

氏 名	油 江 宏 明
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3009 号
学位授与の日付	平成 18 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 地 球 惑 星 科 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Symplectic Tracing of High Energy Charged Particles in the Inner Magnetosphere (内部磁気圏における高エネルギー荷電粒子のシンプレクティック追跡法)
論文調査委員	(主 査) 教 授 家 森 俊 彦 教 授 町 田 忍 教 授 淡 路 敏 之

論 文 内 容 の 要 旨

磁気圏放射線帯の磁気嵐時の変動メカニズムを調べるため、相対論的高エネルギー電子も含め、電磁場の中で長時間、高精度で粒子運動をトレースすることができる Symplectic 数値解法を開発し、それを現実的磁気圏モデル中の高エネルギー陽子、および相対論的電子に適用した。

第1章では、磁気嵐時における磁気圏放射線帯粒子の消長とそのメカニズムに関する理論的説明をレビューし、(1)荷電粒子運動の軌道変化と断熱不変量の保存、(2)拡散方程式を用いた統計的取り扱い、(3)波動粒子相互作用の3つのタイプに分けて簡潔に解説した。

第2章では、ダイポール磁場内での荷電粒子運動のハミルトニアンによる定式化を相対論の場合と非相対論の場合のそれぞれについて行い、有効ポテンシャルを定義・導入して、エネルギーに応じて運動状態がどのように変化するかを解説した。

第3章では、ハミルトン系の数値解法として近年開発され、利用されつつあるシンプレクティック解法について説明した。

第4章では、外部電磁場のない地球ダイポール磁場内において、シンプレクティック解法を実施するためのハミルトニアンの定式化を行い、計算ソフトウェアを開発して、計算精度のテストを行なった。その結果、例えば陽子の場合、4次の標準的 Runge-Kutta 法を用いた計算では1万ステップ以内に追跡計算が破綻するような場合でも、4次の Symplectic 解法では球座標、円柱座標、カーテシアン座標いずれを用いても、1千万ステップ以上の安定な計算が出来ることを確認した。電子の場合には、円柱座標を用いることによって、同様の計算が可能になることを見い出した。

第5章では、典型的な磁気嵐時に対応する現実的電磁場変動を加えた磁気圏モデルを作成し、そのハミルトニアンによる表現式を導出した。そして、その中で高エネルギー陽子および相対論的電子のトレースを、磁気嵐の主相および回復相に対応する時間行ない、エネルギーおよび位置の変化を調べた。

第6章では、国際標準磁場(IGRF)モデルを用いて、南大西洋磁気異常を加えた内部磁気圏モデル中での計算を行なった。その結果、第5章の結果と合わせ、このようなグローバルな磁気圏の磁気嵐スケールの比較的ゆっくりした電磁場変動、および、地球中心から半径の2倍以上離れた地点における地磁気異常が放射線帯粒子運動に与える影響は非常に小さいという結論を得た。また、旋回運動近似では見えない有限ラーマー半径効果を調べたところ、地軸と磁気軸のずれに伴う粒子軌道の変化が見い出された。

第7章では、まとめと今後の課題について述べている。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

申請論文に記載された研究成果として、以下に記す3点が特に重要で評価できる。

1. 電磁場中での Symplectic 数値解法を開発したこと。

電磁場中での荷電粒子の運動方程式を Euler 法や Runge-Kutta 法など、従来の方法で解くと、エネルギーは最終的には

発散するかゼロに近づき計算不能となる。それに対し、ハミルトン方程式の時間発展を追う Symplectic 法では、原理的にエネルギーは真の値から常に一定値の範囲内にあり、数値的丸め誤差を除くと、解が発散することはない。それゆえ、この方法は天体、あるいは粒子運動の、長期間の時間発展を追うのに適していると考えられる。1990年前後から天体の長期間の軌道計算に応用されはじめたが、地球磁気圏電磁場内の荷電粒子運動への応用は、当論文申請者が世界で最初である。一般化された位置と運動量を分離してハミルトニアンが記述できる重力多体系への適用は陽的解法も存在し比較的簡単であるが、ローレンツ力を介して両者が結合する電磁場内での荷電粒子運動を解くためには、陰的解法を工夫する必要がある、ハミルトニアンで系を表現することの難しさも含め、容易ではない。申請者は、物理数学的能力を駆使してこれらの困難を克服し、数値的に解くことができることを示した。

2. 方法、座標系の違いによる計算誤差の比較・評価を行ったこと。

電磁場中での Symplectic 数値解法をダイポール磁場内で実行し、従来の標準ルンゲ・クッタ法と比較して、格段に長時間精度良く粒子運動を追跡できることを実証した。また、原因は特定できなかったが、計算に用いる座標系の違いにより、誤差の蓄積が異なることを示した。

3. 磁気嵐および南大西洋磁気異常を表現する内部磁気圏モデル内での計算方法を定式化し、実行したこと。

Symplectic 数値解法を適用するためには、計算したいシステムをハミルトニアンで表現する必要がある。申請者は、磁気嵐や地磁気異常を近似的に再現するため、標準的に使われている磁気圏電場やリングカレントのモデルおよび地球主磁場をハミルトニアンで表現し、計算方法を定式化して実行した。

以上のように、申請者は磁気圏電磁場中での粒子運動に Symplectic 数値解法を初めて適用し、定式化した。また、この方法が長期間安定して、相対論的領域においても荷電粒子の運動を追跡することが可能であることを実証し、従来の解法と比較して、格段に優れていることを示した。更に、典型的な磁気嵐および南大西洋磁気異常を近似的に表現する内部磁気圏の電磁場をハミルトニアンで表現し、現実的磁気圏内での荷電粒子運動計算に Symplectic 数値解法を適用することを可能にした。

それゆえ、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認め、また、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。