

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：31303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540480

研究課題名(和文) 太陽風中の非磁化天体の形成する電磁環境の研究

研究課題名(英文) Study on the electromagnetic environment formed by non-magnetized body in the solar wind

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：太陽風中の障害物下流のウェイク中では、障害物の下流側表面が負に帯電するため、周辺のイオンが電場による加速を受け、真空へのプラズマ侵入の場合よりも効率的にウェイクに流入することを2次元粒子シミュレーションによって示した。ウェイク中では電子密度が低いいためデバイ長が長く、帯電による電場が太陽風中よりも広範囲に及ぶこと、また、障害物のサイズが大きいとイオンが電場加速を受ける距離が長く、ウェイク深部にイオンが入りやすいことを示した。

月面及び月固有磁場により反射したプロトンや電子によって、月の昼側、昼夜境界、およびウェイク深部において低周波の磁場変動が励起されていることをかぐや衛星観測から示した。

研究成果の概要(英文)：The ion entry into the wake behind an obstacle in the solar wind was studied using two-dimensional, electromagnetic full-particle simulations. The Electric field produced by the negative electric charge on the nightside surface of the obstacle accelerates ions toward the void, over longer Debye length than in the solar wind due to the reduced electron density. The ions can access the deepest wake behind a large-scale obstacle being accelerated over a long distance. Kaguya detected low-frequency magnetic field fluctuations generated by the modified velocity distribution of the solar wind particles reflected or absorbed by the moon. The reflected protons are responsible for the generation of ULF and monochromatic ELF waves through interaction with magnetohydrodynamic and whistler waves in the solar wind. Beams of electrons reflected above the dayside lunar magnetic anomaly, or sucked into the proton rich region in the central wake are the source of broadband ELF waves.

研究分野：宇宙空間プラズマ物理学

キーワード：太陽風 月 非磁化天体 ウェイク プラズマ 磁場変動 ULF波 ELF波

#### 1. 研究開始当初の背景

月のように固有磁場を持たない誘電体の障害物に太陽風が吹きつけた場合、プラズマが表面で吸着され、下流にウェイクと呼ばれるプラズマ密度の低い領域が形成される。近年の月周回衛星観測によって、月にごく近いウェイク最深部でもイオンが検出され、ウェイクへのイオンの侵入過程に注目が集まっていた。

ウェイクへのイオンの侵入を考える際、従来は真空中へのプラズマ流入の理論、電気的中性を仮定した自己相似解が良く使われてきた。熱速度の大きな電子がウェイク中に入って電子の圧力勾配と電場がつりあう形を作り、その電場とイオンの圧力勾配によってイオンが加速されながらウェイクに入っていくという描像である。しかしこの理論ではイオンの侵入限界であるイオンフロントは形成されず、ウェイク深部へのイオン侵入を扱うには適切ではなかった。粒子コードによる多成分プラズマを扱うシミュレーションも行われていたが、真空中へのプラズマ流入を扱うものが主であった。太陽風中の非磁化天体の場合は、電子の熱速度が太陽風速より大きいために障害物の下流側が選択的に負に帯電することを考慮する必要があるが、天体サイズがデバイ長より長いので問題ないと考えられていた。

また、かぐや衛星によって、月周辺で低周波の磁場変動が観測され、発生機構の解明が待たれていた。

#### 2. 研究の目的

(1) 太陽風中の非磁化天体表面への太陽風粒子吸着による帯電と、それに伴う周辺電場構造、およびイオン侵入機構を解明する。特に、天体のスケールに対しデバイ長が小さい場合の帯電の効果を検証する。

(2) 天体表面で反射した太陽風粒子や、天体表面で吸着されて速度分布が変化した太陽風プラズマによる波動励起の仕組みを解明する。

#### 3. 研究の方法

(1) 電気的中性を仮定しない2次元粒子シミュレーションコードを用い、完全不導体の非磁化天体に太陽風プラズマ粒子を入射し、天体表面に衝突した電荷は表面に吸着させて周辺の電場、磁場およびプラズマ粒子の運動をシミュレートする数値実験を行う。太陽風速度・電子熱速度・プロトン熱速度を変えることによって天体サイズに対するデバイ長を様々に変えて、プロトン加速の違いを調べる。

