

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740375

研究課題名(和文) SELENE 観測データによる月磁気異常と太陽風の相互作用の解明

研究課題名(英文) Study of interaction between solar wind and lunar crustal fields observed by SELENE

研究代表者

西野 真木 (Nishino, Masaki)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：50466794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000 円、(間接経費) 1,020,000 円

研究成果の概要(和文)：月の磁気異常と太陽風の相互作用を解明することを目的として、月周回衛星SELENE(かぐや)による粒子(プラズマ)・磁場・波動の観測データを用いた研究をおこなった。磁気異常によるイオン反射の全球マップを作成した。磁気異常による太陽風プロトン反射の太陽天頂角依存性を明らかにした。磁気異常の100km上空付近での磁場の増大率が、惑星間空間磁場(IMF)と磁気異常の磁場の向きに依存することを明らかにした。ウェイクへの太陽風侵入について、様々な向きのIMF条件下であっても2型侵入が発生することを明らかにした。このことは、月の昼間側でのプロトン反射が月の夜側の環境を支配する可能性を示している。

研究成果の概要(英文)：We analyzed the plasma, magnetic field, and high-frequency wave data observed by a Japanese lunar orbiter SELENE to study interaction between lunar crustal fields and the solar wind. First we made a global map of proton reflection/deflection by the crustal magnetic fields. Magnetic enhancement ratio at 100 km altitude above strong crustal fields depends on the directions of interplanetary magnetic field (IMF) and the crustal field. As for the solar wind proton entry into the wake, we found that type-2 proton entry takes place for the various IMF directions. This suggests that proton reflection on the dayside might govern the lunar night side region.

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：月プラズマ環境 SELENE 磁気異常 太陽風 太陽風・月相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

月は固有磁場を持たないが、地表付近には局所的に磁気異常(残留磁化)が存在している。月は大気を持たないため、これらの磁気異常は太陽風プラズマと直接相互作用をする。磁気異常と太陽風の相互作用の従来の理解は、「強い磁気異常の領域には太陽風が侵入しにくい小型磁気圏が形成され、周囲に定在衝撃波が形成される。衝撃波では磁場が増大しプラズマが加熱され、波動が励起される。月面はこの小型磁気圏によって太陽風衝突から保護される」というものであった。

ところで、月の磁気異常の空間スケールは典型的には100~1000km程度であり、これはイオン運動の空間スケールと同程度である。そのため、磁気異常の領域に太陽風プラズマが侵入する場合に、イオン(主成分は陽子)と電子で運動に差が生じ、プラズマには複雑な作用が生じることが予想される。このようなイオンと電子の運動の差が顕著となる領域でのプラズマ現象は流体的に取り扱うことができないため、磁気異常と太陽風の相互作用の解明にはイオン・電子・磁場・波動の同時観測(プラズマ総合観測)を行う必要がある。研究開始の時点で磁気異常周辺でのプラズマ総合観測を実施したのはSELENE衛星のみであるため、世界の月プラズマ研究のコミュニティではSELENEのデータ解析結果に寄せる期待が非常に大きかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、月周回衛星SELENEによる粒子(プラズマ)・磁場・波動の直接観測データを用いて、月の磁気異常と太陽風の相互作用を調べることである。SELENE観測データの初期解析によって、月磁気異常のプラズマ環境は既存のモデルでは説明できないことが明らかになったが、本研究ではそれをさらに深め、磁気異常と太陽風の相互作用の新たなモデルを構築することを目的とする。

## 3. 研究の方法

月の磁気異常のデータとして月周回衛星SELENEの観測値を用いる。SELENEはJAXAの月探査衛星であり、2007年12月から2009年6月にかけて磁気異常を含めた月プラズマ環境の総合観測を実施した。月面からの高度は2008年12月までは100km程度であり、2009年には50kmや10kmでの観測を実施し、様々な高度での磁気異常のプラズマ観測データが得られた。解析で使用するデータは、PACEによるプラズマ速度分布関数およびモーメント値、LMAGによる磁場データ、LRS-WFCによるスペクトルおよび波形データである。

