

京都大学	博士（工学）	氏名	久保田 結子
論文題目	Study on Variation of Radiation Belt Electron Fluxes Through Nonlinear Wave-Particle Interactions (非線形波動粒子相互作用による放射線帯電子フラックスの変動に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
本研究は Whistler-mode chorus emissions (コーラス放射) 及び Electromagnetic Ion Cyclotron emissions (EMIC 放射) と呼ばれる 2 種類の異なる波との非線形波動粒子相互作用による放射線帯電子の加速・消失過程を定量的に評価したものである。定量評価の方法として、本論文はテスト粒子シミュレーションによる個々の粒子の軌跡の追跡と Green's function method による放射線帯電子フラックス全体の長期的な変動の数値解析用いており、6 章からなっている。 第 1 章は序論であり、本論文の研究背景となる放射線帯の数時間オーダーの急激な変動の観測結果とそれを説明し得る非線形粒子捕捉理論について述べている。また先行研究によるテスト粒子シミュレーション結果を総括し、非線形粒子捕捉プロセスにより放射線帯電子が効率的に加速または大気圏へ降下していることを述べた上で、そのシミュレーション内で用いられたコーラス放射または EMIC 放射のモデルが最近の観測結果から判明した波のより複雑な構造を反映していないことから、本論文で行った波モデル及び Green's function method の改良の必要性を述べている。 第 2 章では観測結果に基づいて改良したコーラス放射のモデル設定とそれによる放射線帯電子フラックス変動の定量的な評価について述べている。先行研究ではコーラス放射は周波数上昇とともに振幅も大きくなると仮定し、そのモデル化した波による keV 帯電子の MeV エネルギーまでの急激な加速過程を確認している。しかし最近の観測結果から、コーラス放射は周波数上昇中に振幅が大きく変動し、その振幅変動により一つのコーラス放射のパケットが細分化していることが判明した。以下、この細分化を subpacket 構造と記す。この観測結果を受け、subpacket 構造を取り入れたものと連続的なものの 2 種類で波をモデル化し、それぞれによる放射線帯電子フラックスの生成過程を評価した。結果、非線形効果により急激に加速されること、subpacket 構造によってその加速機構は効率的ではなくなった一方、より多くの共鳴粒子が加速されるようになることが分かった。また数分スケールの生成過程を通して加速効率の低下と加速粒子数の増大が相殺され、電子フラックスの生成結果には大きな違いが見られなくなることが判明した。 第 3 章では経度方向におけるコーラス波の空間分布を考慮した Green's function method の改良とその改良した手法を用いて数値計算した結果を述べている。統計解析の結果から、コーラス放射は夜明けから昼側にかけて発生しやすい波であることが知られている。一方、従来の Green's function method では、波が経度方向全域に発生していると仮定した場合の結果しか解析することができない。この手法を改良し、局所的に発生した subpacket 構造をもつコーラス放射による放射線帯電子の加速過程を調べた。その結果、MeV 帯電子は高速な経度方向のドリフト運動により数分スケールで波の発生領域から離れてしまい、一時的に加速過程は滞ってしまうが、さらに数分後、地球を一周し波の発生領域に戻ってくるため MeV 帯電子の再加速が起こることがわかった。また 1 時間スケールの観測結果と本章のシミュレーション結果は良い一致を示すことが確認できたことから、短時間（数時間オーダー）での放射線帯高エネルギー電子の発生に非線形波動粒子相互作用が大きく寄与していることを示すことができた。 第 4 章では運動方程式の逐次計算から求めた粒子の軌跡から EMIC 波との相互作用による 2 種類の異なる非線形散乱過程を確認した。先行研究において着目されていた波のポテンシャルによる共鳴粒子の非線形捕捉は波の振幅が大きくなるとその範囲を広げる。その結果、波の振幅が一定の場合は波との相互作用が始まった時点で捕捉範囲に入っていないと効率的な散乱を受けない一方、subpacket 構造をもつ波の場合は波の振幅が変動するため、最初捕捉されていない電子でも波の振幅が増大することにより捕捉範囲に入り、効率的な散乱を受ける場合があることが分かった。しかしシミュレーシ			

京都大学	博士（工学）	氏名	久保田結子
ヨン結果と理論解析から、効率的にロスコーン内まで散乱される粒子について、低ピッチ角からロスコーン付近で生じる散乱はこの粒子捕捉によっては説明できないことが判明した。大気圏に降下した粒子の軌跡をさらに解析したところ、ロスコーン付近では今までゼロと仮定してきた項が無視できない値を持つことが判明し、その項の影響で共鳴速度の値が変化することが分かった。我々はこの散乱がロスコーン付近の低ピッチ角度でのみ発生することから Scattering at Low Pitch Angle (SLPA) と名付け、その必要条件を理論解析から求めることにより、大気圏へ効率的に降下する電子は非線形粒子捕捉と SLPA の 2 つの異なる散乱過程によって説明できることを明らかにした。 第 5 章では第 4 章で述べた EMIC 波の散乱機構により大気圏へ降下した電子数及び地球磁場に捕捉され宇宙空間にとどまり続ける電子のピッチ角分布を定量的に評価した。そして、subpacket 構造に対応して大気圏降下電子フラックスは時間変動し、そのタイムスケールが観測結果と一致していることを明らかにした。また経度方向において局所的に発生した EMIC 放射による散乱で一部消失した放射線帯電子の分布は、経度方向のドリフト効果より数分後に再度確認できることが判明した。その変動した分布は第 4 章の理論解析から求められる散乱機構により説明できることも明らかにした。 第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は 1958 年に発見された地球放射線帯の変動メカニズムを波動の電磁ポテンシャル構造による非線形粒子捕捉という過程に着目して解析したものについてまとめられている。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 数値シミュレーションから、数十から数百 keV 程度のエネルギーを持つ電子の一部がコーラス放射と呼ばれるホイッスラーモード波との非線形波動粒子相互作用により 1MeV から 5 MeV まで数十分で一挙に加速されることを明らかにした。またこの非線形加速による放射線帯電子フラックスの生成は人工衛星の観測結果とよく一致していることから、コーラス放射との非線形相互作用が放射線帯生成の原因であることを定量的に指摘した。
2. EMIC 放射と呼ばれる電磁イオンサイクロトロン波のポテンシャルに捕捉された放射線帯電子はそのピッチ角がロスコーン方向に近づくように効率的に散乱されると先行研究の理論解析において示唆されていた。しかし本論文は、この波の捕捉効果がロスコーン近くでは発生しないことを明らかにした。ロスコーン付近では今まで無視されてきた非線形項が大きな値を持つことを本論文が指摘し、その影響で共鳴速度の値が変化することが明らかとなった。
3. 局所的な経度範囲で発生する上記 2 種類の波による電子分布の局所的変動を定量的に評価した。その結果、放射線帯生成過程が一時停滞すること、および一部が消失した放射線帯電子の分布が経度方向のドリフト効果にて数分後に同じ経度で再度観測できることを示した。

以上の通り、本研究は放射線帯電子フラックスの局所的かつ急激な変動を定量的に評価しており、放射線量の正確な予報によって宇宙機器の損失を防止する等、今後の宇宙ミッションに大きく貢献するものである。またロスコーン付近の新たな共鳴過程の発見などを通して非線形物理素過程への寄与という重要な意義も持ち合わせている。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、平成 29 年 1 月 19 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。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。