

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：31303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03727

研究課題名(和文) 月との相互作用を用いた太陽風プラズマの流体とサイクロトロンスケールの狭間の研究

研究課題名(英文) Solar wind interaction with the moon in the scale between magnetohydrodynamic and cyclotron radius scales

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) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：近年、月周辺では、従来知られていたウェイクの形成や反射イオンによる1秒・100秒周期のプラズマ波動以外にも、より小スケールの現象が発見されている。本研究では、イオンのサイクロトロン半径より小さい15 kmスケールのリム圧縮や、月の極域で発見された広帯域のホイストラ波、薄いウェイク境界で励起しウェイク内に伝わるシアールフベン波などについて、かぐや衛星による磁場・プラズマ粒子の観測に基づいて発生機構を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、実利用への関心が高まっている月であるが、その電磁環境が十分に知られているとは言い難い。着陸機の軌道制御に月の磁場を利用するようなアイデアがあったとしても、太陽風との相互作用によって時に3-4倍も磁場強度が変動することを知らないと危険である。本研究は、これまで知られていた反射イオンによる昼側低周波磁場変動に加え、新たにウェイク中の低周波アルフベン波、月の極域の広帯域ホイストラ波、昼夜境界の小スケールリム圧縮について解明したものである。

研究成果の概要(英文)：Knowledge of solar wind interaction with the moon has been renewed by recent high time resolution observations. In addition to previously known hydrodynamic scale phenomena such as wake formation and upstream wave generation by reflected ions, we have studied magnetic field variations such as limb compression and diamagnetic cavities with magnetic enhancements with duration shorter than ion gyro period, shear Alfvén waves generated at thin wake boundary, or diffuse whistler mode waves above the polar region separated from their generator ions. Their generation mechanisms were related with smallness of the magnetic anomaly, lunar radius smaller than the Larmor radius of the ions reflected by the moon, or thin boundary of the lunar wake.

研究分野：太陽風プラズマ物理学

キーワード：月 太陽風プラズマ 磁場変動 かぐや衛星 リム圧縮 ホイストラ波 シアールフベン波 サイクロトロン

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

宇宙プラズマの分野においては、衛星観測の時間分解能の向上に伴って細かなスケールの現象が見えるようになり、磁気流体近似と運動論的な取扱いの狭間を埋めていく方向に研究が進み始めた。月周辺では、月による太陽風の吸収や反射によって、イオンと電子の運動の差が顕著となるようなスケールのプラズマと電磁場の相互作用が発見された。一見、磁気流体的に見える現象でありながら、磁気流体近似のスケールでは説明できない現象も見つかり、その発生機構は未解明であった。

2. 研究の目的

流体近似スケール、運動論的スケールのどちらでもない中間のスケールの未解明の諸現象を解析し、このスケールの太陽風プラズマの理解に貢献する。具体的には、かぐや衛星によって観測された深ウェイク中の Extremely Low Frequency (ELF) 波、極域上空の広帯域 ELF 波、昼夜境界上の微細リム圧縮イベント、ウェイク内の渦状磁場変動、について発生機構を解明することである。

3. 研究の方法

かぐや衛星 MAP-LMAG による磁場観測、MAP-PACE による粒子観測のデータを解析するとともに、数値シミュレーションを行うことによって、これらの波の発生機構を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 昼側月面で反射されたプロトンが深ウェイクに飛び込んだ「タイプ エントリープロトン」に伴って観測される ELF 波の発生時には、磁力線に沿って走る双方向電子流が観測されており、これが ELF 波の発生機構に重要な役割を果たしていると考えられる。発生機構の候補として、電子とイオンの「磁場を横切る速度」の差で生じる「変形 2 流体不安定」と、密度や圧力の境界を支える「電流」によって励起される「低域混成ドリフト不安定」が挙げられる。ELF 波の伝搬方向を調査した結果、イオンの速度ベクトルの方向と平行になる例が見つかり、「変形 2 流体不安定」による励起が示唆されたが、磁場変動が 1 次元的であったため、伝搬方向を正確に求めることが難しく、結論を出すには至っていない。

(2) 月の極域上空で発見された磁力線に沿って伝搬する数 Hz ~ 十数 Hz の ELF 波は、その偏波および観測周波数から、太陽風よりも高速のイオンと共鳴して励起されたホイストラ波であることがわかった。観測位置が磁気異常から遠く、反射イオンも同時観測されないのは、月の昼間側で反射されたイオンによって励起されたホイストラ波が、磁力線に沿って伝搬して極域で観測される一方、反射イオンは大きなラーマー半径のため、波とは異なる軌道をたどるためと考えられる [1]。

