

機関番号：82645

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21740359

研究課題名（和文）SELENE観測データに基づく月ウェイク領域プラズマ環境の解明

研究課題名（英文）Study of plasma environment of the lunar wake by SELENE data

研究代表者

西野 真木（NISHINO MASAKI）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・開発員

研究者番号：50466794

研究成果の概要（和文）：月周回衛星SELENEによる観測データを用い、太陽風の粒子が月のウェイク領域に進入する素過程および波動粒子相互作用を解明した。また、ウェイク領域に地球磁気圏の衝撃波が突入した際の様子を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We analyzed SELENE data to reveal basic processes and wave-particle interactions by which solar wind particles come into the lunar wake. We revealed behaviors of the Earth's bow shock in the lunar wake.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

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：太陽風・惑星間空間、月プラズマ科学、月・太陽風相互作用

1. 研究開始当初の背景

過去の研究によって、月周辺での太陽風の電子の振る舞いは比較的よく理解されてきた。特に、太陽風の電子は太陽風流速と比較して熱速度が速いために、その一部が夜側の月面付近に侵入できることが知られていた。それに対して、太陽風のイオンは熱速度が遅いため、夜側にはなかなか侵入することができないと考えられていた。すなわち、月の夜側は電子のほうが過剰な状態になっており、そのため内向きの電場が形成される。この電場によって太陽風イオンが徐々に内側へと引き込まれる様子が実際に観測されている [Ogilvie et al., 1996]。ただし、このイオン観測は月から 10000 km 程度離れた場所で

行われたものであり、高度 100 km の月周回軌道でのイオンの振る舞いは知られていなかった。

さて、「かぐや」のイオン観測の一つの大きな初期成果は、太陽風プロトンの昼側月面での反射・散乱の発見である [Saito et al., 2008]。月面に衝突した太陽風プロトンのうち、0.1～1%程度がプロトンとして反射し、太陽風の電場によって加速されて再び宇宙空間に飛んでゆくことが明らかになった。しかし、これらの反射プロトンの行き先は不明であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、月周回衛星 SELENE の観測データを用い、月ウェイクの様子を明らかにすることである。特に、太陽風イオンのウェイク領域への侵入メカニズムとその影響を調べる。さらに、ウェイク領域で地球磁気圏の衝撃波の振る舞いを調べることを目的とする。

3. 研究の方法

月周回衛星 SELENE (かぐや) の観測データを用いる。プラズマ粒子は PACE、磁場は LMAG、波動は LRS の各機器によって取得されたものである。SELENE の軌道は北極と南極を通過する極軌道であり、高度は約 100 km で、約 2 時間で月を 1 周する。

観測に加えて、月周辺環境を模擬したシミュレーション計算も行い、考案したモデルの正当性を評価する。

下記の 4-4 の研究に関しては、SELENE データに加えて中華人民共和国の嫦娥 1 号のデータも用いる。

4. 研究成果

4-1. タイプ 1 侵入

まず、太陽風イオンが磁場垂直方向の運動にともなってウェイクへ流入するメカニズムを明らかにした(タイプ 1 侵入)。すなわち、有限の熱速度を持つ太陽風イオンがジャイロ運動をする際に、ウェイク境界付近の内向き電場によって加速・減速を受けながらウェイクに侵入するというものである。イオンのエネルギー増加・減少が出現する地点は、月周辺の惑星間空間磁場(IMF)の向きに依存する。即ち、 B_y が正の値のときには南半球で加速・北半球で減速が起き、 B_y が負の値のときには南半球で減速・北半球で加速が起きる。これらの様子が顕著に観測されるのは、衛星の軌道が昼夜子午面に近い場合である。

今回発見した太陽風プロトン流入のメカニズムを解明するために、モデル計算を行った。ウェイク境界に 300 V の電位差に対応する電場を仮定した(図 2a)。ウェイク境界の電場を含めない計算では加速も減速も起きない。それに対して、ウェイク境界の電場を含めた計算では、南半球での加速、北半球での減速を再現することができました。つまり、ウェイク付近に存在する内向き電場によって、太陽風プロトンが磁場垂直方向に加速・減速を受けながらウェイクに侵入することが確か米良得た。