## 4. 研究成果

### 4-1. イオン反射の全球マップ

高度100kmでの観測データについて、磁気異常によるイオン反射の全球マップを作成した。裏側の南半球にあるSouth Pole Aitken (SPA)盆地の周辺の広い領域に強い磁気異常があることが知られており、その領域ではイオン反射率が高いことが確かめられた。また、局所的であるが非常に強い磁場があるCrisium Antipode (CA)付近でもイオン反射率が高いことが分かった。この結果をもとに、以下のデータ解析ではSPAとCAに特に着目する。

また、イオン反射の全球マップを国外のシミュレーション研究のチームに提供し、昼間側の磁気異常でのイオン反射の南北非対称が夜側環境に与える影響を調査して頂いている(論文投稿中)。

### 4-2. 高度100kmの磁場パイルアップ

月の地殻磁場(磁気異常)と周囲の宇宙プラズマとの相互作用がない場合、地殻磁場の高度100kmでの値は高々1-2nT程度である。しかし、磁気異常と太陽風プラズマとの相互作用によって、高度100kmで磁場が増大する現象が知られてきた(LEME = Lunar External Magnetic Enhancement と呼ばれる)。このLEMEは、惑星間空間磁場(IMF)が強く、太陽風プラズマの密度が高い場合に出現することが多い。このような条件下のSELENEデータを調べたところ、確かにSELENEでもLEMEが観測されていることが分かった。

ところが、SPA付近に存在するある一つの磁気異常に着目した場合、IMFの強さと太陽風密度が変化していないのにLEMEの磁場増大率が大きく異なる場合があることを発券した。本研究では、磁場の大きさに加えて、太陽風磁場と月地殻起源の磁場の向きを比較した。その際に、SELENEの磁力計LMAGデータから作成した高度100kmおよび高度300kmの磁気異常モデルを使用した。その結果、高度300kmの磁場モデルを用いると、観測データで磁場が極大となる地点では太陽風と地殻起源磁場が平行成分を持つことが分かった。逆に、磁場が反平行なときには磁場の増大率が小さいことを統計的に示した。このことは太陽風磁場と磁気異常との間で磁気リコネクションが起きている可能性を示唆する。

また、高度100kmの磁場モデルでは良い相関が見られなかった。このことは、太陽風動圧によって磁気異常が圧縮されるために、より高い高度の(長波長の)月磁場成分が太陽風磁

場に応答しやすいものと考えられる。ところが、別の磁気異常については、必ずしも磁場の向きとの相関が明らかでないケースがあった。このことは、磁場の増大には上述の条件に加えて別の要素が関係していることを示唆する。

#### 4-3. イオン反射の方向

低高度(月面から約 25 km)で磁気異常によるイオン反射が顕著である領域を解析対象として抽出し、太陽天頂角の異なる軌道データを用いて解析をおこなった。その結果、衛星高度での反射プロトンの向きは、反射地点の太陽天頂角に依存することが分かった。すなわち、

- (1) 太陽天頂角が小さい場合(30 度以下)には、太陽方向(X 方向)の速度を主成分とする反射プロトンが存在する。
- (2) 太陽天頂角が中程度の値の場合(30 度から 50 度程度)には、太陽方向成分の速度を持つものの、垂直方向の速度( $V_Y$  や  $V_Z$ )が支配的である。
- (3) 太陽天頂角が大きい場合(50 度以上)には、反太陽方向の速度を持つことが多く、垂直方向の速度が支配的となる。

以上のような分類が可能であることを示した。過去に行われた他衛星データによる研究では太陽方向への反射(reflection)ではなく横方向への逸れ(deflection)が報告されてはいたが、実際に太陽方向へさかのぼる反射プロトンが存在することを示したのは本研究が初めてである。

また、反射イオンは単純な 1 つのビームだけではなく、互いに異なる方向へ向かう複数のビームからなることがあり、衛星の下方にある複数の磁気異常帯で反射された太陽風プロトンを観測していることが分かった。複数のビームからなる場合、それぞれのビームのエネルギーも異なっていることが多く、これは衛星下方の電場構造を反映しているものと考えられる。

#### 4-4. 反射イオンがウェイクに与える影響

昼側磁気異常や昼側月面で反射された太陽風プロトンが夜側ウェイクに侵入する過程(2 型侵入)が知られている。代表者らによる過去の研究で、惑星間空間磁場(IMF)のうち太陽風垂直成分が卓越する際に 2 型侵入が発生することを示してきたが、本研究では、IMF の太陽風平行成分が卓越しても 2 型侵入が発生することを観測および粒子軌道計算によって明らかにした。

