

(続紙 1)

京都大学	博士（理 学）	氏名	原田 裕己
論文題目	Interactions of Earth's Magnetotail Plasma with the Surface, Plasma, and Magnetic Anomalies of the Moon (地球の磁気圏尾部プラズマと月の表面・プラズマ・磁気異常の相互作用)		
(論文内容の要旨)			
月は濃い大気および全球的な固有磁場を保持していないため、月表面や月の希薄大気、磁気異常は月周辺のプラズマに直接曝されている。従来の月周辺でのプラズマに関する研究の多くは、月と太陽風プラズマとの相互作用に主眼が置かれてきたが、本論文では 2007 年以降に次々に打ち上げられた、日本のかぐや衛星、米国のアルテミス衛星、インドのチャンドラヤーン 1 号衛星などで取得された衛星観測データの解析と荷電粒子軌道などの数値計算を用いて、月と地球磁気圏尾部プラズマとの相互作用について明らかにした。			
第 1 章では、テーマに関連する先行研究等に関するレビューが行われた。第 2 章では、かぐや衛星が地球磁気圏尾部のプラズマシート領域を通過する際に、電子速度分布関数に、磁力線に対して非軸対称な空洞領域が出現することが見いだされたと報告した。これは、磁力線の周りを旋回運動する電子が月表面に衝突・吸収されることに起因する現象であり、ジャイロ・ロス効果と命名した。さらに、月周辺において磁場に対して垂直な電場が存在する時に、この空洞領域の形が変わることを理論的に検討し、その結果と整合的な観測データの解析から、従来の予想を上回る強い電場が月近傍に存在する可能性を指摘した。第 3 章では、さらに研究を進め、反磁性電流なども電子速度分布関数の空洞領域を変形させうる事を、数値計算を用いて示し、かぐや衛星の観測データを用いてその効果の定量的な検証を行なった。			
第 4 章では、同じくかぐや衛星による電子速度分布関数の観測データを用いて、月表面の磁気異常によって、プラズマシート領域の電子が非断熱的に散乱される事を示し、その散乱の特性から、空間スケールが小さい磁気異常が、月表面裏側にある代表的な磁気異常帯であるサウスポール・エイトケン周辺に存在する事を示した。これは、従来の磁力計による観測では測定が不可能な空間スケールの小さな地殻磁場の分布を測定できる新たな手法である。			
第 5 章では、米国アルテミス衛星 2 機による地球磁気圏尾部のローブ内における観測データを用いて、月を起源とするプラズマが地球磁気圏プラズマに大きな影響を与えること、月表面から発生した光電子や二次電子にもジャイロ・ロス効果がみられること、光電子には、高エネルギーテイル成分が存在すること、を示した。			
第 6 章では、インドのチャンドラヤーン 1 号衛星による高エネルギー中性粒子の観測結果が述べられている。そこでは、地球磁気圏尾部のプラズマシート領域のプロトンが月表面に衝突し、中性化されて後方散乱した高エネルギー中性粒子を観測したことが述べられ、テスト粒子計算結果から、プラズマシート領域内では、太陽風内に比べて、月表面の磁気異常によるプラズマの反射の効果が小さくなることが報告されている。			
第 7 章では、全体的なまとめと今後の展望が述べられている。			

(論文審査の結果の要旨)

これまで月と周辺のプラズマの相互作用の研究は、主として太陽風との関係に焦点が当てられてきたが、申請者は地球の磁気圏中のプラズマと月の相互作用に着目して研究を行った。新たな対象領域を加えることによって、月と周辺のプラズマの相互作用の多様性と、その中にみられる物理素過程の解明に取り組んだ。

申請者が見出したのは、月表面と磁力線が平行の配位にある時、衛星高度よりも大きな旋回半径を持つ電子がサイクロトロン運動を行いながら月表面に衝突して吸収され、衛星で観測される電子速度分布関数に空洞領域が生じるという現象である。申請者は、それをジャイロ・ロス効果と名付けた。さらに、月表面近傍の電場がある場合、磁力線が月表面に平行でない場合、ジャイロ・ロス効果の結果生じる反磁性電流の影響、などについて、電子速度分布関数の空洞領域がいかに変更されるかについて調べ、ジャイロ・ロス効果に関する理論の一般化を試み、それらの物理過程を詳細に解明した点が高く評価される。

次に、申請者は月表面を特徴付けている磁気異常帯と磁気圏電子の相互作用を調べ、かぐや衛星が磁気異常帯上空を通過した際に、ジャイロ・ロス効果で予想される空洞領域に、本来であれば月表面に吸収されるべき電子が点在して観測されることを見出した。そして、テスト粒子計算を用いて、それが磁気異常帯に起因することをつきとめた。またこの現象に関して申請者の考案した方法を用いると、衛星高度以下の月表面の磁場の水平成分強度と水平空間長の積を求めることができる。これは、月表面磁場の研究に新しい手段を提供したという点で、学術的に意義深い。

また申請者は、米国アルテミス衛星のデータを用いて、磁気圏ローブ領域におけるプラズマと月の相互作用についての研究を実施した。その研究は月表面から飛び出す光電子や二次電子についてもジャイロ・ロス効果が起こることを示し、さらに、月表面からの光電子には高いエネルギーの非熱的成分が含まれていることを観測的に明らかにしたもので、価値がある成果である。

さらに申請者は、チャンドラヤーン 1 号機に搭載されている高エネルギー中性粒子のデータを解析して、地球のプラズマシート中において、周辺のイオンが月表面に衝突した結果、中性水素原子が放出されることを見出した。そして、そのエネルギースペクトルから、高エネルギー中性粒子の生成メカニズムを推定した。さらに月の磁気異常帯による入射イオンに対するシールド効果について検討し、月表面からの高エネルギー中性粒子生成メカニズムの解明に大きく貢献した。

以上のように、本研究は月と磁気圏プラズマの相互作用を最新の衛星データを用いて意欲的に展開させたもので、その中でジャイロ・ロス効果、月表面からの光電子の非熱的テイルの同定、磁気圏中において発生する月表面からの高エネルギー中性粒子などの重要な発見を行った。また、ジャイロ・ロス効果の解明や、反射電子を用いた月表面の磁気的環境の推定など、創意に溢れた試みを行った。これらはいずれも、申請者の研究が端緒となって今後さらに発展していく可能性を秘めている。

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る。また、平成 26 年 1 月 20 日に、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。