計算では、「かぐや」の飛行する 100 km という低高度(つまり月のごく近くの夜側領域)であっても太陽天頂角(太陽直下点からの角度)150 度付近まではプロトンが侵入しうることが示された。これをタイプ 1 侵入と呼ぶが、この侵入メカニズムでは太陽天頂角 150 度を越えて太陽風プロトンが侵入することはできないことも分かった。

4-2. タイプ 2 侵入

ところが SELENE は、タイプ 1 侵入では説明不可能なウェイク最深部でも太陽風起源と思われるイオンを観測した。プロトン侵入が観測された期間の磁場は B_x (太陽方向成分)が比較的小さく、 B_y が負の値(夕方から朝方へ向く方向)であった。観測データでは、昼側の月面で反射したプロトンの一部が加速されてウェイクの最深部へ侵入しているように見えた。そこで、昼側月面で反射したプロトンが太陽風の電場で再加速され、磁場垂直方向の回転運動によって夜側へ侵入するというモデルを考えた。その真偽を確かめるために、昼側の月面で反射したプロトンの軌道を計算したところ、反射したプロトンの一部が加速されて夜側の最深部へと飛び込んでゆくことが確かめられた。

このプロセスは「タイプ 2 侵入」と呼ばれており、主として磁場に垂直な方向の速度成分によって担われる。また、タイプ 2 侵入が発生するための条件には、惑星間空間磁場の B_x (太陽方向成分)が小さく、 B_y (朝夕方向成分)や B_z (南北方向成分)が支配的であることが知られている。

4-3. タイプ 2 侵入による波動励起

さて、このタイプ 2 侵入によって太陽風プロトンがウェイクに入った場合、電気的中性を保つために電子を供給する必要がある。ところが、電子のジャイロ半径はプロトンより遙かに小さく、プロトンと同じ軌道ではウェイクに侵入できないはずである。したがって、電子はプロトンの侵入経路とは異なり、磁力線に沿って供給されることが予想された。また、その磁力線の両端が太陽風に接続している場合には、両端から引き寄せられた電子の不安定性により波動が励起される可能性がある。これらを確かめるため、「かぐや」が観測した粒子・磁場・波動のデータを比較した。

磁場の B_y 成分が卓越している期間(タイプ 2 侵入の発生条件)で、ウェイク最深部でイオンが観測された期間に着目した。イオンの出現と同時に電子のフラックスも上昇し、さら

にプラズマ波動も検出された。このプラズマ波動は BEN (Broadband Electrostatic Noise、広帯域静電ノイズ) と呼ばれるものであり、1 kHz (観測下限) から 30 kHz 程度までの広い周波数帯に及ぶ。BEN は地球磁気圏尾部などで観測される現象であり、電子の二流体不安定性によって励起された静電孤立波が BEN の正体であることが知られている。そこで電子の分布関数を調べたところ、磁力線平行方向と反平行方向の成分が卓越しており、電子二流体不安定性によって BEN が励起されるというシナリオと一致する。また、このとき電子は磁力線方向に 1keV 程度まで加速されており、周囲の太陽風から引き込まれる際に加速を受けていることが分かる。これは、プロトン侵入領域でプラスの電荷が過剰になったために外向き電場が発生し、その電場によって太陽風の電子が加速されてウェイクに引き込まれたことを示す。

今回の「かぐや」プラズマ観測による発見は、これまでのウェイク環境の常識を覆すものである。すなわち、これまで「ウェイク最深部には太陽風プロトンは全く侵入できず、プラズマ波動の活動度は極めて低い」と考えられてきたが、実際には「散乱プロトンが侵入することによって周囲の太陽風から電子を引き寄せ、BEN を励起している」ことが明らかに分かった。つまり、月のウェイク最深部でもプラズマのダイナミックな活動が発生していることが明らかになった。