このことは、太陽風と磁気異常の(月の昼側での)相互作用の結果としてのプロトン反射が、月の夜側の環境を支配する可能性を示している。また、夜側での磁場の月面への接続状

況によって観測される物理現象が異なることを示した。すなわち、

- (1) 2 型侵入によるプロトンが観測される地点で磁場が月面に接続していない場合には、電気的中性を保つために太陽風から電子が供給され、その際に顕著な電子加速を伴う。また、電場に強い広帯域ノイズが観測され、沿磁力線電子ビームの 2 流体不安定による静電孤立波を反映しているものと考えられる。
- (2) 磁場が月面に接続している場合は、太陽風からではなく夜側月面から電子が供給されるが、その際に加速は伴わない。広帯域ノイズが見られる場合もあるが、強度は弱い。広帯域ノイズが見られない場合もある。

特に(2)のケースについては未解明な点が多く、平成 26 年度以降の新たな研究によってその原因を解明したい。

#### 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 3 件)

① Shoichiro Yokota, Yoshifumi Saito, Kazushi Asamura, Masaki N. Nishino, Tadateru I. Yamamoto, Hideo Tsunakawa, Hidetoshi Shibuya, Masaki Matsushima, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Masaki Fujimoto, Toshio Terasawa, Kaguya observation of the ion acceleration around a lunar crustal magnetic anomaly, *Planetary and Space Science*, 査読有り, doi:10.1016/j.pss.2014.02.007, 2014.

② Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Yoshifumi Saito, Hideo Tsunakawa, Yoshiya Kasahara, Mariko Kawamura, Masaki Matsushima, Futoshi Takahashi, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Yoshitaka Goto, Kozo Hashimoto, Yoshiharu Omura, Atsushi Kumamoto, Takayuki Ono, Shoichiro Yokota, Type-II entry of solar wind protons into the lunar wake: Effect of magnetic connection to the night-side surface, *Planetary and Space Science*, 査読有り, 87, 106-114, doi:10.1016/j.pss.2013.08.017, 2013.

③ Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Hideo Tsunakawa, Masaki Matsushima, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Control of lunar external magnetic enhancements by IMF polarity: A case study, *Planet. Space Sci.*, 査読有り, doi:10.1016/j.pss.2012.09.011, 2012.

[学会発表] (計 16 件)

(1) M.N. Nishino, M. Fujimoto, Y. Saito, H. Tsunakawa, Y. Kasahara, M. Kawamura, M. Matsushima, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, Y. Goto, K. Hashimoto, Y. Omura, A. Kumamoto, T. Ono, S. Yokota, Type-II entry of solar wind protons into the lunar wake: Effects of magnetic connection to the night-side surface, EGU General Assembly 2014, 2014年4月28日, オーストリア、ウィーン

(2) Masaki N. Nishino, Yoshifumi Saito, Hideo Tsunakawa, Futoshi Takahashi, Shoichiro Yokota, Hidetoshi Shibuya, Masaki Matsushima, Hisayoshi Shimizu, Masaki Fujimoto, Solar wind proton reflection by lunar crustal magnetic fields observed at low altitude, SELENE Symposium 2014, 2014年3月4日, 東京都三鷹市、国立天文台

(3) M.N. Nishino, M. Fujimoto, Y. Saito, H. Tsunakawa, Y. Kasahara, M. Kawamura, M. Matsushima, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, Y. Goto, K. Hashimoto, Y. Omura, A. Kumamoto, T. Ono, S. Yokota, Type-II entry of solar wind protons into the lunar wake: Effects of magnetic connection to the night-side surface, Symposium on Planetary Science 2014, 2014年2月20日, 仙台市、東北大学

(4) M.N. Nishino, M. Fujimoto, Y. Saito, H. Tsunakawa, Y. Kasahara, M. Kawamura, M. Matsushima, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, Y. Goto, K. Hashimoto, Y. Omura, A. Kumamoto, T. Ono, S. Yokota, Type-II entry of solar wind protons into the lunar wake: Effects of magnetic connection to the night-side surface, AGU Fall Meeting 2013, 2013年12月13日, 米国・サンフランシスコ

