

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年06月07日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340143

研究課題名（和文） 太陽風プラズマと天体表面の相互作用に関する実験的研究

研究課題名（英文） Experimental Study on the Interaction between the Solar Wind and the Surface of Heavenly Bodies

研究代表者

齋藤 義文（SAITO YOSHIFUMI）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所・太陽系科学研究系・准教授

研究者番号：30260011

研究成果の概要（和文）：太陽風を模擬したイオンビームを、月面を模擬するターゲットに入射してイオン散乱の方向特性を取得するための実験装置を製作し、散乱イオンの方向特性を取得した他、これらの実験と並行して「かぐや」搭載低エネルギー粒子計測装置(MAP-PACE)によって得られた月面における太陽風プロトンの反射／散乱現象についてのデータ解析を月表面—太陽風相互作用という点に重点を置いて進め、太陽風プロトンの反射に関する解析結果を専門誌に出版することができた。

研究成果の概要（英文）：An equipment to measure the angular distribution of the scattered ions at a target that simulates the Moon surface was manufactured. By injecting ion beam that simulates solar wind, angular distribution of the scattered / reflected ions was obtained. In parallel, the solar wind proton scattering / reflection data obtained by lunar orbiter Kaguya were analyzed. The analyzed result was published in a refereed journal.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2010年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：地球惑星上層大気

## 1. 研究開始当初の背景

我が国における惑星探査は、1998年打ち上げの火星探査衛星「のぞみ」で幕を明けた。残念ながら「のぞみ」は目的とする火星軌道への投入に失敗し火星に関わるデータを得る事はできなかったがその後の「かぐ

や」の月探査は多くの科学成果を出しつつある。2007年9月に打ち上げられた「かぐや」には、月周辺プラズマの観測を行ういくつかの観測装置が搭載されており、「かぐや」は超高層分野における他天体の直接探査においても先駆けとなるミッションになった

といえる。本研究代表者のグループは「かぐや」衛星に低エネルギー荷電粒子の計測装置を搭載し、月周辺プラズマの計測を行った。月周辺プラズマ、特に低エネルギーイオンの計測は米国のアポロ計画以来約30年ぶりに実現された。本研究代表者のグループが搭載した観測装置には、最新の高質量分解能低エネルギーイオンエネルギー質量分析器が含まれており、それらから得られつつあるデータは世界初のデータである。これらのイオンのデータには、太陽風が月表面で散乱・反射される現象や、月表面から放出されたと考えられるナトリウム、カリウムなどのアルカリイオン、希薄な月大気が電離されたと考えられるイオンなどが観測されている。月周辺でイオンの質量分析を行うことは、月周辺環境を理解できるだけに留まらない。月表面から放出されたイオンと月面のイオン放出位置の対応をとれば、月面の物質分布の情報を得る事ができる可能性もある。一方、今回「かぐや」が発見した太陽風の月面散乱・反射を定量的に理解することができれば、月表面の情報を内包している反射イオンの計測は、月のみならず固有磁場、大気の希薄な天体の新しい表面探査の手法となる可能性も十分にある。これら月周辺の「その場」で観測されたイオンデータの解釈を行う場合、衛星打ち上げ前に実験室で行った搭載観測装置の較正試験結果を用いた定量的なデータ解析を行うことが必要である事は言うまでもないが、衛星搭載観測装置と同様のイオンエネルギー質量分析器を用いた実験室での質量プロファイル計測実験や、プロトンが物質と衝突する際の実験室における反射率の測定など、実験室で並行して行う検証実験が非常に重要であるという事が次第に明らかとなって来た。我が国では現在、欧州宇宙機構と共同で水星に人工衛星を送り込む計画

(BepiColombo 計画) が進行中である。本研究代表者のグループは水星磁気圏探査衛星である MMO に低エネルギー荷電粒子の計測装置を搭載すべく準備を進めている。水星には地球と同様に磁気圏の存在することが知られているが、同時に希薄な大気しか存在しないことも知られており、水星磁気圏で加速、加熱された荷電粒子が水星表面と相互作用する可能性が指摘されている。本研究で衛星のその場観測データと、実験室での検証実験を行う手法を確立することができれば、将来の水星ミッションやその先の大気の希薄な天体一般の探査における周辺環境計測の実績ある手法を手に入れることができるといえる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、「かぐや」によるその場観測で得られたデータの解析を進める一方で、実験室でプロトンの物質表面での反射率の測定を、対象物質の表面や組成を変えながら実施して行うことにより、月を含む、固有磁場が無く希薄な大気しか持たない天体と太陽風との相互作用を明らかにすることである。また、太陽風を模擬したプロトンビームが月表面を模擬した物質に衝突した場合に生じるイオンや、太陽光を模擬した紫外線光が月表面を模擬物質に衝突した場合に生じるイオンの質量分析を行う事で、「かぐや」のその場観測で得られたイオンの質量分析結果の定量的な理解を行う。更に、「かぐや」打ち上げ前に想定していなかった分子を含むイオンの質量プロファイル計測を実施して、その場観測データの定量的な理解と、新たに計測された物質の特定を行う。かぐやに本研究代表者のグループが搭載したこの観測装置に匹敵する性能を持った低エネルギーイオンのエネルギー質量分析器は、これまでには月軌道上では運用されたことが無