4-4. 月ウェイクでの地球磁気圏衝撃波

太陽風は超音速であるため地球磁気圏の全面に衝撃波が形成される。月の軌道は衝撃波を交差するため、月ウェイクと衝撃波が相互作用することが予想された。そこで、SELENE と嫦娥 1 号の同時観測データを用い、衝撃波が月を横切る際の様子を調べた。

その結果、月の夜側では衝撃波面が定かではなくなり、磁場が非常になだらかに変化していることが分かった。物理的には、月で太陽風プラズマの多くが吸収されてしまうためにウェイク領域は低密度であり、ウェイクの Alfvén 速度が非常に高くなるため、fast-mode の衝撃波を維持できなくなるものと解釈できる。

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 5 件)

① M. N. Nishino, K. Maezawa, M. Fujimoto, Y. Saito, S. Yokota, K. Asamura, T. Tanaka, H. Tsunakawa, M. Matsushima, F. Takahashi, T. Terasawa, H. Shibuya, H. Shimizu, Pairwise energy gain-loss feature of solar wind protons in the near-Moon wake, Geophysical Research Letters, 査読有, 36, 2009, L12108.

② M. N. Nishino, M. Fujimoto, K. Maezawa, Y. Saito, S. Yokota, K. Asamura, T. Tanaka, H. Tsunakawa, M. Matsushima, F. Takahashi, T. Terasawa, H. Shibuya, H. Shimizu, Solar-wind proton access deep into the near-Moon wake, Geophysical Research Letters, 査読有, 36, 2009, L16103.

③ M. N. Nishino, M. Fujimoto, Y. Saito, S. Yokota, K. Asamura, T. Tanaka, H. Tsunakawa, H. Shibuya, M. Matsushima, H. Shimizu, F. Takahashi, T. Terasawa, SELENE MAP Team, Plasma environment of the lunar wake observed by SELENE-MAP, Proceedings of the ISAS lunar and planetary symposium, 査読無, 41, 2009, AA0064291012.

④ M. N. Nishino, M. Fujimoto, Y. Saito, S. Yokota, Y. Kasahara, Y. Omura, Y. Goto, K. Hashimoto, A. Kumamoto, T. Ono, H. Tsunakawa, M. Matsushima, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, T. Terasawa, Effect of the solar wind proton entry into the deepest lunar wake, Geophysical Research Letters, 査読有, 37, 2010, L12106.

⑤ Masaki N. Nishino, Xiao-Dong Wang, Masaki Fujimoto, Hideo Tsunakawa, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Wei Bian, Chun-Lai Li, Hideo Tsunakawa, Masaki Matsushima, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Toshio Terasawa, Anomalous deformation of the Earth's bow shock in the lunar wake: Joint measurement by Chang'E-1 and SELENE, Planetary and Space Science, 査読有, 2011, 378-386.

[学会発表] (計 2 1 件)

(1) M. N. Nishino, M. Fujimoto, K. Maezawa, Y. Saito, S. Yokota, K. Asamura, T. Tanaka, H. Tsunakawa, H. Shibuya, M. Matsushima, H. Shimizu, F. Takahashi, T. Terasawa, Intrusion of the solar wind ions into the lunar low-altitude wake observed by SELENE (KAGUYA), European Geophysical Union

General Assembly 2009, 2009年4月23日, Austria, Vienna.

(2) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Kiyoshi Maezawa, Yoshifumi Saito, Yokota Shoichiro, Kazushi Asamura, Takaaki Tanaka, Hideo Tsunakawa, Hidetoshi Shibuya, Masaki Matsushima, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, and Toshio Terasawa, Intrusion of the solar wind ions into the lunar low-altitude wake observed by SELENE (KAGUYA), 地球惑星科学連合大会 2009, 2009年5月18日, 千葉市美浜区・幕張メッセ国際会議場

(3) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Kiyoshi Maezawa, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Kazushi Asamura, Takaaki Tanaka, Hideo Tsunakawa, Hidetoshi Shibuya, Masaki Matsushima, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Toshio Terasawa, Two mechanisms of solar-wind proton entry deep into the near-Moon wake revealed by SELENE (KAGUYA), The 42nd ISAS Lunar and Planetary Symposium, 2009年8月6日, 相模原市・宇宙科学研究本部.

