

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4月16日現在

機関番号：31303

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540461

研究課題名（和文）太陽風中の月及び月ウェイクの電磁環境

研究課題名（英文）Electromagnetic environment of the moon in the solar wind and the lunar wake

研究代表者

中川 朋子（NAKAGAWA TOMOKO）

東北工業大学・工学部・教授

研究者番号：40222161

研究成果の概要（和文）：太陽風プラズマが月面に吸着されるため月の下流側にできる低密度の領域「ウェイク」について、月面の帯電を考慮した粒子シミュレーションを行うことによって、夜側月面が負に帯電し正イオンを加速していることや太陽風磁場が電子の動きを制限して夜側月面の帯電が不均一となり非対称な電場を作っていることがわかった。昼側月面では太陽風の正イオンが月面で反射され、太陽風プラズマ中の波と共鳴して 0.01Hz と 0.03-5Hz の 2 種類の波を発生させていることがわかった。

研究成果の概要（英文）：The solar wind interaction with the moon was studied using a two-dimensional electromagnetic full particle simulation and Kaguya observation. The solar wind magnetic field controls the direction of the thermal flow of the electrons and causes an asymmetry of the negative charging of the downstream-side surface. The solar wind ions are accelerated by the negative surface charging, while the solar wind electrons are expelled by the negative charging and flow away along the field line producing streaks of enhancements of the electron density. On the dayside surface, 0.01 Hz and 0.03-5 Hz magnetohydrodynamic waves are excited by the solar wind protons reflected by the moon through cyclotron resonance.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|---------|--------|---------|
| 2009年度 | 900000 | 270000 | 1170000 |
| 2010年度 | 500000 | 150000 | 650000 |
| 2011年度 | 600000 | 180000 | 780000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2000000 | 600000 | 2600000 |

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、太陽風、プラズマ、ウェイク、帯電、月惑星電磁環境、MHD波、かぐや衛星

1. 研究開始当初の背景

1994年のGEOTAIL衛星による磁場変動観測から、月周辺に強い電場があることが予想されていたが、観測的な証拠が見つからず、2次元粒子シミュレーションにより

月周辺の電場構造を解析していた。おりしも「かぐや」月周回衛星による電磁場とプラズマの観測が始まり、イオンの加速や、ウェイク境界での波動の活発化、電子密度の南北非対称など、未解明の現象が次々に見つかり、

シミュレーションと衛星観測からの理解が求められていた。

2. 研究の目的

- (1) 月昼夜境界およびウェイク境界の電場構造が従来考えられてきた理論で理解できるのか確認し、
- (2) GEOTAIL で検出されたようなホイッスラー波励起の観測的証拠を見出し、
- (3) 新たに報告された諸現象、特にウェイク境界の磁場変動と密度非対称のメカニズムを解明する。

3. 研究の方法

- (1) 月によるウェイク形成とその周辺の電場構造を調べるため、月を完全不導体と近似し、太陽風プラズマ粒子を入射、月面に衝突して吸着した電荷は月面上を移動しないという仮定で2次元粒子コードによるシミュレーションを行う。さらに太陽風速度に対し斜め-45度の磁場と、それを横切ることにより生じる電場を初期条件として与えることによって太陽風磁場を導入し、その結果を解析して「かぐや」衛星観測結果と比較する。
- (2) 「かぐや」衛星搭載磁力計 LMAG によって観測された磁場変動を解析し、その波の種類と性質、発生機構を解明する。

4. 研究成果

- (1) 月面による吸着を考慮したシミュレーションに太陽風磁場を導入した結果、夜側月面が負に帯電し正イオンを加速するために、月のそばでは熱速度の高い電子よりもかえってイオンのほうが先にウェイク内へ進入していくことや、電場構造の非対象、電子密度の濃い部分が筋状に生じることが分かった。

電場構造の非対象は、磁場方向が太陽風の流れに対し45度または-45度の時にもっとも顕著である。これはちょうど地球軌道付近の太陽風磁場の向きと同じである。この非対象は、電子の運動が太陽風磁場によって制御され、月面の帯電に非一様性が生じることが原因である。