い。この貴重な「その場」観測データからの成果は実験室における検証実験を並行して行う事で、はるかに大きな成果にすることができる。特に、月面における太陽風の反射現象を定量的に理解することで月表面の新しい遠隔探査手法を確立できると予想される。他、太陽風イオンや太陽光が月面に衝突することで放出されるイオンを実験室実験によるデータと共に解釈することで、希薄な月大気の生成機構についての情報を得る事ができると予想される。また、本研究の成果は、将来の水星探査を初めとする、惑星磁気圏探査において、太陽風を含むプラズマと惑星表面との相互作用を明らかにするための実験的・観測的手法を確立するという意味において、大きな発展的意義を持っている。

### 3. 研究の方法

本研究は3年計画で実施した。初年度である平成21年度の前半までは「かぐや」衛星搭載低エネルギー粒子計測装置の月周回での「その場」観測のデータ取得を継続し、観測データを用いてイオンの月面における反射・散乱現象の詳細な解析を実施した。本解析によって「その場」観測による太陽風プロトンの月面散乱のエネルギー角度特性を明らかにした。それと並行して、実験室での太陽風を模擬したイオンビームと太陽光を模擬した紫外線光を、月面を模擬するターゲットに様々な方向から照射するための実験装置の設計と製作を行い、実験装置の完成後にはターゲットに太陽風を模擬したイオンビームを照射してビームの反射・散乱分布を測定した。これらのイオンビームの反射・散乱分布の測定データを「その場」観測のデータと比較することで、「その場」観測で発見した月面における太陽風の反射現象や太陽風イオン・太陽光が月面に衝突することで放出

されるイオンを定量的に理解した。

### 4. 研究成果

申請者のグループが開発を担当した「かぐや」搭載低エネルギー粒子計測装置の月周回での運用は、平成21年6月に約1年半にわたる観測を無事完了した。運用期間中においては、海外のグループを含む月大気の地上からの光学観測グループと連携し、月希薄大気（特にアルカリ大気）のグローバルな分布とその場計測データの同時取得を行なった。また同時期に月周回で低エネルギーイオンの計測を行なった中国の Chang' E-1、インドの Chandrayaan-1 との同時観測も行ない、観測完了後はデータの解析を共同で行なうための準備を進めた。本研究において必要となる実験装置として、反射プロトンのフラックスを正確に計測する実験装置と反射プロトンやターゲットから放出されるイオンのエネルギー分布、質量分布を計測する実験装置がある。このうち平成21年度は、反射プロトンのフラックスを正確に計測する実験装置として、月面を模擬するターゲット、ターゲットを保持するためのターゲットホルダー、太陽風を模擬したプロトンビームと反射プロトンビームを定量的に計測するための検出器（セラミックチャンネルトロン）太陽紫外線を模擬する紫外線ランプ（重水素ランプ）などの製作・購入を行ない、平成22年度のデータ取得に向けての準備を行なった。

平成22年度は平成21年度に製作した、太陽風を模擬したイオンビームと太陽光を模擬した紫外光を、月面を模擬するターゲットに様々な方向から照射するための実験装置の一部を用いて、実際に太陽風を模擬したイオンビームをターゲットに入射して装置の基礎データ取得を行った。装置の動作は正常であり、ほぼ事前に予想していた通りの性能を持っていることが確認できた。また、こ

