

令和元年5月22日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26400477

研究課題名(和文)月周回衛星SELENE観測データによる月の電磁気環境の詳細の解明

研究課題名(英文)Lunar electromagnetic environment revealed by SELENE (Kaguya)

研究代表者

西野 真木 (NISHINO, MASAKI)

名古屋大学・工学研究科・特任講師

研究者番号：50466794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：月と太陽風の相互作用に関して、未解明であった現象の物理メカニズムを月周回衛星 Kaguya (SELENE)のデータ解析によって明らかにした。具体的には、(1)ウェイク中の磁気異常の様子、(2)地球磁気圏前面のフォアショック中での月の電位変化、(3)月周辺での太陽風磁場が減少するイベントの発見、(4)月周辺での波動粒子相互作用のうち静電孤立波の励起メカニズムの同定、といった成果が得られた。また、観測データの解析結果に基づき、ウェイク境界の新たなモデルを提唱した。これらは理工の両面で月面環境学の基礎となる成果であるとともに、他の岩石惑星や小天体にも広く応用が可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は月周回衛星Kaguya(SELENE)の観測データを用いて月面の電磁環境を推定したものであり、理工の両面において将来の月面探査の基礎データとなるものである。また、月と太陽風の相互作用のうち未解明であった現象の物理メカニズムを明らかにすることが出来たが、これは月以外の天体(水星や小天体等)にも広く応用することが可能である。

研究成果の概要(英文)：We studied unsolved physical mechanism of interactions between the solar wind and the Moon, using observational data by the lunar orbiter Kaguya (SELENE). Main results are (1) signature of strong magnetic anomaly in the lunar wake, (2) variations of the lunar surface potential in the terrestrial foreshock, (3) discovery of the decrease in the interplanetary magnetic field intensity around the Moon, and (4) identification of excitation mechanism of electrostatic solitary waves around the Moon. In addition, we proposed a new model of the lunar wake boundary, based on the observations. These results would become the basis of the lunar environmental studies in both aspects of science and engineering, and can be widely applicable to other rocky (exo)planets and small bodies.

研究分野：月面環境学、磁気圏プラズマ物理学

キーワード：月面環境学 月プラズマ SELENE 太陽風 太陽風・月相互作用 波動粒子相互作用

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

月と太陽風の相互作用は、これまで観測データが限られていたため理解があまり進んでいなかった。特に、周回軌道上でのイオンおよび静電波の観測は Kaguya (SELENE) が世界初であったことから、世界的に見てもそのデータ解析結果に寄せる期待が非常に大きかった。また、申請者らが本研究に先だって実施した研究を通じて、これまでに予想していなかった現象を発見し、その物理過程の解明が必要となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、月の電磁気環境のうち月と太陽風の相互作用の詳細を調べる。特に、これまで観測されつつもメカニズムが未解明であった現象に関して、月周回衛星による観測データを解析することでその物理過程を同定することを目的とする。

3. 研究の方法

観測データは月周回衛星 Kaguya (SELENE) のイオン・電子・磁場のデータを用いる。Kaguya は JAXA の月探査衛星であり、2007 年 12 月から 2009 年 6 月の約 1 年半にわたって月の周回軌道上でプラズマ環境の総合観測をおこなった。月面からの高度は 2008 年 12 月までは 100km 程度であったが、2009 年には 50km や 10km といった低高度での観測を実施した。

4. 研究成果

本研究では、大きく分けて下記の 5 項目の成果が得られた。

(1) ウェイク中の磁気異常

月が太陽風中に存在しているとき、月の夜側にはウェイクと呼ばれる低密度領域が形成されるが、強い磁気異常がウェイク中にあるときのその場所でのプラズマの様子はこれまで知られていなかった。そこで我々は、月周回衛星 SELENE の低高度での観測データを用い、強い磁気異常がウェイクに存在するときのプラズマの様子を詳細に調べたところ、磁気異常の閉じた磁力線上での電子の様子を初めて捉えることに成功した。具体的には、強い磁気異常の上空 15 km では、磁気異常の閉じた磁力線上に中エネルギー (150-300 eV 程度) の電子が捕捉されているとともに、低エネルギー (150eV 以下) の電子が月面から上昇している。中エネルギー電子は磁場平行・反平行方向の両方にロスコーンがあり、磁力線が閉じていることを示す。また、低エネルギー電子は双方向ビームになっており、閉じた磁力線の双方の足元 (月の表面) から電子が上昇していることを示している。