(5) M.N. Nishino, M. Fujimoto, Y. Saito, H. Tsunakawa, Y. Kasahara, M. Kawamura, M. Matsushima, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, Y. Goto, K. Hashimoto, Y. Omura, A. Kumamoto, T. Ono, S. Yokota, Type-II entry of solar wind protons into the lunar wake: Effects of magnetic connection to the night-side surface, ISAS Workshop: Magnetospheric Plasmas 2013, 2013年11月11日～13日, 東京都目黒区、東京工業大学

(6) Masaki N. Nishino, Y. Saito, H. Tsunakawa, F. Takahashi, M. Fujimoto, S. Yokota, M. Matsushima, H. Shibuya, H. Shimizu, Solar wind proton reflection at Reiner Gamma Anomaly observed by SELENE, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第134回講演会, 2013年11月4日, 高知県高知市、高知大学

(7) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto,

Yoshifumi Saito, Hideo Tsunakawa, Futoshi Takahashi, Yoshiya Kasahara, Takayuki Ono, Shoichiro Yokota, Mariko Kawamura, Kaguya's view of solar wind interaction with the Moon, AOGS 2013, 2013年6月25日, オーストラリア、ブリスベン市 (招待講演)

(8) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Yoshifumi Saito, Mariko Kawamura, Hideo Tsunakawa, Yoshiya Kasahara, Masaki Matsushima, Futoshi Takahashi, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Yoshitaka Goto, Kozo Hashimoto, Yoshiharu Omura, Atsushi Kumamoto, Takayuki Ono, Shoichiro Yokota, Type-II entry of solar wind protons into the lunar wake as a general phenomenon, 日本地球惑星科学連合 連合大会 2013, 2013年5月23日, 千葉市、幕張メッセ国際会議場

(9) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Hideo Tsunakawa, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Hidetoshi Shibuya, Masaki Matsushima, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Solar wind proton reflection by lunar crustal magnetic fields observed at low altitude, AGU Fall Meeting, 2012年12月06日, サンフランシスコ

(10) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Hideo Tsunakawa, Masaki Matsushima, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Solar wind proton reflection by lunar crustal magnetic fields observed at low altitude, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第132回講演会, 2012年10月22日, 札幌コンベンションセンター

(11) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Hideo Tsunakawa, Hidetoshi Shibuya, Futoshi Takahashi, Hisayoshi Shimizu, Masaki Matsushima, Interaction of the solar wind and small magnetic obstacles: Solar wind deceleration and magnetic enhancement above lunar crustal fields, AOGS 2012, 2012年08月14日, シンガポール

(12) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Hideo Tsunakawa, Hidetoshi Shibuya, Futoshi Takahashi, Hisayoshi Shimizu, Masaki Matsushima, Yoshifumi Saito, Solar wind control of lunar external magnetic enhancement: A case study, AOGS 2012, 2012年08月14日, シンガポール

(13) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Hideo Tsunakawa, Hidetoshi Shibuya, Futoshi Takahashi, Hisayoshi Shimizu, Masaki Matsushima, Yoshifumi Saito, Solar wind control of lunar external magnetic enhancement: A case

study, 地球惑星科学連合 2012 年連合大会,  
2012 年 05 月 20 日, 幕張メッセ国際会議場

(14) M. N. Nishino, M. Fujimoto, Y. Saito, S. Yokota, H. Tsunakawa, M. Matsushima, H. Shibuya, H. Shimizu, F. Takahashi, Solar wind proton deceleration at higher altitude above lunar magnetic anomalies, AGU Fall Meeting 2011, 2011 年 12 月 8 日, San Francisco, US

(15) M. N. Nishino, M. Fujimoto, Y. Saito, S. Yokota, H. Tsunakawa, M. Matsushima, H. Shibuya, H. Shimizu, F. Takahashi, Solar wind proton deceleration at higher altitude above lunar magnetic anomalies, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第 130 回講演会, 2011 年 11 月 3 日, 神戸市, 神戸大学

(16) M. N. Nishino, M. Fujimoto, Y. Saito, S. Yokota, H. Tsunakawa, M. Matsushima, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, Solar wind proton deceleration at higher altitude above lunar magnetic anomalies, EPSC 2011, 2011 年 10 月 6 日, Nantes, France

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

西野真木 (NISHINO, Masaki)

名古屋大学・大学院工学研究科・研究員

研究者番号 : 5 0 4 6 6 7 9 4