(4) Masaki N. Nishino, Kiyoshi Maezawa, Masaki Fujimoto, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Kazushi Asamura, Takaaki Tanaka, Hideo Tsunakawa, Hidetoshi Shibuya, Masaki Matsushima, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Toshio Terasawa, KAGUYA MAP-PACE Team, KAGUYA MAP-LMAG Team, Intrusion of the solar wind protons into the near-Moon wake observed by SELENE (KAGUYA), AOGS 2009, 2009年8月13日, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre.

(5) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Kiyoshi Maezawa, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Kazushi Asamura, Takaaki Tanaka, Hideo Tsunakawa, Hidetoshi Shibuya, Masaki Matsushima, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Toshio Terasawa, Two mechanisms of solar-wind proton entry deep into the near-Moon wake revealed by SELENE (KAGUYA), European Planetary Science Congress 2009, 2009年9月19日, Germany, Potsdam.

(6) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Kiyoshi Maezawa, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Kazushi Asamura,

Takaaki Tanaka, Hideo Tsunakawa, Hidetoshi Shibuya, Masaki Matsushima, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Toshio Terasawa, Solar-wind proton access deep into the near-Moon wake observed by SELENE (KAGUYA), 地球電磁気・地球惑星圏学会 第126回講演会, 2009年9月28日, 金沢市・金沢大学.

(7) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Kiyoshi Maezawa, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Kazushi Asamura, Takaaki Tanaka, Hideo Tsunakawa, Hidetoshi Shibuya, Masaki Matsushima, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Toshio Terasawa, Asymmetric nightside surface charging of the Moon in the solar wind, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第126回講演会, 2009年9月30日, 金沢市・金沢大学.

(8) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Kiyoshi Maezawa, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Kazushi Asamura, Takaaki Tanaka, Hideo Tsunakawa, Hidetoshi Shibuya, Masaki Matsushima, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Toshio Terasawa, Two mechanisms of solar-wind proton entry deep into the near-Moon wake revealed by SELENE, The Lunar Plasma Environment Science Workshop, 2009年10月22日, 中華人民共和國澳門特別行政區・澳門科技大學.

(9) Masaki N. Nishino, PACE, LMAG, and LRS members, Signatures of electrons and waves in the near-Moon wake, The Lunar Plasma Environment Science Workshop, 2009年10月22日, 中華人民共和國澳門特別行政區・澳門科技大學.

(10) M. N. Nishino, K. Maezawa, M. Fujimoto, Y. Saito, S. Yokota, K. Asamura, T. Tanaka, H. Tsunakawa, H. Shibuya, M. Matsushima, H. Shimizu, F. Takahashi, T. Terasawa, (Invited Presentation) Intrusion of the solar wind protons into the near-Moon wake revealed by SELENE (KAGUYA), AGU Fall Meeting 2009, 2009年12月16日, アメリカ合衆国, San Francisco, Moscone Convention Center.

(11) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Yoshiya Kasahara, Yoshiharu Omura, Yoshitaka Goto, Kozo Hashimoto, Atsushi Kumamoto, Takayuki Ono, Hideo Tsunakawa,

Masaki Matsushima, Futoshi Takahashi, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Toshio Terasawa, Effect of the solar wind entry into the deepest lunar wake, 第11回惑星圏研究会, 2010年3月17日, 仙台市・東北大学.

(12) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Yoshiya Kasahara, Yoshiharu Omura, Yoshitaka Goto, Kozo Hashimoto, Atsushi Kumamoto, Takayuki Ono, Hideo Tsunakawa, Masaki Matsushima, Futoshi Takahashi, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Toshio Terasawa, Effect of solar-wind proton entry into the near-Moon wake, European Geophysical Union General Assembly 2009, 2010年5月7日, Vienna, Austria.

