

衛星観測とモデリングによる地球放射線帯の研究

学位論文内容の要旨

高度数 100 km から 50,000 km 以上に渡って、数 100 keV から数 10 MeV の高エネルギーの荷電粒子が地球磁場に捕らわれており、その領域を放射線帯と呼ぶ。特に電子で構成される電子放射線帯は地磁気の活動に伴って電子フラックスが時間的・空間的に激しく変動することが知られており、その変動に関して、これまでに理論・観測の両面において精力的に研究がなされてきた。古典的には電子フラックス変動は電磁場擾乱によって生じる動径拡散による外側境界からの流入とそれに伴う加速で説明されてきたが、近年、外帯中心域での電子加速メカニズムとして波動粒子相互作用による直接加速の存在が示唆されている。しかし、未だ詳細な変動機構は明らかになっていない。また、内帯は外帯に比べ電子フラックスの変動が小さく安定に存在しており、これまであまり注目されてこなかった。

外帯中心域での直接加速が存在したとしても、その後の電子フラックスの再配置に動径拡散の機構が重要な役割を果たしていると考えられる。特にスロット領域や内帯では電子フラックスの時間的・空間的構造は動径拡散によって支配されていると考えられる。したがって、放射線帯全体のダイナミクスを理解するためには動径拡散係数の動径分布を知ることが重要である。

本研究では動径拡散モデルを構築し、外側境界フラックス、消失の効果、動径拡散係数の各パラメタによって、放射線帯電子の空間構造や電子フラックスの変動がどのような影響を受けるのかについて調べた。また、2002 年に宇宙航空研究開発機構によって打ち上げられた衛星つばさ(MDS-1)による放射線帯粒子の観測データを用いて、異なるエネルギーにおける各粒子種の空間分布について解析した。また、地磁気の変動に伴う放射線帯電子フラックスの変動の様子も解析した。

時間変化を考慮した動径拡散モデルでは Brautigam and Albert (2000) により定式化された Kp 依存の動径拡散係数が慣習的によく用いられる。この動径拡散係数は磁場擾乱とサブストームに伴う対流電場擾乱の概念を基にした理論と、外帯における電場や磁場の観測とを併せた経験的な係数であるが、この動径拡散係数をスロット領域・内帯まで外挿してシミュレーションを行うとスロット領域・内帯での電子フラックスが極めて過大になり、観測結果を再現することができない。スロット領域を形成する消失の効果を強めた

場合でも、スロット領域への電子の過剰な流入は避けられず、動径拡散係数が不適切であることがわかる。

この動径拡散係数は、スロット領域や内帯では磁場擾乱よりもむしろ静電場擾乱による効果大きい。そこで本研究では、まず、対流電場擾乱の大きさを小さく見積もったシミュレーションを行った。その結果、スロット領域・内帯への電子の過剰な流入が起こらないが、観測結果と異なり、スロット領域での動径拡散が弱く大きな磁気嵐時にスロット領域に流入した電子がその場で消失していき、内帯と一体にならないことがわかる。

これまで動径拡散を引き起こす対流電場擾乱の大きさは磁気圏全体に渡って一様であると考えられてきた。しかし、本研究の結果から、そのような条件では観測で得られる電子放射線帯のスロット領域・内帯をシミュレーションによって再現することができないことがわかった。したがって、対流電場擾乱の大きさは磁気圏内で一様ではないと考える必要がある。そこで、対流電場擾乱の大きさをプラズマ圏境界面で階段状に小さくするモデルと L の 1 次関数として地球へ近づくほど小さくなるモデルを仮定し、シミュレーションを行った。その結果、対流電場擾乱の大きさが L の 1 次関数とした場合に、スロット領域・内帯を形成し、磁気嵐時にスロット領域に流入した電子が、その後、内側へ流入し内帯と一体となる様子を再現することができた。

観測で見られるような内帯での動径拡散を再現しつつ電子フラックスが過大とならないためには、静電場擾乱の大きさが L に依存し、地球に近づくにつれて小さくなっていく必要があることがわかる。このことは、動径拡散を引き起こすサブストームに伴う対流電場の振動の大きさが磁気圏全体で一様には伝わらず、地球に近づくにつれて減衰することを示唆する。

また、つばさによる電子フラックスの観測値から動径拡散係数を求め、 $2.7 < L < 4.0$ の範囲(外帯の内側境界)では理論値にほぼ一致するという結果を得ることができた。しかし、 $L < 2.5$ では高い精度での電子フラックスの空間分布や時間変化と消失の時定数が必要となるため、今回用いたデータと手法では動径拡散係数の厳密な特徴を捉えることは困難である。

更に、比較的静穏な期間での $0.40\text{--}0.91\text{ MeV}$ の電子フラックスの観測値から電子の消失の時定数(寿命)を求めた。 $L=2.7$, $L=3.0$, $L=3.3$ におけるこのエネルギーの電子の寿命は数日から数 10 日程度であり、これはプラズマ圏ヒスについて理論的に得られる値とほぼ一致する。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	渡 部 重 十
副 査	教 授	倉 本 圭
副 査	教 授	小 笹 隆 司
副 査	教 授	藤 本 正 行
副 査	准教授	石 渡 正 樹
副 査	講 師	佐 藤 光 輝

学 位 論 文 題 名

衛星観測とモデリングによる地球放射線帯の研究

数 100keV から数 10MeV の高エネルギー荷電粒子からなる地球放射線帯は高度数 100km から 50,000km 付近にまで存在し、太陽風や地球磁場の変動によりそのフラックスは大きく変動する。放射線帯粒子フラックスの研究とその変動予測は人類の宇宙活動に欠かせない重要な研究テーマとして近年活発な議論が行われている。

著者は、未だ完成していない地球放射線帯モデルの構築に取り組み、放射線帯外側境界フラックス、消失の効果、動径拡散係数の各パラメタが、放射線帯電子の空間構造や電子フラックスの変動にどのような影響を与えるのかについて調べた。また、2002年に宇宙航空研究開発機構によって打ち上げられた衛星つばさ(MDS-1)による放射線帯粒子の観測データを用いて、異なるエネルギーにおける各粒子種の空間分布や地磁気の変動に伴う放射線帯電子フラックスの変動の様子も解析した。

比較的静穏な期間での 0.40-0.91MeV の電子フラックスの観測値から電子の消失の時定数(寿命)を求めた。寿命は数日から数 10 日程度であり、これはプラズマ圏ヒスによる理論的な寿命とほぼ一致する。さらに、衛星つばさによる電子フラックスの観測から得た動径拡散係数は地球に近づくと共に急速に減少していることも発見した。

これらの知見や磁場擾乱とサブストームに伴う対流電場擾乱の概念を基に構築した地球放射線帯モデルは、外帯・スロット領域・内帯を統一的に扱えることを示した。動径拡散を引き起こす対流電場擾乱の大きさは磁気圏内で様ではなく、かつその大きさも地球方向に伝播すると共に減少し、従来の磁場擾乱も過大に評価していることを発見した。以上の結果は、地球放射線帯粒子の加速機構・変動機構、さらに地球磁気圏形成過程に大きな修正を加えるものであり、当該分野に大きな貢献をした。

よって、著者は北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格があるものと認める。