次に、磁場勾配ドリフトによる月面への電子の消失を見積もった。双極子磁場を仮定すると、閉じた磁力線上の電子は 1 秒以内にすべて月面に衝突して失われてしまうことが分かった。実際には電子が観測されているため、電子が別の場所から (例えば太陽風から) 供給するプロセスが機能していることを強く示唆する。

(2) フォアショックでの月の電位変化

月が太陽風中に存在しているとき、月の夜側にはウェイクと呼ばれる低密度領域が形成される。また、地球磁気圏の前面には定在衝撃波が形成されており、太陽風イオンが衝撃波面で加速されたうえ磁力線に沿って上流側へ反射される現象が知られている (この反射イオンが観測される領域をイオン・フォアショックと呼ぶ)。我々はこれまで月のウェイク領域への太陽風イオン流入過程を明らかにしてきたが、定在衝撃波で加速・反射された太陽風イオンが月のウェイクに流入することを明らかにするとともに、そのプロセスが月の電磁環境に大きな影響を与えることを明らかにした。

具体的には、月の夜側表面から磁力線に沿って衛星に向かって上昇してくる電子ビームのエネルギーが、通常のウェイクでは 100 eV 前後であるのに対して、衝撃波加速イオンが流入するときには 20 eV 程度まで減少する様子が観測された。このことは、イオンの流入によって夜側月面の静電ポテンシャルが大きく上昇していることを示している。

さらに、ウェイクに流入するイオン及び電子、さらにそれらが月面に衝突することによって放出される 2 次電子の電流バランスを考慮した解析をおこなった。月面への流入イオンが増加するときに電子の流入も増加する傾向が見られ、これは 2 次電子の放出を含めて全体として電流バランスが成立していることを示している。また、夜側月面のポテンシャルの上昇にはイオンの流入だけでなく 2 次電子の放出も寄与していることを示している。

(3) 月周辺での太陽風磁場の減少

これまでに報告されてきた月の前面での太陽風 (惑星間空間) 磁場の変化は、圧縮による増大であった。ところが我々は、月の前面で太陽風の磁場強度が減少するイベントを発見した。このイベントは、太陽風の磁場が流速ベクトルとほぼ平行に近く、かつ、月面の磁気異常が非常に弱いかほとんど無い領域で発生していた。月面では太陽風プロトンの一部が反射するが、磁場が平行であるため太陽風の誘導電場は小さく、反射プロトンは上流側にさかのぼることができ、その際にジャイロ運動を繰り返す。そのため、反磁性効果が顕著となり、その場の磁場の大きさを減少させるものと理解することができる。定量的には、磁気圧の減少分を反射プロ

トンのプラズマ圧が補い、全体としては周囲との圧力バランスが成立している。これは、反射プロトンの密度は低いが実効的な温度が高いため、プラズマ圧としては無視できない大きさになることが原因だと考えられる。

ところが、極域上空でも惑星間空間磁場が減少する観測例が見つかった。この観測を反射・散乱された太陽風陽子の圧力だけでは説明することが難しい。極域上空での磁場の減少は、先行研究の統計解析結果には見られないものであり、メカニズムの解明には今後のさらなる研究が必要である。なお、月の夜側ウェイク境界だけでなく昼側にも反磁性電流系が形成されることを提唱した。(これらの内容は国際学術誌 *Icarus* に投稿し、2019年5月時点で査読中。)

(4) 波動粒子相互作用：静電孤立波と太陽風 strahl 電子

月周辺で静電孤立波が観測される場合について、その励起機構を考察した。特に月ウェイクと太陽風の境界領域に関して、静電孤立波が観測される際のプラズマの観測データを詳しく解析したところ、太陽風の strahl 電子がウェイクに流入する際に静電孤立波が観測される傾向が見られた。静電孤立波の励起機構としては電子の二流体不安定が知られており、磁力線に沿ってウェイク内部に向かって高速で流れ込む strahl 成分と、何らかのメカニズムによってウェイク内部から反射されてきた成分による二流体不安定が原因であると推察される。(論文投稿準備中)

(5) ウェイクの理論：イオン境界領域モデル

これまでのデータ解析を通じて、ウェイク境界でのイオンと電子の運動を考慮した新たなモデルの着想に至り、その妥当性について SELENE 観測データをもとに議論した。既存のモデルでは、太陽風イオンの熱速度は考慮しているものの、3次元的なジャイロ運動は考慮されていない。また、イオンと電子の速度差により分極電場が生成され、その電場によってイオンがウェイク内部に引き寄せられると考えられている。それに対して本研究では、イオン運動の3次元性を考慮し、太陽風イオンがある程度は分極電場の効果によらずにウェイクに流入することに着目した。この領域をウェイク・イオン境界層と定義し、分極電場がその最も内側に形成される可能性を指摘した。月面から上昇してくる電子ビームのエネルギー変化は提案したモデルによって矛盾なく説明することができる。

