものである。本論文は6章から構成される。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の背景となる、地球内部磁気圏やホイッスラーモード・トリガード放射に関する研究の歴史的経緯について概説している。地球の磁気圏には放射線帯が存在しており、ホイッスラーモード波動が波動粒子相互作用によって放射線帯の生成・消失に寄与することを、先行研究をもとに総括している。また、ホイッスラーモード・トリガード放射とホイッスラーモード・コーラス放射の特徴と類似性について述べ、ライジングトーン放射およびフォーリングトーン放射の生成の鍵となる非線形波動粒子相互作用について述べている。電磁粒子シミュレーションを用いてホイッスラーモード・トリガード放射とコーラス放射を再現した先行研究と理論検討について総括し、ライジングトーン放射やフォーリングトーン放射の初期段階で共鳴電流が生成される過程が明らかでないことを指摘している。また、ホイッスラーモード波動の振幅が時間的に変化するサブパケット構造が生成される素過程も明らかでないことを述べている。</p> <p>第2章では、ホイッスラーモード・トリガード放射に対する電磁粒子シミュレーションの数値モデルと計算手法について述べている。内部磁気圏の磁気赤道近傍を再現する背景磁場モデルとして円筒型の一次元放物線モデルを採用している。一次元放物線モデルにおける超粒子の運動方程式の解法について、Buneman-Boris法に修正を加え、磁気モーメントの精度を向上しつつサイクロトロン運動での速度ベクトルを導出する手法に関して説明している。また、一次元放物線モデルでの、熱い電子の位相空間内の初期分布を与える新たな手法の提案を行っている。ホイッスラーモード波動と電子における波動粒子相互作用の理解において、サイクロトロン共鳴をする波動と電子の位相関係が重要である。そのため外部磁場に対して、磁場・反磁場の両方向に伝搬するホイッスラーモード波の分離が必要である。ここでは、離散フーリエ変換を用いて、磁場方向、反磁場方向に伝搬するホイッスラーモード波を分離する手法に関して述べている。これにより、各シミュレーションステップで、励起されたホイッスラーモード波動を分離して共鳴電流を計算することが可能となり、物理を理解する上で、現象をシンプルにすることに成功している。そして更に、位相空間での電子密度分布の計算に関して、磁力線に平行な速度と共鳴速度との差に基づいて異なる垂直速度の電子の寄与を合算する手法を提案している。</p> <p>第3章では、ライジングトーン放射の生成過程における非線形特性について述べている。周波数が緩やかに上昇するライジングトーン放射を再現し、波動の振幅成長と周波数変化の過程を非線形波動成長理論との比較をもとに述べている。ライジングトーン放射の生成過程においては、速度位相空間に電子密度が減少した電子ホールが生成されることを示している。生成されたライジングトーン・トリガード放射は、振幅の変調であるサブパケット構造をもち、生成領域が、波動の上流に移動していくことを明らかにした。そして、生成領域の移動速度は、ホイッスラーモード波動の群速度と粒子のサイクロン共鳴速度に依存することを示した。ライジングトーン放射の生成領域が波動の上流に移動するため、持続時間の長いライジングトーン放射のサブパケットが生成される。ライジングトーン放射の生成過程で、位相空間に電子ホールが生成され空間的な広がりをもつことで、ライジングトーン放射のサブパケットが継続的に成長することを示した。一方、短いサブパケットの生成は、ライジングトーンの生成領域で電子ホール内に捕捉された電子による共鳴電流の振動によるものと、長い持続時間を持つサブパケットが下流に伝搬する過程で2つの短いサブパケットに分かれることにより生じるものがあることを明らかにした。</p> <p>第4章では、ライジングトーン放射の生成領域が、トリガー波の注入点よりも上流へ移動していく現象について述べている。シミュレーションパラメータとして背景プラズマの密度とトリガー波の周波数を変化させて36ケースのシミュレーションを実行し、与えられたプラズマ周波数と励振周波数に対し、ライジングトーン放射が生成される条件が存在することを示した。ライジングトーン</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	野 儀 武 志
<p>放射が生成されたすべての場合で、波動の生成領域は上流へと移動しながらライジングトーン放射が生成されることを示した。そして、生成領域が移動する速度は、サブパケット構造の継続時間に依存し、継続時間は生成領域での共鳴電流の生成により制御されることを示した。生成領域が移動する速度が、電子の共鳴速度とトリガード放射の群速度の和とほぼ等しい場合に限り、長く継続するライジングトーン放射が生成される。共鳴電流が増加する過程と減少する過程が短時間で繰り返して発生することで、サブパケットとサブパケットの間に隙間が生じる。共鳴電子が上流側に移動する効果が卓越し、生成領域の移動速度は電子の共鳴速度に近づく。一方、共鳴電流の生成が遅れる場合、反対方向に伝搬する波動の効果が大きくなり、生成領域の移動速度の絶対値は小さくなる。波動の周波数が電子サイクロン周波数の 0.25 倍を下回る場合、サブパケット構造をもつ波動の伝搬過程で、ライジングトーン放射の過程で生じる周波数の異なる波動が時間・空間的に 1 点に集まる効果が発生し、共鳴電流の生成が妨げられる。</p> <p>第 5 章では、フォーリングトーン放射の生成過程について述べている。大振幅のトリガー波動を短時間磁気赤道から入射することにより、時間とともに周波数が減少するフォーリングトーン放射を再現し、その生成過程でライジングトーンとは特性が異なる共鳴電流が生成されることを示した。そして、シミュレーションで得られた共鳴電流の解析から共鳴速度付近で密度が高くなる電子ヒルが位相空間で生成されていることを示した。フォーリングトーン放射を再現し、フォーリングトーン放射の生成過程で共鳴電流が生成されることを示した。波頭において捕捉された共鳴電子が波動の上流へ移動し、パケットから解放されることにより、減少する波動の強度に比べて相対的に強い共鳴電流を生じ、瞬時周波数が減少することを明らかにした。コーラス波動の非線形成長理論に基づいて、共鳴電流を計算し非線形パラメータの解析を行った。非線形パラメータは、波動の周波数の時間変動からなる項と背景磁場の空間勾配からなる項の 2 つの項が存在するが、フォーリングトーン放射の生成過程で、フォーリングトーン放射が下流に伝搬するに従って、周波数の減少により維持されていた非線形成長が、反対符号の空間勾配の項によって打ち消され、波動の成長が止まることを示した。</p> <p>第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

