

学 位 審 査 報 告 書

(ふ り が な) 氏 名	しもだ ただひろ 下 田 忠 宏
学位 (専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 22 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) Studies on the Improvement of In-Situ Plasma Particle Measurements in Space (宇宙空間におけるプラズマ粒子直接計測の精度向上に関する研究)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 町 田 忍 教授 家 森 俊 彦 教授 里 村 雄 彦 教授

理 学 研 究 科

京都大学	博士（理学）	氏名	下田 忠宏
論文題目	Studies on the Improvement of In-Situ Plasma Particle Measurements in Space (宇宙空間におけるプラズマ粒子直接計測の精度向上に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
宇宙プラズマの観測手法の1つとして、人工衛星にプラズマ粒子計測器を搭載して行う直接観測があるが、その設計において、計測器内の電極電場および粒子軌道の正確な計算を実行することが極めて重要である。電極内部の電場を求めるためには、従来、直交等間隔格子が多く用いられてきた。しかし、この方法では、電場を簡便かつ高速に求めることができる反面、格子間隔以下の小さな構造、例えば光を反射させて最終段の粒子検出部に進入することを防ぐ鋸歯状構造を持ったセレーション近傍の電場を正確に計算することができなかった。そこで、本研究では、物体の境界に合わせて座標面や座標軸を仮定し、かつ、格子点間隔を自由に設定できる境界適合格子法を用いて、その点を改良することを試みた。 その適用例として、プラズマ粒子計測器の中でも現在広く用いられているトップハット型粒子計測器を取りあげ、従来、セレーションの存在を一切無視して、滑らかな電極に置き換え、さらに、それらの間隔を狭めることで便宜的に計算を行っていた点を改め、微小な鋸歯状構造を正確に含めた数値計算を行った。その結果、セレーションの深さの29パーセントほど、セレーション先端から深さ方向に向かった位置に滑らかな仮想電極を置き、さらに粒子の通過範囲を対向するセレーションの先端の包絡面とすることで、最良の結果が得られることを見出した。これにより、従来の置き換えよりも粒子計測器の感度を高精度に計算できる方法が確立された。さらに、本研究で開発した手法は、様々な形状や複雑な構造を持った電極を使用したプラズマ粒子計測器や、その他の電場を用いた計測器の設計に応用することが可能である。 本研究では、次に、GEOTAIL 衛星より発生した光電子の非対称分布とその原因について調べた。人工衛星の導体表面からは、太陽紫外線の照射により光電子が発生する。地球の磁気圏内では衛星の導体表面は背景プラズマに対し数V から100V 程度正に帯電しているため、発生した光電子のうち衛星電位以下のエネルギーのものは衛星表面に引き戻され、プラズマ粒子計測器で観測対象とする自然界のプラズマに混入してしまう。その様子を調べるために、本研究では、GEOTAIL衛星のプラズマ粒子計測器(LEP)のデータと電場計測器(EFD)で得られた衛星電位のデータを用いて、光電子の速度分布関数と、その衛星電位依存性について解析を行った。その結果、予想した通り、光電子が昼夜方向に対称な分布を持つことを確認するとともに、朝夕方向にも顕著な非対称分布を持つという、全く予想外の現象を見出した。本現象の起こる原因を究明するために、衛星周辺の電位と電場の空間分布を数値計算によって求め、その中で多数の電子の軌道計算を実行した。そして、人工衛星本体の太陽光の当たる面で発生した光電子がワイヤーアンテナ近傍の電場で引き込まれるようなかたちで朝側に運ばれ、それを観測するプラズマ粒子計測器(LEP) のデータに朝夕の非対称性が生まれることを見出した。さらに、他のチャンネルについても反対方向から飛来する光電子フラックス比について、観測と一致する傾向が数値計算で再現された。 光電子フラックス比について観測の統計解析と計算が同一の傾向を示しており、光電子の非対称性は、衛星近傍にあるワイヤーによって生じる電場が原因であることが明らかになった。また、このような非対称性をなくすためには、プラズマ粒子計測器に対してワイヤーなどの構造物が対称となるように配置したり、計測器本体をブームやマストの先端に取り付けて衛星の表面から離すなどの工夫が必要であることがわかった。			

