

論文内容要旨

(No.1)

氏 名	三 好 由 純	提出年	平成 1 2 年
学位論文の 題 名	Dynamics of the outer radiation belt associated with magnetic storms (磁気嵐時における放射線帯外帯の変動に関する研究)		

論 文 目 次

Acknowledgements

Abstract

Chapter 1. Introduction

- 1.1 Historical Background
- 1.2 Dynamics of Radiation Belt during Storm Time
- 1.3 Response to Interplanetary Media and Geomagnetic Disturbances
- 1.4 Some Proposed Mechanisms for Storm Time Flux Enhancement
- 1.5 Purpose and Scope of this Thesis

Chapter 2. Instrumentation

- 2.1 Introduction
- 2.2 EXOS-D Satellite
- 2.3 TIROS/NOAA Satellites
- 2.4 LANL Satellites

Chapter 3. Dynamics of the Outer Radiation Belt during the November 3, 1993 Storm

- 3.1 Introduction
- 3.2 November 3, 1993 Storm
- 3.3 Summary of Previous Observations for the November 3, 1993 Storm
- 3.4 Electron Dynamics
- 3.5 Electric Field
- 3.6 Plasma Waves
- 3.7 Discussion on the Electron Dynamics
- 3.8 Summary

Chapter 4. Numerical Study : Part-I, Radial Diffusion

- 4.1 Introduction
- 4.2 Radial Diffusion Model Formulation
- 4.3 Results and Discussion
- 4.4 Summary

Chapter 5. Numerical Study : Part-II, Energy Diffusion

- 5.1 Introduction
- 5.2 Resonant Diffusion via Wave-Particle Interactions in the Phase Space
- 5.3 Simulation of Stochastic Acceleration
- 5.4 Discussions
- 5.5 Summary

Chapter 6. Statistical Analysis

- 6.1 Introduction
- 6.2 Relationship between Relativistic Electrons and Related Parameters
- 6.3 Relationship between Hot Electrons and Relativistic Electrons
- 6.4 Effects of Substorms on the Outer Belt Electron Flux Enhancement
- 6.5 Summary and Discussion

Chapter 7. Discussions

- 7.1 Generation Process of Reappeared Relativistic Electrons during the Magnetic Storms
- 7.2 Flux Enhancement at the Geosynchronous Orbit
- 7.3 Some Comments and Future Directions

Chapter 8. Concluding Remarks

References

論文内容要旨

1. 序

放射線帯は、相対論的エネルギーの粒子が地球近傍に捕捉されている領域であり、地球磁気圏において最もエネルギーの高い粒子が存在する領域である。1958年に Van Allen によって放射線帯が発見されて以来、1960~70年代を通じて精力的な研究が行われ、放射線帯の構造及び加速に関わる物理過程は、radial diffusion と呼ばれる外部磁気圏の高エネルギー粒子のソースから内部磁気圏への断熱輸送過程で説明されるとの認識が確立されている。しかし、1990年代の CRRES、SAMPEX 衛星をはじめとする観測によって、磁気嵐時に放射線帯外帯がきわめて大きく変動し、その変動が従来の radial diffusion 過程では説明できないことが指摘され論争を呼んでいる。一方、人工衛星、宇宙ステーションなど人類の大気圏外の活動の進展にともなって、相対論的電子によるこれらの機器への影響の深刻さが認識され、放射線帯の物理の解明は"space weather"研究の中で最重要課題に位置づけられるようになった。こうした背景のもとで、特に磁気嵐時における放射線帯の変動について、各国で精力的な研究が行われてきている。現在、磁気嵐時における放射線帯の研究の焦点は、(i)磁気嵐主相での外帯の消失、(ii)磁気嵐回復相での外帯の再形成である。本研究では特に(ii)の磁気嵐回復相における外帯再形成過程のメカニズムの解明を目的として、まず観測データの事例・統計解析を行い、磁気嵐時の外帯電子のダイナミクスを明かにした。次いで、計算機実験により加速過程の物理機構を検証し、外帯再形成過程のシナリオを提唱した。

2. 解析

本研究では、EXOS-D、NOAA、LANL をはじめとする複数の衛星データならびに地上の磁場チェーンのデータ解析を行った。1990年代の他の研究が主として相対論的電子の変動のみを扱っていたのに対し、本研究では相対論的電子の他にプラズマシート起源の電子及びプラズマ波動のデータも解析し、磁気嵐時の内部磁気圏領域での"場"と"粒子"の変動について検討を行った。本論文では、"space weather event"として知られている1993年11月3日に発生した典型的な回帰性磁気嵐時の現象についての詳細な事例解析を示した。解析より得られた主要な結果は以下である。

(**粒子フラックス**) 磁気嵐主相において外帯相対論的電子は消失する。この時、プラズマシートからの hot electron が外帯領域に注入される。一方、主相後半から回復相にかけて、外帯相対論的電子フラックスは、外帯の内側(プラズマポーズの外側)かつ低エネルギー側から回復・増大する。

(エネルギースペクトル) 磁気嵐主相において、外帯電子のエネルギースペクトルはハードからソフトに転じる。主相後半より、エネルギースペクトルは外帯の内側から再びハードに変化し、その領域は外帯の外側へと拡大する。

(ピッチ角分布) 外帯相対論的電子フラックスの回復・増大過程において、ピッチ角分布がパンケーキ型の分布を示す。すなわち、フラックスの回復はまず磁力線に垂直方向の電子から開始する。

