

氏名	なが た だい すけ 永 田 大 祐
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 3260 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 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	Solar Wind Control of Plasma Number Density in the Near-Earth Plasma Sheet (近地球プラズマシートにおけるプラズマ数密度の太陽風依存)
論文調査委員	(主 査) 教 授 町 田 忍 教 授 家 森 俊 彦 教 授 大 志 万 直 人

### 論 文 内 容 の 要 旨

地球磁気圏プラズマシートには数密度が約  $1\text{cm}^{-3}$ 、温度が数千万度の高温プラズマが常時存在している。プラズマシート粒子はオーロラの源であり、またそれらは内部磁気圏に輸送されて環状電流のキャリアとなり内部磁気圏の変動に寄与するため、プラズマシートにおける物質輸送は磁気圏物理の基礎課題の一つである。プラズマシートにおける粒子種・荷電状態に関する従来の研究結果から、プラズマシートを構成する荷電粒子は地球電離圏と太陽風の2つの源から供給されていると考えられている。しかし、それぞれの源から磁気圏プラズマシートへの流入過程とその後の輸送過程の詳細、特に空間構造については未だ観測的に明らかにされてはいなかった。

本研究では11年の長期にわたる太陽風とプラズマシートの同時衛星観測データを用いて、太陽風条件とプラズマシート数密度の定量的関係を統計的に明らかにすることにより、プラズマシートにおける物質輸送過程の解明を試みた。すなわち、プラズマシート数密度を太陽風数密度と惑星間空間磁場 (IMF) の南北成分 (IMF Bz) の関数とみなして観測データを式にフィットし、得られた依存係数の3次元空間分布に基づいて輸送過程に関する考察を行った。フィットに使用する関数形は太陽風数密度については冪型、惑星間空間磁場の南北成分については指数型を仮定した。それぞれの太陽風パラメータへの依存は、回帰分析によって決定される式中の係数によって表現される。回帰分析の際、決定係数を最適にする太陽風観測のプラズマシート観測に対する相対時間帯を調べることにより、IMF南北成分の影響の伝播時間と残留時間も推定した。また、データセットをIMF南北成分の符号、IMF方位角と太陽風速度に基づいて分割することで、それらの効果を調べた。

解析の結果、南向きIMFが卓越する状況においては近地球領域における太陽風数密度依存指数とIMF Bz依存指数の減少から、電離圏からの粒子供給の寄与が増大していることが示唆された。特に真夜中高緯度領域においては上記の傾向が最も顕著で、これはオーロラに伴う質量供給が、太陽風電場が大きくなるに従ってその影響を増すことと調和的である。一方、北向きIMFが卓越する状況においては、太陽風数密度依存指数の磁気圏フランク領域における緯度分布構造が太陽風速度によって変化することがわかり、太陽風粒子の流入過程が太陽風速度によって変化することが示唆された。これは太陽風速度の増加に伴って太陽風の流入過程が磁気再結合によるものから拡散輸送を主とする状態へと遷移することを示唆している。また、IMF方位角によるデータの分類によって、平行衝撃波となる側のバウショック下流において太陽風数密度依存指数が増大する朝夕非対称性を有することがわかった。この原因としてはマグネトシース中の圧縮性擾乱を源として磁気圏界面に励起される運動論的アルフベン波による拡散輸送、またはシース擾乱をトリガーとする磁気再結合頻度増加が考えられる。

IMF南北成分の伝播・影響時間については、その分布が平均流速の積分曲線と概ね一致することから、断熱的な輸送によって理解できると考えられる。しかし、北向きIMF時に朝方側において影響時間の極大が見られ、この極大については断熱輸送のみによる解釈は困難であった。そこで、この極大を説明するために速度擾乱と速度の自己相関時間の観測データから乱流拡散係数を推定し、背景の数密度勾配とあわせて乱流拡散輸送の寄与について推定を行い、影響時間の極大は乱流

拡散がプラズマシートにおける断熱輸送を阻害するために生じることを示した。

## 論文審査の結果の要旨

磁気圏のプラズマシートを構成するプラズマ粒子の起源については、太陽風と電離圏の2つが考えられる。太陽風は地球と相互作用を行うが、その仕方は太陽風の密度やその中の惑星間空間磁場（IMF）によって大きく左右される。また、電離圏から上昇して磁気圏中に供給される粒子のフラックスもそれらの太陽風の条件に左右されることが知られている。

そこで、申請者はいかなる状況で、太陽風および電離圏のプラズマ粒子がプラズマシートの中に供給されるのかを複数衛星によって得られた太陽風のデータと磁気圏プラズマシートを長期にわたって観測している Geotail 衛星のデータを用いて調べた。具体的には、先行研究によって与えられた太陽風密度および IMF の関数として求められたプラズマシートの密度を拡張した形、すなわち、太陽風数密度については冪型、惑星間空間磁場の南北成分については指数型に従う関数形を与え、それによって予測されたプラズマシート密度を Geotail 衛星による実測値と相関解析を行う方法で研究を進めた。酸素イオン ( $O^+$ ) および 2 価のヘリウムイオン ( $He^{++}$ ) はそれぞれ電離層起源、太陽風起源であることがほぼ明白であるが、水素イオン ( $H^+$ ) については両方から供給されていると考えられ、観測的な分別は困難である。そこで両供給源の太陽風数密度への依存性の差異に着目して、電離層の寄与に関する議論を行った。

これまで、プラズマシート数密度の太陽風数密度依存性は IMF の南北成分への依存性に比べると軽視されてきた傾向にあったが、その点を改善すべく解析を行い、磁気圏尾部のプラズマシート中央部における 2 次元構造を初めて明らかにした。その結果、近地球領域における電離圏を起源とする粒子の寄与の重要性に関する重要な観測的証拠を得た。

申請者はさらに研究を 3 次元構造の解析へと進め、太陽風速度、IMF 南北成分、IMF 方位角の効果を調べたが、その研究では、南向き IMF 時には電離圏からの寄与が真夜中領域の高緯度で見られること、一方、北向き IMF 時の高速太陽風下では夕方側尾部下流の低緯度部分で太陽風粒子の流入が卓越すること、IMF 方位角の効果が高緯度のフランク部に見られることなどを見出した。電離層粒子と太陽風粒子の寄与については近年数値実験の分野で注目が高まっており、多流体シミュレーションやテスト粒子シミュレーションの結果を観測的に検証・拘束する上で重要な結果と考えられる。そのような観点からも、本研究は、磁気圏におけるプラズマ輸送の 3 次元的な構造を世界に先駆けて明らかにしたもので、関連分野に於いて極めて重要な結論と解析の手法を提供した点で高く評価される。

また、IMF 南北成分の効果の遅延時間についても解析を行い、その分布が平均流速の積分曲線と概ね一致することから、多くの場合は断熱的な輸送によって理解できるが、北向き IMF 時に朝方側の領域においては、従来の断熱的輸送では説明できないことを見出した。それを観測データから乱流拡散係数を推定し、背景の数密度勾配とあわせて乱流拡散輸送を推定し、断熱的輸送の競合の観点から議論を行った。これも今回申請者が独自に導いた新しい結果である。

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。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。