れと並行してターゲットの方向を真空チェンバー中で変化させるための回転台の製作も行った。これらの実験と並行して「かぐや」搭載低エネルギー粒子計測装置 (MAP-PACE) によって得られた月面における太陽風プロトンの反射／散乱現象についてのデータ解析を進め、太陽風プロトンの反射に関する新しい解析結果を得た。本解析結果によると「かぐや」が強い磁気異常上空を20kmの低高度で通過した際、入射太陽風イオンの減速、入射太陽風電子の加速、反射イオンの加熱などが観測された。入射太陽風イオンの減速については太陽風の主成分である水素イオンと、ヘリウム2価イオンの両方について観測され、それらの減速は、 $\Delta E/q$  がほぼ一定であるような減速であることがわかった。更に、入射太陽風電子の加速量と入射太陽風イオンの減速量はよい一致を示すが、このことは「かぐや」衛星上空にDC電場が存在する事を示している。更に、反射イオンについて調べたところ、磁力計で検出された磁気異常よりも広い領域に分布していること、入射太陽風イオンに比べて加熱されていることなどが明らかになった。特にヘリウムイオンについては顕著なエネルギーの減少が見られた。このことから、磁気異常による太陽風イオンの反射が単純な磁気ミラー反射ではなく、非断熱過程を含む月面磁気異常との相互作用を経たものであることが新たにわかった。

平成23年度は、平成21年度に製作した、太陽風を模擬したイオンビームと太陽光を模擬した紫外光を、月面を模擬するターゲットに様々な方向から照射するための実験装置 (図1、図2に装置の写真を示す) の検出器部分を予定数搭載し、太陽風を模擬したイオンビームをターゲットに入射してイオン散乱の方向特性を取得した他、平成22年度に製作した、ターゲットの方向を真空チェン

バー中で変化させるための回転台 (図3に回転台の写真を示す) を実際に真空中で使用して性能を確認した。



図1 実験装置の写真 (ターゲットを外した状態)

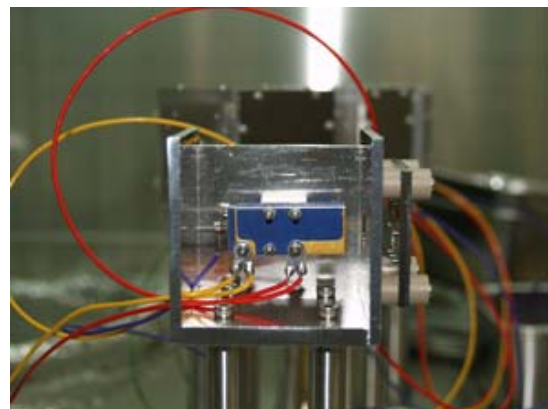


図2 実験装置の検出器部分の写真



図3 回転台の写真

実験を開始した直後は、入射イオンビームの径が広すぎたため、複数ある検出器のケースで散乱された成分が同時に検出されてしまうなどの問題が発生したが、イオンビームの径を絞ることで問題を解決することができた。これらの実験と並行して「かぐや」搭載低エネルギー粒子計測装置(MAP-PACE)によって得られた月面における太陽風プロトンの反射/散乱現象についてのデータ解析を月表面-太陽風相互作用という点に重点を置いて進めて、先に述べた太陽風プロトンの反射に関する解析結果を専門誌に出版することができた他、太陽風プロトンの散乱の角度特性、エネルギー特性について次に述べる新しい結果を得る事ができた。「かぐや」搭載低エネルギーイオンエネルギー質量分析器(MAP-PACE-IMA)が高角度分解能モードで運用されていたときの観測データを利用し、太陽風の月面への入射角と散乱プロトンの月面からの出射角との関係、及び入射角ごとの出射角とエネルギーの関係を調べた。その結果、散乱プロトンは全入射角において月面への太陽風の入射ベクトルに対して180度反対方向に出射し、その方向を中心軸としてコーン状に散乱していることが分かった。散乱プロトンの持つエネルギーは、中心軸にエネルギーの下限値の最小があり、コーンの縁に近づくほど下限値が大きくなっていることも初めて明らかとなった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① Y. Saito, M. N. Nishino, M. Fujimoto, T. Yamamoto, S. Yokota, H. Tsunakawa, H. Shibuya, M. Matsushima, H. Shimizu, F. Takahashi, Simultaneous Observation of the Electron Acceleration and Ion Deceleration over Lunar Magnetic Anomalies, Earth Planets and Space, 査読有, 64, 83-92, 2012, doi :

10.5047/eps.2011.07.011

[学会発表] (計15件)

① 上村洸太, 齋藤義文, 西野真木, 横田勝一郎, 浅村和史, 綱川秀夫、太陽風プロトンの月面散乱における散乱角依存性、地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS)、2011 11月4日、神戸

② Y. Saito, S. Yokota, M. Nishino, T. Yamamoto, K. Uemura, H. Tsunakawa, Kaguya MAP-PACE Team, Lunar Plasma Observation by MAP-PACE on Kaguya (招待講演), International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System ISROSES II, 2011年9月15日, Borovets, Bulgaria