また、月の昼夜境界よりやや夜側のあたりから、磁力線より7-8度ずれた方向に月半径の10倍以上の距離にわたって筋状の電子密度の上昇がみられた。これは、太陽風磁場が月の夜側の負に帯電した領域に達した時、ポテンシャルを感じて磁力線に沿って流出する電子流として説明できることがわかった。月の夜側の帯電による静電ポテンシャルが電子の熱速度程度の大きさのため、磁力線に沿って流出する電子流もほぼ電子の熱速度程度となっており、これと太陽風バルク速度との合成で、流出電子の筋の方向が決まることがわかった。

- (2) 月が太陽風にさらされている期間中、「かぐや」衛星搭載の磁力計 MAP-PACE/LMAG

磁力計によって、月の昼間側ないし昼夜境界上で、特定のピーク周波数を持たない0.03 - 5 Hzの周波数帯の磁場変動と、0.01 Hzに鋭いピークを持つ2つの周波数帯の磁場変動が観測された。

①0.03 - 5 Hzの周波数帯の広帯域波

この磁場変動は、月面の固有磁場とはほとんど無関係に月の昼間側上空100kmの高度でほぼ常に観測され、さらにターミネータよりやや夜側に回り込んだところ(天頂角123度以内)でも観測されている。真夜中側では観測されていない。各成分に変動があるだけでなく磁場強度にも変動が見られ、圧縮成分があることが分かる。

昼側で常に観測されること、およびイオンサイクロトロン周波数よりも高い周波数から、月面で反射したプロトンが励起したホイッスラー波の可能性が考えられる。

②0.01 Hzの単色波

また一方、月が太陽風中にあるとき、月の昼間側ないし昼夜境界付近で、約100秒周期の磁場変動が「かぐや」衛星搭載の磁力計(MAP-LMAG)によってしばしば観測されている。この波は、ちょうど地球のBow Shock前面で反射されたイオン励起するupstream waveと同じように、月によって反射されたプロトンが太陽風中のMHD波とサイクロトロン共鳴したものと考えられる。

プロトンの反射には月面そのものによる散乱と、月の固有磁場と太陽風磁場の相互作用による反射の2つの可能性が考えられる。そのいずれが重要かを調べるため、「かぐや」MAP-LMAGによって観測された磁場データ(1秒平均値)を300秒ごとにフーリエ変換し、100秒周期の成分のパワーを月面上にマップとして示してみた。その結果、固有磁場の強いところに集中していることが示された。つまり、この100秒周期の波は、月の固有磁場によって反射されたプロトンが励起したものが中心的な役割を担っていると考えられる。

この波の発生機構は、地球磁気圏前面の衝撃波の上流のULF波と同様、反射プロトンと太陽風中の磁気流体波(MHD波)とのサイクロトロン共鳴と考えられるが、地球前面衝撃波上流のULF波と大きく異なっている点が磁場の回転方向であった。衝撃波上流のULF波では、9割以上が、観測者から見て左回りの波として検出されていたのに対し、月周回軌道上ではおよそ53%が左回り、残り47%が右回りであった。この比率はULF波のパワーに関わらずほぼ一定であった。この原因は、波を立てているプロトンの反射する方向の違いによると考えられる。衝撃波上流のULF波の場合、左回り太陽風の流れの方

向と波数ベクトルの方向が近いために、反射粒子から見て左回りに見えてサイクロトロン共鳴が起こるようになる場合は衛星から見てもドップラーシフトによって左回りに見えるのに対し、月周回軌道上の ULF 波の場合は、太陽風の流れの方向と反射粒子の運動方向がまちまちであるためにドップラーシフトへの寄与が異なり、衛星からみると右回りなのに反射粒子から見ると左回りに見えるという場合が起こり得て、このことが、右回り、左回りの両方がほぼ半分ずつ観測された原因と考えられる。かぐや衛星によって観測された波の伝搬方向は月面に垂直に近く、上記の説明を裏付けている。

観測された典型的な例について波数ベクトルの方向を求め、サイクロトロン共鳴条件を検証した結果、反射プロトンの速度の方向と波数ベクトルの方向が揃っていて、かつ、入射する太陽風の流れとは方向がずれている場合のみ解が存在することがし確認できた。同時にまた、この領域ではプロトンの温度が上がっていることも示された。