さらに、この電子ビームのエネルギー変化(約 50V)はウェイク境界層に存在するポテンシャル差と一致しているべきであるが、1990年代の先行研究で報告されたポテンシャル差(約 400V)よりも1桁小さいという点である。先行研究ではイオンの観測データからポテンシャル差を推定していたが、その計算方法に誤りがある可能性が高い。同じデータを用いて我々が計算するとポテンシャル差は約 50V 程度となり、*Kaguya* の観測結果と矛盾しない値が得られた。したがって、本研究によってウェイク境界のポテンシャル差を定量的に示すことができたと言える。(論文投稿準備中)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

T.Nakagawa, M.N.Nishino, H.Tsunakawa, F.Takahashi, H.Shibuya, H.Shimizu, M.Matsushima, Y.Saito, Electromagnetic ion cyclotron waves detected by *Kaguya* and *Geotail* in the Earth's magnetotail, *J. Geophys. Res.* doi:10.1002/2017JA024505, 2018. 査読有り

M. N. Nishino, Y.Harada, Y.Saito, H. Tsunakawa, F.Takahashi, S.Yokota, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, *Kaguya* observations of the lunar wake in the terrestrial foreshock: Surface potential change by bow-shock reflected ions, *Icarus*, 293, 45-51, doi:10.1016/j.icarus.2017.04.005, 2017. 査読有り

H.Usui, Y.Miyake, M.N.Nishino, T.Matsubara, J.Wang, Electron dynamics in the mini-magnetosphere above a lunar magnetic anomaly, *J. Geophys. Res.*, 122, doi:10.1002/2016JA022927, 2017. 査読有り

K.Terada, S.Yokota, Y.Saito, N.Kitamura, K.Asamura, M.N.Nishino, Biogenic oxygen from Earth transported to the Moon by a wind of magnetospheric ions, *Nature Astronomy* 1, doi:10.1038/s41550-016-0026, 2017. 査読有り

C.Lue, Y.Futaana, S.Barabash, Y.Saito, M.Nishino, M.Wieser, K.Asamura, A.Bhardwaj, P.Wurz, Scattering characteristics and imaging of energetic neutral atoms from the Moon in the terrestrial magnetosheath, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 432-445, doi:10.1002/2015JA021826, 2016. 査読有り

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, F.Takahashi, M.Fujimoto, Y.Harada, S.Yokota, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Electrons on closed field lines of lunar crustal fields in the solar wind wake, *Icarus*, 250, 238-248, doi:10.1016/j.icarus.2014.12.007, 2015. 査読有り

上記の他に、投稿中の論文が1件ある。

[学会発表](計21件)

M.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, Y.Kasahara, Y.Harada, S.Yokota, F.Takahashi, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Decrease of IMF strength on the lunar dayside and above the polar region observed by Kaguya, Symposium on Planetary Science 2019, 2019年

M.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, Y.Kasahara, Y.Harada, S.Yokota, F.Takahashi, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Decrease of IMF strength on the lunar dayside and above the polar region observed by Kaguya, 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2018年

M.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, Y.Harada, S.Yokota, F.Takahashi, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, A new model of the boundary layer of the lunar wake, 日本地球惑星科学連合2018年大会, 2018年

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, Y.Harada, S.Yokota, F.Takahashi, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, A reconsideration of the lunar wake boundary based on Kaguya observations, EGU General Assembly 2018, 2018年

M.N.Nishino, Y.Harada, Y.Saito, H.Tsunakawa, Y.Tsugawa, F.Takahashi, S.Yokota, M.Matsushima, H.Shibuya, Y.Shimizu, Current balance at the lunar night-side surface, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第142回講演会, 2017年

M.N.Nishino, Y.Kasahara, Y.Harada, Y.Saito, H.Tsunakawa, K.Hashimoto, F.Takahashi, S.Yokota, M.Matsushima, H.Shibuya, Y.Shimizu, Possible mechanisms of an ESW excitation, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第142回講演会, 2017年

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, Y.Harada, S.Yokota, F.Takahashi, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, A reconsideration of the lunar wake boundary, JpGU-AGU joint meeting 2017, 2017年

M.N.Nishino, Y.Saito, Y.Miyake, H.Tsunakawa, Y.Harada, S.Yokota, F.Takahashi, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Diamagnetic effect in the forenoon solar wind observed by Kaguya, EGU General Assembly 2017, 2017年