(13) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Yoshiya Kasahara, Yoshiharu Omura, Yoshitaka Goto, Kozo Hashimoto, Atsushi Kumamoto, Takayuki Ono, Hideo Tsunakawa, Masaki Matsushima, Futoshi Takahashi, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Toshio Terasawa, Effect of solar-wind proton entry into the deepest lunar wake, 地球惑星科学連合2010年連合大会, 2010年5月28日, 千葉市美浜区、幕張メッセ国際会議場.

(14) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Yoshiya Kasahara, Yoshiharu Omura, Yoshitaka Goto, Kozo Hashimoto, Atsushi Kumamoto, Takayuki Ono, Hideo Tsunakawa, Masaki Matsushima, Futoshi Takahashi, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Toshio Terasawa, (Invited Presentation) Effect of solar-wind proton entry into the lunar wake, 2010 Western Pacific Geophysics Meeting, 2010年6月22日, 台湾(中華民國), 台北.

(15) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Yoshiya Kasahara, Yoshiharu Omura, Yoshitaka Goto, Kozo Hashimoto, Atsushi Kumamoto, Takayuki Ono, Hideo Tsunakawa, Masaki Matsushima, Futoshi Takahashi, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Toshio Terasawa, Effect of solar-wind proton entry deep into the lunar wake, European Planetary Science Congress 2010, 2010年9月23日, Rome, Italy.

(16) Masaki N. Nishino, Yoshifumi Saito, Hideo Tsunakawa, Futoshi Takahashi, Yoshiya Kasahara, (Invited Presentation) Interaction between the solar wind flow and the lunar magnetic anomalies, 5th Alfven Conference, 2010年10月8日, 札幌市、北海道大学.

(17) Masaki N. Nishino, Xiao-Dong Wang, Masaki Fujimoto, Hideo Tsunakawa, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Wei Bian, Chun-Lai Li, Hideo Tsunakawa, Masaki Matsushima, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Toshio Terasawa, Anomalous deformation of the Earth's bow shock in the lunar wake: Joint measurement by Chang'E-1 and SELENE, 地球電磁気・地球惑星圏学会第128回講演会, 2010年11月1日, 沖縄県那覇市、市町村自治会館.

(18) Masaki N. Nishino, Masaki Fujimoto, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Hideo Tsunakawa, Masaki Matsushima, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Toshio Terasawa, Enhanced electron release from the lunar night-side surface induced by solar-wind proton entry into the wake, 地球電磁気・地球惑星圏学会第128回講演会, 2010年11月3日, 沖縄県那覇市、市町村自治会館.

(19) Masaki N. Nishino, Xiao-Dong Wang, Masaki Fujimoto, Hideo Tsunakawa, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Wei Bian, Chun-Lai Li, Hideo Tsunakawa, Masaki Matsushima, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Toshio Terasawa, Anomalous deformation of the Earth's bow shock in the lunar wake: Joint measurement by Chang'E-1 and SELENE, AGU Fall meeting 2010, 2010年12月17日, San Francisco, CA, アメリカ合衆国.

(20) Masaki N. Nishino, Lunar plasma and electromagnetic environment observed by SELENE (including joint measurement with Chang'E-1), 月球化學元素與礦物學國際研討會 (International Workshop on Lunar Chemical Elements and Mineralogy), 2011年1月14日, 中華人民共和國澳門特別行政區、澳門科技大學.

(21) Masaki N. Nishino, Xiao-Dong Wang, Masaki Fujimoto, Hideo Tsunakawa, Yoshifumi Saito, Shoichiro Yokota, Wei

Bian, Chun-Lai Li, Hideo Tsunakawa, Masaki Matsushima, Hidetoshi Shibuya, Hisayoshi Shimizu, Futoshi Takahashi, Toshio Terasawa, Anomalous deformation of the Earth's bow shock in the lunar wake: Joint measurement by Chang'E-1 and SELENE, The International Symposium on Planetary Science 2011, 2011年3月9日, 仙台市、東北大学.

研究者番号：

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西野 真木 (NISHINO MASAKI)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究所・開発員
研究者番号：50466794

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()