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4件)

- ① Nakagawa, T., A. Nakayama, F. Takahashi, H. Tsunakawa, H. Shibuya, H. Shimizu, and M. Matsushima, Large-amplitude monochromatic ULF waves detected by Kaguya at the moon, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 117, A04101, doi:10.1029/2011JA017249, 2012.
- ② Nakagawa, T., and S. Kimura, Role of the solar wind magnetic field in the interaction of a non-magnetized body with the solar wind: An electromagnetic 2-D particle-in-cell simulation, *Earth Planets Space*, 査読有, 63(6), pp. 477-486, doi:10.5047/eps.2011.02.006, 2011.
- ③ Nakagawa, T., F. Takahashi, H. Tsunakawa, H. Shibuya, H. Shimizu, and M. Matsushima, Non-monochromatic whistler waves detected by Kaguya on the dayside surface of the moon, *Earth Planets Space*, 査読有, 63(1), pp. 37-46, doi:10.5047/eps.2010.01.005, 2011.
- ④ 中川 朋子, KAGUYA/MAP/LMAG Team 綱川秀夫, 月周回軌道上の ULF 波の偏波特性について, 第130回地球電磁気・地球惑星圏学会, 神戸, 神戸大学, 2011年11月5日.
- ⑤ Nakagawa, T., Role of the surface charging in the solar wind interaction with a small, non-magnetized, electrically non-conducting body studied in a two-dimensional electromagnetic full particle simulation, XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, Turkey, 2011年8月19日.
- ⑥ 中川 朋子, ウェイク境界におけるイオンと電子の密度構造について, 日本地球惑星科学連合2011年大会, 千葉, 幕張メッセ国際会議場, 2011年5月27日.
- ⑦ 中川 朋子, 磁場をもたない小天体と太陽風の相互作用の2次元PICシミュレーション, 第128回地球電磁気・地球惑星圏学会, 沖縄, 沖縄県市町村自治会館, 2010年11月1日.
- ⑧ Nakagawa, T., F. Takahashi, H. Tsunakawa, A. Nakayama, H. Shibuya, H. Shimizu, M. Matsushima, Magnetic fluctuations produced by the solar-wind interaction with the Moon observed by Kaguya spacecraft, COSPAR Scientific Assembly 2010, B01-0060-10, Bremen, Germany, 2010年7月23日.
- ⑨ 中川 朋子, 高橋太, 綱川秀夫, 渋谷秀敏, 清水久芳, 松島政貴, 「かぐや」衛星によって観測された月周回軌道における1-10 Hzの磁場変動, 日本地球惑星科学連合2010年大会, 千葉, 幕張メッセ国際会議場, 2010年5月27日.
- ⑩ 中川 朋子, 高橋太, 綱川秀夫, 「かぐや」MAP-LMAG 班, かぐや (SELENE) 衛星によって月の昼側で観測されたホイッスラー波, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会, 金沢, 金沢大学, 2009年9月28日.
- ⑪ 中川 朋子, 高橋太, 綱川秀夫, 「かぐや」

[学会発表] (計16件)

- ① Nakagawa, T., F. Takahashi, H. Tsunakawa, H. Shibuya, H. Shimizu, M.

MAP-LMAG 班, かぐや (SELENE) 衛星搭載
磁力計によって観測された磁場変動の伝
搬方向と偏波, 日本地球惑星科学連合
2009 年大会, 千葉, 幕張メッセ国際会議
場, 2009 年 5 月 18 日.

[その他]

ホームページ等

[http://www.ice.tohtech.ac.jp/~nakagawa/
papers/yokou11.htm](http://www.ice.tohtech.ac.jp/~nakagawa/papers/yokou11.htm)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 朋子 (NAKAGAWA TOMOKO)

東北工業大学・工学部・教授

研究者番号: 40222161

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

綱川 秀夫 (TSUNAKAWA HIDEO)

東京工業大学大学院・理工学研究科・教授

研究者番号: 40163852

齋藤 義文 (SAITO YOSHIFUMI)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教
授

研究者番号: 30260011