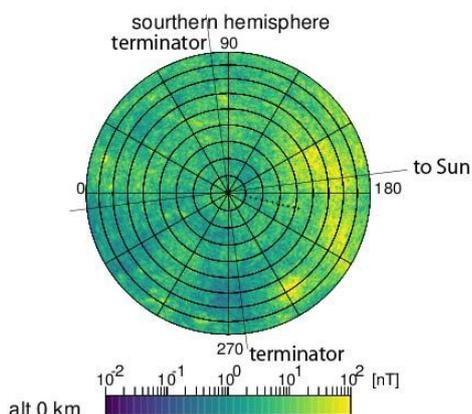


図 1 月の南極域でのホイストラ波検出位置 (+印) と月の磁気異常の位置関係

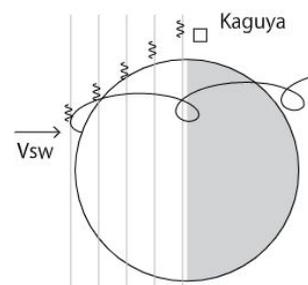


図 2 月の夕方側から見た反射イオンの軌跡とホイストラ波検出位置の模式図

(3) 数秒から10秒程度の短時間だけ磁場強度が1.5~3.6倍強まる現象には、「リム圧縮」と「hot flow anomaly」の2種類があることがわかった。「リム圧縮」は動圧の低い太陽風中、月の固有磁場で反射されたプラズマにより太陽風が減速され磁場が圧縮される現象である。過去に報告されていたものは強い固有磁場(磁気異常)による、数十分続く大規模な現象であったが、今回観測されたものは継続時間が10秒以下とプロトンサイクロトロン周期より短く、月面上の空間スケールに直すと15km程度であり、同程度以下の小さな固有磁場によって生じたものと考えられる。hot flow anomalyは、地球前面衝撃波による反射イオンが太陽風中の磁場不連続に集まってできるが、これと同様に、月面または月の固有磁場で反射された太陽風イオンが太陽風磁場を横切る際、誘導電場の向きが磁場不連続面に向かう配位となる場合に反射粒子が不連続面に集まり、膨張領域の境界の磁場が圧縮され増大したものと考えられる。観測されたのは月の夜側であり、磁場変動だけが月を透過して下流で検出されたと考えられる。

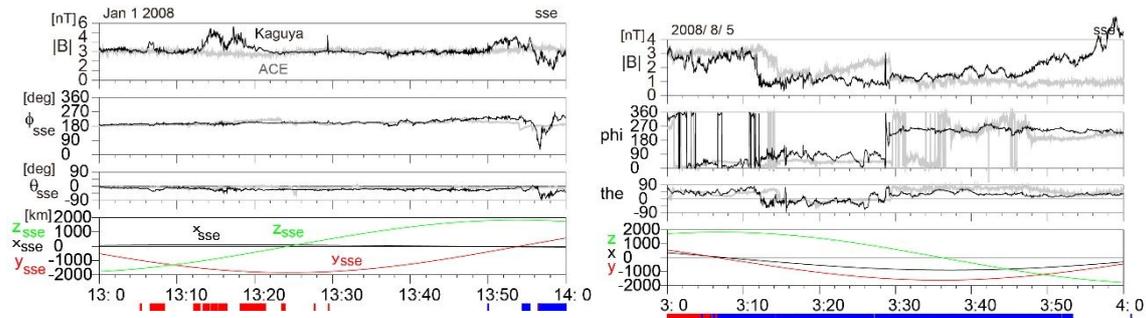


図3 (左)リム圧縮 (右) Hot flow anomaly による短時間の磁場強度の増大

(4) 月ウェイク内で発見された、「朝方向き背景磁場中、北半球で右回り、南半球で左回り」という、障害物下流の渦と同様の回転方向を持った数十秒周期の磁場変動について統計解析を行った結果、太陽風の流れと磁場に準拠した座標に変換すると、背景磁場方向に関わらず同様の偏波構造が常に存在することがわかった。高速・高圧の太陽風中で磁場変動が強くなること、パワー密度がウェイクの中心よりも境界で強いことから、磁場変動のエネルギー源はウェイクに流入する太陽風イオンと考えられ、ここでできる磁場変動がシアールフベン波としてウェイク中心まで伝わったものと考えられる[2]。