氏名	野儀武志
----	------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は磁気圏における、ホイッスラーモード・トリガード放射の生成過程で発生する非線形成長の過程を、一次元電磁粒子シミュレーションを用いて解析したものについてまとめられている。本論文は以下の成果から構成される。

1. 周波数が緩やかに上昇するライジングトーン放射を再現し、波動の振幅と周波数の成長過程を非線形波動成長理論との比較をもとに明らかにした。ライジングトーン放射の生成領域が波動の上流に移動するため、持続時間の長いライジングトーン放射のサブパケットが生成される。ライジングトーン放射の生成過程において、速度位相空間に電子密度が減少した電子ホールが生成され、それが空間的な広がりを持つことで、ライジングトーン放射のサブパケットが継続的に成長することを示した。
2. シミュレーションパラメータとして背景プラズマの密度とトリガー波の周波数を変化させて多くのシミュレーションを実行し、ライジングトーン放射が生成されたすべての場合で、波動の生成領域がトリガー波の注入点よりも上流へと移動することを示した。その移動速度は共鳴電子の速度および波の群速度に依存しており、サブパケット構造の生成タイミングと継続時間によって変化することを示した。
3. 大振幅のトリガー波動を短時間赤道から入射することにより、時間とともに周波数が減少するフォーリングトーン放射を再現し、その生成過程でライジングトーンとは特性が異なる共鳴電流が生成されることを示した。共鳴電流の解析から共鳴速度付近で密度が高くなる電子ヒルが位相空間で生成されていることを示した。

本論文は、ホイッスラーモード波動のライジングトーンおよびフォーリングトーン放射の生成過程を、非線形波動成長理論の観点から解析し、非線形成長がトリガード放射の生成過程で支配的であることを示すものであり、ホイッスラーモード・コーラス波動の生成過程の理解に貢献するものである。本論文で用いられたホイッスラーモード・トリガード放射のモデルと同様の能動実験がこれまでに宇宙空間で実施され、また将来においても計画されている。本論文は、これらの能動実験のデータ解析および将来計画において大きな指針を与えるものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： 2023年 3月 30 日以降