

博士論文の要約

論文題目 Study of the radial transport of radiation belt electrons by interactions with ULF Pc5 waves based on model coupling simulations

(内部磁気圏モデル結合シミュレーションに基づく Pc5 帯 ULF 波動との相互作用による放射線帯電子の動径輸送に関する研究)

氏 名 神谷 慶

地球近傍の宇宙空間のうち、地球の固有磁場の影響が支配的な領域を地球磁気圏と呼ぶ。特に固有磁場が強く双極型磁場が卓越する静止軌道より内側の領域は内部磁気圏と呼ばれ、高エネルギー荷電粒子が捕捉されている。これらの捕捉粒子の運動は、サイクロトロン運動、磁力線方向に沿って南北を行き来するバウンス運動、磁場勾配により地球を周回するドリフト運動の3つの周期運動により特徴付けられる。その中でも最も高いエネルギーを持つ相対論的電子が捕捉されている領域を放射線帯と呼ぶ。地球磁気圏最大規模の変動現象である磁気嵐時には、放射線帯が大きく変動することが知られている。この変動を引き起こす相対論的電子を生成・消失させる物理機構の解明は磁気圏物理学上の最重要課題の一つとなっている。放射線帯電子の加速機構として、内部加速説と外部供給説があるが、各々の機構が放射線帯の変動にどの程度寄与しているのかはよくわかっていない。2つの仮説のうち外部供給説は、1.6-6.7 mHzの周波数(Pc5)帯の低周波(ULF)波動と粒子のドリフト運動との共鳴(ドリフト共鳴)により、内部磁気圏の外側から磁場が強い地球動径方向に輸送され準断熱的に加速される機構である。放射線帯変動の理解が進まない原因の一つとして、加速機構の結果として観測される放射線帯の位相空間密度(PSD)の変動から、2つの仮説を観測的に切り分けるのは難しいことがあるが、その要因は、内部磁気圏における3次元的なPc5波動分布と、それとの相互作用に起因して形成される放射線帯電子のPSD分布の特徴の理解不足である。本研究は、新しい数値モデル結合シミュレーションを開発することで、内部磁気圏におけるより現実的なPc5波動分布を導出し、それが放射線帯変動に及ぼす影響についてピッチ角分布を含めて調べることを可能にした。その結果、Pc5波動による電子の動径輸送(外部供給説)では従来形成されないと考えられていたバタフライ型のピッチ角分布(磁

場に垂直な速度成分のみを持つ粒子より磁場に平行成分を持つ粒子のフラックスが卓越する分布)が形成されることを見出し、2つの形成機構を提唱している。

第2章では理想的な単色 Pc5 波動を仮定し、ドリフト共鳴に伴って形成されるピッチ角分布の特徴の基本的な性質を報告している。本研究では、Pc5 波動を含む内部磁気圏における電磁場変動をシミュレートするため、内部磁気圏の圧力を担う高エネルギーイオン(リングカレントイオン)のドリフト運動論に基づく5次元分布関数と電磁場変動を自己無撞着に解くことができる数値モデル(GEMSIS-RC)を用いている。太陽風が駆動する Pc5 波動を仮定し、外側境界条件において単色の電磁場の強制振動を印加することで、3次元的な単色 Pc5 波動分布を導出した。さらに得られた電磁場変動を、案内中心近似した相対論的電子の運動方程式を任意の背景電磁場の元で解くことができるテスト粒子モデル(GEMSIS-RB)に入力として与えることで、Pc5 波動と相対論的電子の相互作用を調べている。その結果、磁場に平行な速度成分を持ちバウンス運動する粒子がドリフト共鳴条件を満たしているエネルギー・空間・時間の範囲内において、バタフライ型ピッチ角分布が形成されることを明らかにした。これは粒子の最大輸送距離がピッチ角ごとに異なることが原因であるとの考察に基づき、単色 Pc5 波動とのドリフト共鳴によってバタフライ型ピッチ角分布が観測される必要条件を解析的に定式化することに成功した。

第3章では、より現実的な Pc5 波動分布を用いて、第2章で提案した粒子の動径輸送に伴うバタフライ型のピッチ角分布が形成されるのかを検証している。より現実的な Pc5 波動の空間分布を再現するため、太陽風から外部磁気圏までを計算することができるグローバル MHD モデル(BATS-R-US+CIMI)の結果を、上述の GEMSIS-RC モデルの外部境界条件として用いるモデル結合の計算手法を開発した。開発にあたっては2つのモデル間の温度条件及び境界条件の設定を工夫し、外部磁気圏から内部磁気圏に Pc5 波動がシームレスに伝搬させる手法を考案した。こうして得られたより現実的な3次元 Pc5 波動分布を GEMSIS-RB の背景電磁場として用い、放射線帯電子とのドリフト共鳴による動径方向輸送を計算した結果、単色波による共鳴よりも短い時間スケールで、バタフライ型のピッチ角分布が形成されることを示した。これは Pc5 波動の振幅が高緯度で極大値をとる緯度分布となっており、バウンス運動を伴う電子が振幅の大きな波動と共鳴することにより、90°に近いピッチ角を持つ粒子よりも効率よく輸送されることが原因である。これは第2章で導出した粒子の最大輸送距離の緯度方向分布の依存性とも整合する結果となっている。

以上をまとめると本論文では、放射線帯電子の加速機構の一つである外部供給説により、バタフライ型のピッチ角分布が形成されうることを、新しいモデル結合計算に基づいて示しその形成条件を定式化した。本研究の結果は衛星観測への提言として、ULF 波動が放射線帯電子の加速に及ぼす影響をピッチ角分布で評価できる可能性を示すとともに、内部磁気圏におけるグローバル数値モデル結合手法を開発して、ULF 波動の励起・伝搬過程の新たな研究手段を提供している。