③ Y. Saito, S. Yokota, M. Nishino, T. Yamamoto, H. Tsunakawa, Interaction of the Solar Wind with the Moon (招待講演), 8th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society 2011, 2011年8月11日, Taipei, Taiwan

④ 上村洸太, 齋藤義文, 西野真木, 横田勝一郎, 浅村和史, 田中孝明, 綱川秀夫、太陽風プロトンの月面散乱、日本地球惑星科学連合、2011 5月11日、千葉幕張

⑤ Y. Saito, S. Yokota, M. N. Nishino, T. Yamamoto, H. Tsunakawa, and Kaguya MAP-PACE Team, Lunar Plasma Measurement by MAP-PACE on Kaguya (招待講演), 2011 WCU International Workshop, Current Issues in the Space Environment, 2011年4月25日, Seoul, Korea

⑥ 齋藤義文, 西野真木, 山本忠輝, 横田勝一郎, 浅村和史, 綱川秀夫、月磁気異常上空のプラズマ構造、地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS)、2010 11月3日、那覇沖縄

⑦ K. Uemura, Y. Saito, M. N. Nishino, S. Yokota, K. Asamura, T. Tanaka, H. Tsunakawa, Kaguya MAP team, Solar Wind Prot on Scattering at the Lunar Surface, Asia Oceania Geosciences Society 7th Annual Meeting 2010, 2010 7月7日, Hyderabad, India

⑧ Y. Saito, S. Yokota, T. Tanaka, K. Asamura, M. N. Nishino, T. Yamamoto, H. Tsunakawa, KAGUYA MAP-PACE TEAM, KAGUYA MAP-PACE Plasma Measurements around the

Moon (招待講演), Asia Oceania Geosciences Society 7th Annual Meeting 2010, 2010年7月7日, Hyderabad, India

⑨Y. Saito, S. Yokota, T. Tanaka, K. Asamura, M. Nishino, H. Tsunakawa, Interaction between Solar Wind and Lunar Magnetic Anomalies Observed by MAP-PACE on Kaguya, 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, 2010年6月22日, Taipei, Taiwan

⑩齋藤義文, 横田勝一郎, 浅村和史, 固有磁場を持たない天体と太陽風プラズマの相互作用「かぐや」による月周辺プラズマ観測の最新成果, 日本地球惑星科学連合 2010年大会, 2010年5月26日 千葉幕張

⑪上村洸太, 齋藤義文, 西野真木, 太陽風プロトンの月面散乱における散乱角依存性に関する研究, 日本地球惑星科学連合 2010年大会, 2010年5月24日 千葉幕張

⑫齋藤義文, 横田勝一郎, 浅村和史, 「かぐや」搭載MAP-PACEによる太陽風-月面磁気異常相互作用の観測, 日本地球惑星科学連合 2010年大会, 2010年5月24日 千葉幕張

⑬Y. Saito, S. Yokota, T. Tanaka, K. Asamura, M. N. Nishino, T. Yamamoto, H. Tsunakawa, H. Shibuya, H. Shimizu, F. Takahashi, The solar wind-Moon interaction discovered by MAP-PACE on KAGUYA, 2009 American Geophysical Union Fall Meeting, 2009年12月16日, San Francisco, U.S.A.

⑭横田勝一郎, 齋藤義文, 浅村和史, 田中孝明, 西野真木, 山本忠輝, 綱川秀夫, 渋谷秀敏, 松島政貴, 清水久芳, 高橋太, 藤本正樹, 向井利典, 寺沢敏夫, 「かぐや」MAP-PACE班, 「かぐや」MAP-LMAG班, 月面反射太陽風イオンの月磁気異常による加速, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS), 2009年9月28日, 金沢

⑮齋藤義文, 横田勝一郎, 浅村和史, 田中孝明, 綱川秀夫, 渋谷秀敏, 清水久芳, 高橋太, 松島政貴, 西野真木, 山本忠輝, 「かぐや」MAP-PACE班, 「かぐや」MAP-LMAG班, 「かぐや」MAP-PACEが明らかにした月昼間側の月-太陽風相互作用, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS), 2009年9月28日, 金沢

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齋藤 義文 (SAITO YOSHIFUMI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・太陽系科学研究系・准教授  
研究者番号: 30260011

### (2) 研究分担者

横田 勝一郎 (YOKOTA SHOICHIRO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・太陽系科学研究系・助教  
研究者番号: 40435798

浅村 和史 (ASAMURA KAZUSHI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・太陽系科学研究系・助教  
研究者番号: 50321568