(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、プラズマ粒子観測装置 PACE によって得られるイオンと電子の情報と合わせ、波の発生機構を解明する。

#### 4. 研究成果

(1) 太陽風中の障害物のサイズをデバイ長の32倍まで大きくした数値実験を行い、ウェイク中は電子の密度が低くデバイ長自体が長くなっていることに加え、サイズが大きい障害物裏面まで長い距離にわたって帯電の電場による加速を受け続けるため、小さな天体よりも大きな天体のほうがむしろウェイク深部までイオンが入りやすく、帯電の影響が無視できないことを示した。

(2) 「かぐや」衛星搭載磁力計 LMAG によって真夜中のウェイク深部で0.1-10Hzの磁場変動を発見した。そのすべてが「タイプIIエントリープロトン」と呼ばれる、月面で反射後に大きなラーマー半径で月ウェイクに突入した太陽風プロトンと同期しており、その多くは電子の流入とともに観測されていた。かぐや衛星の粒子観測(MAP/PACE)により、この電子速度の角度分布が沿磁力線ビーム状であることがわかった。この波の生成機構としては、イオンと電子の運動の違いによる変形二流体不安定が有力である。

(3) かぐや衛星によって月の昼側で観測されていた3Hz~10Hzの広帯域のホイッスラー波について、衛星と月面上の磁気異常が磁力線で繋がっているときに磁場変動が強く、磁力線の繋がりが途絶えた時には波も途絶えることがわかった。衛星で反射プロトンが観測されている場合であっても、磁力線の繋がりが途絶えた時には波も途絶えていた。このことから、3Hz~10Hzのホイッスラー波の生成には、磁力線に沿った反射電子流がかかっていることが示唆される。

(4) 月周辺で観測される低周波の磁場変動について、反射プロトン、反射電子それぞれについて、太陽風の磁気流体波との共鳴、太陽風中のホイッスラー波との共鳴、ピッチ角分布の変形によるホイッスラー波の励起、といった異なる過程によって0.01Hzの狭帯域ULF波、1Hzの狭帯域ELF波、0.1-10Hzの広帯域波が生成されることをまとめた。

#### 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2件)

Nakagawa, T., T. Nakashima, T. Wada, H. Tsunakawa, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, M. Matsushima and Y. Saito, ELF magnetic fluctuations detected by Kaguya in the deepest wake associated with the type-II protons, *Earth, Planets and Space*, 67:50, doi:10.1186/s40623-015-0196-0, 2015.

Nakagawa, T., Ion entry into the wake

behind a nonmagnetized obstacle in the solar wind: Two-dimensional particle-in-cell simulations, *J. Geophys. Res.*, 118, 1849-1860, doi:10.1002/jgra.50129, 2013.

[学会発表](計 23 件)

中川朋子, 綱川秀夫, かぐや衛星と GEOTAIL 衛星によって観測された地球磁気圏尾部プラズマシート境界中のイオンサイクロトロン波, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 千葉, 幕張メッセ国際会議場, 2016 年 5 月 25 日.

中川朋子, 綱川秀夫, 斎藤義文, 西野真木, 月ウェイクへの太陽風電子の流入と ELF 帯磁場変動に関する考察, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 千葉, 幕張メッセ国際会議場, 2016 年 5 月 25 日.

中川朋子, 綱川秀夫, 斎藤義文, かぐや衛星と GEOTAIL 衛星によって地球磁気圏尾部プラズマシート境界中で観測された狭帯域イオンサイクロトロン波について, 電磁圏物理学シンポジウム, 福岡, 九州大学西新プラザ, 2016 年 3 月 10 日.

Karibe, Y., T. Miyazawa, K. Murakami, T. Nakagawa, and H. Tsunakawa, Short-period magnetic enhancement detected by Kaguya in the solar wind, Symposium on Planetary Science 2016, 仙台, 東北大学, 2016 年 2 月 23-24 日.

中川朋子, KAGUYA/MAP/LMAG Team, 斎藤義文, 地球磁気圏ロープ中の月周辺のイオンサイクロトロン波の発生特性, 第 138 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 東京, 東京大学, 2015 年 10 月 31 日.

中川朋子, KAGUYA/MAP/LMAG Team, 地球磁気圏ロープ中で観測される月周辺のイオンサイクロトロン波, SGEPS 小型天体環境分科会 小研究会(第 4 回), 東京工業大学, 2015 年 9 月 2 日.