(phase space density) 磁気嵐前は、外帯の phase space density は、inward radial diffusion で予想されるゆるやかな内向きの密度勾配を示すが、磁気嵐開始後に外帯の phase space density は消失し、その後、主相後半から回復相にかけてプラズマポーズの外側において密度のピークが出現し、phase space density は増大する。

(whistler 波動) 磁気嵐開始後に、収縮したプラズマポーズのすぐ外側において強度の強い whistler mode の波動が観測される。その後、この波動は磁気嵐主相~回復相にわたって外帯全域で発生する。

これらの観測事実のうち、～ は従来の外部からのエネルギー粒子の inward radial diffusion 過程では説明できないものであり、磁気嵐時に放射線帯内部において相対論的電子が作られていることを強く示唆している。また、及び の解析は、磁気嵐時に再出現した相対論的電子はプラズマシートから注入された hot electron が加速されて形成された可能性を指摘するものである。一方、 の whistler 波動の周波数の検討から、観測された whistler 波動は、電子密度が低い領域(すなわちプラズマポーズの外側)において波動粒子相互作用によって energy diffusion を起こすことが可能な波であることが示された。また、他の磁気嵐についての事例解析もあわせて行い、外帯相対論的電子フラックスが増大する回帰性磁気嵐については、これらの観測事実が一般的に見られる現象であることを明かにした。

3. 数値実験

(radial diffusion) 本研究では、Fokker-Planck 方程式によって記述される radial diffusion において、磁気嵐時の環電流の発達による内部磁気圏の磁場の変化の効果を取り込んだ数値計算コードを開発した。実際の磁気嵐時の状況を検討するために、境界条件に静止軌道衛星のリアルタイムの実測データを用いるとともに、粒子の輸送係数、ライフタイム等を実際の地磁気の擾乱にあわせて時間変化させて、計算を行った。数値実験の結果は、磁気嵐主相での外帯相対論的電子の消失、それに続く外帯内側、低エネルギー側からのフラックス回復の様相を定性的に再現した。しかし、エネルギースペクトル、phase space density については、計算結果は観測事実と逆の傾向を示した。すなわち、観測された変化はすべて外帯の内側から始まり外側へと拡大していくのに対し、計算結果は外帯外側から内側に向かう変化を示した。この結果は、磁気嵐時の外帯再形成過程が、従来考えられていた外部磁気圏からの inward radial diffusion によるものではなく、外帯内部でのローカルな加速過程によるものであることを強く示唆している。

(energy diffusion) 次に、観測から示唆された whistler 波動と hot electron との波動粒子相互作用によって、相対論的電子が形成される過程について検討を行った。まず、R モードの波動と電子との波動粒子相互作用の検討を行い、粒子の速度空間での軌跡を数値的に追跡

した。様々なプラズマ環境を仮定して検討を行った結果、電子密度の低い領域（プラズマ圏の外）では、波動粒子相互作用によって粒子の加速が可能であり、粒子はピッチ角 90 度方向に加速されることが判明した。この結果は観測事実の 及び によく対応し、プラズマ圏の外側で発生した強い whistler 波動が粒子を加速し得ることが示された。次に、whistler 波動と粒子の間の統計的な加速を記述する Fokker-Planck 方程式の数値計算コードを開発し、波動粒子相互作用による energy diffusion 過程の検討をさらに進めた。数値実験のシナリオとして、磁気嵐時に注入された hot electron が whistler 波動によって相対論的エネルギーまで加速される過程を検討した。注入された hot electron の分布として Maxwell 分布を仮定し、実際に観測された値をもとに数値実験の諸パラメータを導出して計算を行った結果、波動粒子相互作用によって Maxwell 分布から high energy tail が形成され、スペクトルがハードに変化する様相が再現された。さらに、このシナリオのもとで、加速によって形成される相対論的電子フラックスの時間・空間変化について計算を行ったところ、外帯内側の低エネルギー側から相対論的電子の回復が始まるとともに、エネルギースペクトルがハードに変化する様子が再現された。

4 . 外帯再形成過程のシナリオ

以上の解析、数値実験をもとに、磁気嵐時の放射線帯外帯再形成過程について、以下のシナリオを提案した。すなわち、磁気嵐時にプラズマシートから内部磁気圏に注入された hot electron がサイクロトロン共鳴によって whistler 波動を励起し、その励起された波が伝搬する過程で注入された hot electron のうちエネルギーの高いものを加速し、相対論的電子を作り出し、外帯が再形成される。このシナリオにおいては、内部磁気圏の電子密度が低い領域にプラズマシートからの hot electron が注入される過程が本質的な役割を担っており、磁気嵐時の enhanced convection 及び substorm による粒子注入過程が、放射線帯外帯の再形成過程を支配していることが示唆された。実際、1993 年~1994 年の回帰性磁気嵐について行った統計解析の結果は、convection 電場及び substorm の活動度が放射線帯の重要なコントロールパラメータであることを示唆するとともに、相対論的電子の起源が注入された hot electron であることを支持するものであった。

5 . 結論

本研究を通じて、回帰性磁気嵐時における放射線帯外帯の再形成過程が、従来考えられていた外部磁気圏からの diffusion 過程ではなく、放射線帯内部における非断熱的な加速過程によるものであることが実証的に示された。また、相対論的電子の起源はプラズマシートから注入された hot electron であり、その非断熱的加速過程のメカニズムとして whistler 波動との波動粒子相互作用が重要な寄与をしていることを明かにした。今後、さらに異なるタイプの磁気嵐についての解析をすすめ、現在提案されている様々な非断熱的加速機構について、観測・理論の両面から検討を進めていくことが、将来にわたり展開されるべき課題である。