M.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, Y.Miyake, Y.Harada, S.Yokota, F.Takahashi, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Diamagnetic effect in the forenoon solar wind observed by Kaguya, AGU Fall Meeting 2016, 2016年

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, Y.Tsugawa, Y.Harada, F.Takahashi, S.Yokota, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, A statistical study of type-3 solar wind proton entry into the lunar wake, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第140回講演会, 2016年

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, Y.Harada, S.Yokota, F.Takahashi, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Decrease of magnetic field strength in the forenoon solar wind for parallel IMF, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 2016年

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, Y.Harada, Y.Tsugawa, F.Takahashi, S.Yokota, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Kaguya observations of the lunar wake in the terrestrial foreshock, EGU General Assembly 2016, 2016年

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, M.Fujimoto, Y.Harada, Y.Tsugawa, F.Takahashi, S.Yokota, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Kaguya observations of the lunar wake in the terrestrial foreshock, AGU Fall Meeting 2015, 2015年

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, Y.Tsugawa, Y.Harada, F.Takahashi, M.Fujimoto, S.Yokota, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Kaguya observations of the lunar plasma environment in the terrestrial foreshock, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第138回講演会, 2015年

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, M.Fujimoto, Y.Harada, F.Takahashi, S.Yokota, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Electrons on closed field lines of lunar crustal fields in the solar wind wake, AOGS 12th Annual Meeting, 2015年

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, M.Fujimoto, Y.Harada, F.Takahashi, S.Yokota, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Kaguya observations of the lunar wake in the terrestrial foreshock, 日本地球惑星科学連合 連合大会 2015大会, 2015年

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, F.Takahashi, M.Fujimoto, Y.Harada, S.Yokota, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Electrons on closed field lines of lunar crustal fields in the solar wind wake, EGU General Assembly 2015, 2015年

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, F.Takahashi, M.Fujimoto, Y.Harada, S.Yokota, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Electrons on closed field lines of lunar crustal fields in the solar wind wake, Symposium on Planetary Science 2015, 2015年

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, F.Takahashi, M.Fujimoto, Y.Harada, S.Yokota, M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Electrons on closed field lines of lunar crustal fields in the solar wind wake, AGU Fall Meeting 2014, 2014年

M.N.Nishino, Y.Saito, H.Tsunakawa, F.Takahashi, M.Fujimoto, S.Yokota, Y.Harada,

M.Matsushima, H.Shibuya, H.Shimizu, Electrons on closed field lines of lunar crustal fields in the solar wind wake, 第136回地球電磁気・地球惑星圏学会, 2014年

②1 M.N.Nishino, Y.Saito, Y.Kasahara, Y.Omura, K.Hashimoto, T.Ono, H.Tsunakawa, F.Takahashi, S.Yokota, M.Fujimoto, Plasma and wave observations in the deep lunar wake, URSI GASS 2014(招待講演), 2014年

〔その他〕

研究者向けの招待講演(計4件)

「月のプラズマ・電磁環境研究の現状」第135回宇宙科学談話会, JAXA 宇宙科学研究所, 2018年10月10日

「月表面の電磁環境」探査ミッション立案スクール(第6回)講義, 神戸大学, 2018年9月4日

ウェイクの電場や電流バランスに関する再考察, 宇宙環境におけるプラズマ波動粒子相互作用に関する基礎勉強会(神戸大学), 2017年

Our current understanding of the lunar electromagnetic environment (月の電磁環境研究の最新事情), STE 研究集会 宇宙惑星科学若手の会 夏の学校, 伊良湖, 2014年9月11日

アウトリーチ活動(計5件)

科学博物館サイエンスライブショー「ユニバース」ゲスト出演, 「月の環境を調べる(水素、酸素、そして水?)」, 2018年3月17日

科学博物館サイエンスライブショー「ユニバース」ゲスト出演, 「月の夜側で何が起きているか?」, 2017年6月24日

静岡県立島田高等学校, 特別授業「月と水星の科学と探査」, 2016年9月13日

科学技術館サイエンスライブショー「ユニバース」ゲスト出演, 「月の電磁気環境を調べる」, 2015年5月23日

宇宙博 2014, 有識者による説明(月の探査計画、水星探査計画 BepiColombo、月周回衛星 SELENE), 幕張メッセ, 2014年9月

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名: 齋藤 義文

ローマ字氏名: (SAITO, Yoshifumi)

所属研究機関名: 宇宙航空研究開発機構

部局名: 宇宙科学研究所

職名: 教授

研究者番号(8桁): 30260011

研究協力者氏名: 原田 裕己

ローマ字氏名: (HARADA, Yuki)

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 大学院理学研究科

職名: 助教

研究者番号(8桁): 90823386

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。