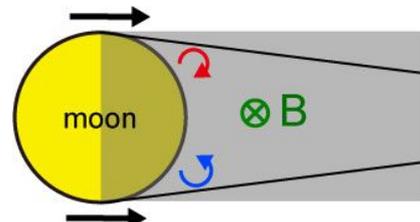


図4 ウェイク中低周波磁場変動の回転方向

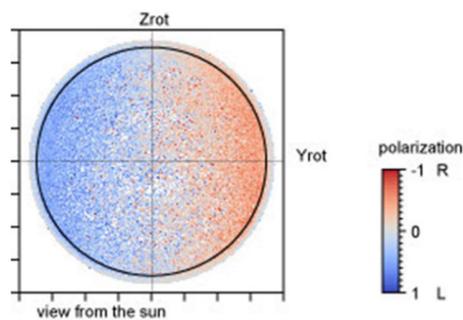


図5 太陽風が-X,背景磁場がXZ面内に来よう回転した座標系で表示したウェイク中の磁場変動の偏波分布の統計

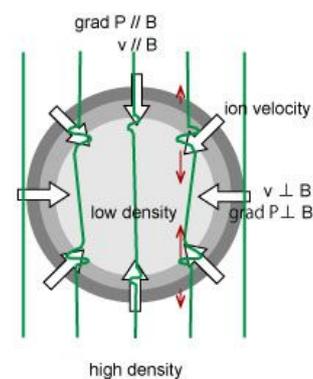


図6 ウェイク境界で生じる磁場変動とウェイク中心への伝搬

(5) 月面上40km以下の低高度で磁場を観測すると、月面上の固有磁場の空間変化が時系列として観測されるが、その偏波を計算すると、まるできれいな円偏波が連続しているように見えることが示された。背景磁場の反転によって極性が反転して見える。高度40km以下の時系列を解析する際には注意が必要である。

< 引用文献 >

[1] Nakagawa, T., Takahashi, F., Shimizu, H., & Saito, Y., Diffuse whistler mode waves detected by Kaguya in the lunar polar region, Radio Science, 57, e2021RS007369, 2022, <https://doi.org/10.1029/2021RS007369>.

[2] Nakagawa, T., F. Takahashi, Y. Saito, H. Shimizu, Polarization reversal of low frequency magnetic variation in the lunar wake, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, 8, e2021JA029299, 2021, <https://doi.org/10.1029/2021JA029299>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nakagawa Tomoko, Takahashi Futoshi, Saito Yoshifumi, Shimizu Hisayoshi	4. 巻 126
2. 論文標題 Polarization Reversal of Low Frequency Magnetic Variation in the Lunar Wake	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JA029299	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nakagawa T., Takahashi F., Shimizu H., Saito Y.	4. 巻 57
2. 論文標題 Diffuse Whistler Mode Waves Detected by Kaguya in the Lunar Polar Region	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Radio Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021RS007369	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 中川朋子、高橋太、清水 久芳、斎藤義文
2. 発表標題 月ウェイク中の0.01Hzから0.3Hzの楕円偏波磁場擾乱について
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Nakagawa, F. Takahashi, H. Shimizu, Y. Saito
2. 発表標題 Diffuse Whistler Mode Waves Detected by Kaguya in the Lunar Polar Orbit
3. 学会等名 URSI GASS 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川 朋子, 遠藤 聖也, 久保 勇登, 高橋 太, 清水 久芳, 齋藤 義文
2. 発表標題 地球磁気圏内の月面上低高度で観測された ULF 波の偏波について
3. 学会等名 第150回地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川朋子、高橋太、清水 久芳、齋藤義文
2. 発表標題 かぐや衛星軌道上月の極域で観測された1-16Hzのホイスラ波のエネルギー源の探索
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (日本地球惑星科学連合2020年大会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中川朋子
2. 発表標題 太陽風中の月ウェイク境界で起きるMHDからサイクロトロン周波数の3倍程度に広がる磁場変動の偏波について
3. 学会等名 2020年度ISEE研究集会「惑星間空間プラズマにおける波動現象」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川 朋子, 網川 秀夫, 齋藤 義文
2. 発表標題 月ウェイク境界における太陽風エネルギーの電磁エネルギーへの変換について
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakagawa, T., F. Takahashi, H. Shimizu, and Y. Saito
2. 発表標題 Extremely Low Frequency Whistler Mode Wave above the Polar Region of the Moon Detected by Kaguya
3. 学会等名 URSI-JRSM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川 朋子, 高橋太, 清水久芳, 斎藤 義文
2. 発表標題 月ウェイク中タイプII エントリープロトンに伴うELF 波の振動方向について
3. 学会等名 第146回地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川 朋子, 澤里優海, 志賀友輔, 綱川 秀夫, 斎藤 義文
2. 発表標題 太陽風中の月ウェイク境界の渦による沿磁力線電子流
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川 朋子, 綱川 秀夫
2. 発表標題 月の極域で観測された1-12Hzの磁場変動の周波数降下について
3. 学会等名 第144回地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川 朋子, 高橋 太, 清水 久芳, 斎藤 義文
2. 発表標題 ぐや衛星によって月周辺で観測されたhot flow anomaly と微細limb compression
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 千葉 康平, 持石 和弥, 中川 朋子, 斎藤 義文, 高橋 太
2. 発表標題 かぐや衛星によって観測された月ウェイクに侵入する太陽風イオン速度の空間分布
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nakagawa, T., F. Takahashi, H. Shimizu, and Y. Saito
2. 発表標題 Short Period Magnetic Field Enhancements Detected by Kaguya Around the Moon in the Solar Wind
3. 学会等名 URSI AT-AP-RASC 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	高橋 太 (Takahashi Futoshi) (20467012)	九州大学・理学研究院, 准教授 (17102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	齋藤 義文 (Saito Yoshifumi) (30260011)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授 (82645)	
連携研究者	西野 真木 (NISHINO Masaki) (50466794)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・大学共同利用システム研究員 (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関