中川朋子, 綱川秀夫, かぐや衛星による地球磁気圏ロープ中の月周辺のイオンサイクロトロン波の観測, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 千葉, 幕張メッセ国際会議場, 2015 年 5 月 26 日.

渡邊祐輔, 照井孝輔, 香川翔吾, 中川朋子, 綱川秀夫, 衛星かぐやが月周りで観測した周波数帯 3-10Hz の磁場変動の強さについて, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 千葉, 幕張メッセ国際会議場, 2015 年 5 月 25 日.

中川朋子, 月周辺における ULF から下部 ELF の周波数帯の磁場変動, 平成 26 年度 STE 研究集会「太陽圏シンポジウム」および「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」, 名古屋大学, 2015 年 3 月 5 日.

中川朋子, KAGUYA/MAP/LMAG Team, 斎藤義文, 月ウェイク中でタイプ II プロトン侵入に伴って観測された ELF 波動の発生機構について, 第 136 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 松本, キッセイ文化ホール, 2014 年 11 月 3 日.

Nakagawa, T., H. Tsunakawa, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, M. Matsushima, and Y. Saito, ULF/ELF Waves Detected by MAP/LMAG Magnetometer Onboard Kaguya around the Moon and in the Lunar Wake, AGU Chapman Conference on Low-Frequency Waves in Space Plasmas, Jeju Island, Korea, 2014 年 9 月 1 日.

T. Nakashima, T. Wada, H. Tsunakawa, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, M. Matsushima, and Y. Saito, ELF waves detected by MAP/LMAG magnetometer onboard Kaguya in the deepest lunar wake associated with the type-II entry of the solar wind ions, AOGS 11th Annual Meeting, Royton Sapporo Hotel, 2014 年 7 月 30 日.

中川朋子, 磁場を持たない障害物下流のウェイクへの太陽風プラズマの侵入, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜, パシフィコ横浜会議センター, 2014 年 5 月 1 日.

中川朋子, KAGUYA/MAP/LMAG Team, 月ウェイク中央で観測された 0.1-10Hz の磁場変動と太陽風プロトン, 第 134 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 高知, 高知大学, 2013 年 11 月 4 日.

Nakagawa, T., Low frequency waves detected by Kaguya around the moon, 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference, Howard International House, Taipei, Taiwan, 2013 年 9 月 5 日.

中川朋子, 太陽風中の障害物下流のウェイク中の"デバイ長"について, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 千葉, 幕張メッセ国際会議場, 2013 年 5 月 23 日.

中嶋達也, 和田拓也, 中川朋子, 綱川秀夫, 高橋太, 渋谷秀敏, 清水久芳, 松島政貴, 齋藤義文, 西野真木, かぐや衛星によって発見された月ウェイク中央部の ELF 帯磁場変動について, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 千葉, 幕張メッセ国際会議場, 2013 年 5 月 23 日.

T. Nakashima, T. Wada, T. Nakagawa, F. Takahashi, H. Tsunakawa, H. Shibuya, H. Shimizu, M. Matsushima, Magnetic fluctuations detected by Kaguya nightside of the moon, SELENE Symposium 2013, 宇宙科学研究所 ISAS/JAXA, 神奈川, 2013 年 1 月 23 日.

中川朋子, 太陽風と無磁場天体との相互作用: ウェイクへのイオンの侵入過程, 第 132 回地球電磁気・地球惑星圏学会, 札幌, 札幌コンベンションセンター, 2012 年 10 月 22 日.

中川朋子, 2 次元粒子シミュレーションで見た太陽風中の障害物下流のウェイクへのプラズマの侵入日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉, 幕張メッセ国際会議場, 2012 年 5 月 20 日.

授  
研究者番号: 30260011

〔図書〕(計 1 件)

Nakagawa, T.,  
Chapter 17: ULF/ELF waves in the near-Moon space, in "Low-Frequency Waves in Space Plasmas", edited by Keiling, Lee, Glassmeier and Nakariakov, pp. 293-306, American Geophysical Union, doi: 10.1002/9781119055006, Published Online: 12 FEB 2016.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ice.tohtech.ac.jp/~nakagawa/papers/yokou13.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