(論文審査の結果の要旨)

太陽惑星系の構造を知る上で人工衛星による宇宙プラズマの直接観測は非常に重要であり、そのための技術開発が今も続けられている。プラズマ粒子のエネルギー分析は基本的に曲率を持った静電電極を用いて行われるが、それを設計するにあたっては、電極内の電場を計算し、その中で荷電粒子がどのような軌道を描くのか正確に計算する必要がある。従来は、数値計算を行う際に等間隔直交格子が広く用いられてきた。この方法は、計算スキームが容易で、短時間で計算を実行できるという長所を持つ反面、格子幅よりも小さい構造や、座標軸に沿わない面を正確に表現することができないという欠点を有する。

一方、プラズマ粒子計測器では、電極内部で紫外線を乱反射させて検出器に届くのを防ぐのを目的として、電極にセレーションと呼ばれる小さな鋸歯状の構造を設けることが広く行われている。ところが、従来の計算においては、その構造を無視し、電極を滑らかな極板に置き換えて計算が行われてきた。申請者は、その点を改善すべく、境界適合格子法を用いることで、微細な鋸歯構造を考慮に入れて数値計算を行うことを思いついた。そして、従来行われてきた、セレーション付の電極から滑らかな電極への置き換えについて比較・検討し、従来の電極の置き換えの妥当性を証明すると共に、滑らかな電極について粒子の通過範囲を鋸歯状構造の先端の包絡面とする制約を設けることで、プラズマ計測器の粒子通過特性の計算精度がさらに向上することを見出した。従来の経験則に対して理論的な検討を行ったのは本研究が初めてであり、また、将来、さらに複雑な構造をもった計測器の設計を行う際にも申請者の手法が応用可能である点が高く評価される。

本論文では、さらに、太陽紫外線による影響で人工衛星表面から発生する光電子について、GEOTAIL 衛星のプラズマ粒子計測器 (LEP) データを用い、衛星電位と光電子の 3 次元分布の関係を調べた。人工衛星の導体表面からは、太陽紫外線の照射により光電子が発生する。地球の磁気圏内では衛星の導体表面は背景プラズマに対し数 V から 100V 程度正に帯電しており、衛星表面で発生した光電子のうち衛星電位以下のエネルギーのものは衛星表面に引き戻され、プラズマ粒子計測器で観測対象とする自然界のプラズマに混入してしまう。統計解析により、LEP が朝側を向いている時と夕方側を向いている時とで光電子フラックスに偏りのあることがわかったが、この偏りは、LEP 近傍にあるワイヤーによって生じる電場が原因であることが数値計算により解明された。

通常は、このような低いエネルギーの電子データは、大部分が衛星表面からの光電子で構成され、しかも、その強度や飛来方向は磁気圏内における衛星の位置や姿勢などで複雑に変化するため、これまで全く解明が進んでいなかった。申請者は、根気強くデータ解析と数値計算に取り組み、この難問に対して、極めて明快な解答を与えた。今後は、本研究で得られた結果を用いて、数 eV から数 10eV のエネルギーを持った自然界の電子と人工衛星の表面で発生した光電子を分離して研究を進めるなどの応用が考えられ、その成果が高く評価される。また、この非対称性をなくすためには、粒子計測器から見たワイヤーなどの構造物が対称に配置されることが必要であり、本研究で得た知見は今後のデータの理解や宇宙空間におけるプラズマ粒子直接計測の精度向上をはかる上で、衛星の構造設計に有効に役立つことが期待される。

以上の観点から、申請論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認めた。平成 22 年 1 月 25 日に主論文に報告されている研究内容と、それに関連する分野について口頭試問を行った結果、合格と認めた。