

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 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540459

研究課題名（和文） 「かぐや」による月周辺電磁環境の解明

研究課題名（英文） Clarification of electromagnetic environment around Moon by KAGUYA

研究代表者

橋本 弘藏 (HASHIMOTO KOZO)

京都大学・生存圏研究所・研究員

研究者番号：80026369

研究成果の概要（和文）：月周回衛星「かぐや」搭載の低周波波動観測装置により、様々な波動が観測されている。太陽風と月の相互作用の結果、広帯域静電ノイズ（BEN）ばかりでなく、Geotail 衛星による発見以降関心の高い、静電孤立波（ESW）が存在することも波形観測により明らかになった。粒子観測装置や磁場観測装置のデータも利用して、月周辺の電磁環境の解明と波動粒子相互作用の理解に有用な、電子の速度分布関数との関係も求めることができた。

研究成果の概要（英文）：Low-frequency wave receiver on-board the KAGUYA lunar orbiter observed various waves. As a result of the interaction between the solar wind and Moon, not only the broad-band electrostatic noise (BENs) are observed, but electrostatic solitary waves (ESWs) which are very interested since they were discovered the Geotail satellite are also observed by the waveform capture. The electron velocity distribution functions, which are useful to clarify electromagnetic environment around Moon and understand the wave-particle interaction, are derived from plasma and magnetic field data.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

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：プラズマ波動 かぐや 静電孤立波

1. 研究開始当初の背景

(1) 月周回衛星「かぐや (SELENE)」は、2007年9月に宇宙航空研究開発機構 (JAXA) により打ち上げられ、2009年6月に成功裡に月に制御落下した、月の起源と進化の解明のための探査機である。高度約 100km、周期 118 分の極・円軌道を周回する主衛星のミッション機器の一つに月レーダサウンダー (LRS) があり、HF (短波) サウンダーによ

る月表層の地形や物性、また地下数 km に至る地層構造の探査を行っている。

(2) LRS では、同時に月周辺プラズマ環境や太陽・惑星電波放射、自然プラズマ波動・電波観測を行っており、京都大学と金沢大学のグループで開発した、10Hz から 1MHz の自然電波を、周波数分解能・時間分解能ともに高性能に観測でき、100kHz 以下では波形伝

送も行えるソフトウェア受信機、低周波自然波動観測器(WFC)が搭載されており、2007年10月30日に全長30mの2対の電界アンテナが展開され、観測を開始した。これは日本では1992年のGeotail衛星以来の低周波自然波動観測器である。

(3) 国外では、1973年に高度1000kmの月周回衛星RAE 2を用い、周波数250kHzにおけるAKRの月による掩蔽観測が行なわれている。時間分解能は8秒であった。1994年に月の半径の6.5倍の距離でWIND衛星が月スイングバイを行なった時に、1回限りではあるが、月の夜側に形成される真空に近いであるウェイクにおける波動、粒子の観測を行なっている(Kellogg, Geophys. Res. Lett., 3, 1267, 1996)。月ミッションは国際的にも目白押しであるが、波動観測は珍しい。

2. 研究の目的

(1) 月周回衛星「かぐや」では静電孤立波(ESW)や広帯域静電ノイズ(BEN)、電子プラズマ波、オーロラキロメータ波(AKR)といったさまざまな波動が観測されている。衛星が月の影に入った際に生じる掩蔽、ウェイク、ならびに磁気異常近傍での現象に注目し、非線形波動現象の物理、掩蔽を利用した波動の伝搬解析、ウェイクの物理の解明等を行っていくとするものである。

(2) 固有磁場を持たないとされる月と、太陽風の中の相互作用を明確化する。ESWは日照域で観測されるほか、磁気異常上、ウェイクや境界域ほど観測される頻度が高いことが明らかになりつつある。ESWが励起されるメカニズムを探ることで、磁気異常域やウェイク境界域の物理を明らかにする。

境界領域の電子密度の変動の様子は、必ずしも一定ではなく、しばしば南北非対称性が見られる。これは、ウェイク領域に侵入するプラズマの振る舞いが、IMF(惑星間空間磁場)に依存して変化するためと考えられ、そのメカニズムの研究は太陽風-月の相互作用の解明に大きく寄与すると考えられる。

3. 研究の方法

(1) Geotail衛星における静電孤立波(ESW)の発見は、学会に大きな影響をもたらした。今まで謎とされてきた(BEN)の構成要素であることを明らかにした。これらは、磁気圏の様々な所や太陽風中でも見つけられている。「かぐや」でも、ウェイクの出入口はじめ、磁気異常上空など多数受信されている。周辺の電子密度は、しばしば受信されている電子プラズマ波の周波数から読み取れるほか、プラズマ計測器、磁場測器も搭載されているので、プラズマ環境に関する情報も得ら

れる。

(2) 月は固有磁場を持たないために、ウェイク領域はほぼ真空状態に近い状態になる。このとき、電子は夜側ウェイク領域に比較的侵入しやすいのに対し、イオンは熱速度が太陽風速度と比較して圧倒的に遅いためウェイク内部に侵入できないと考えられる。このため、ウェイク境界には電場が発生し、この電場によって様々な波動現象が観測されている。「かぐや」にはプラズマ計測器が搭載されており、その場のイオンや電子のエネルギー分布を知ることができる他、粒子が加速される状況から、電場の状態を推定できる。

(3) BENは大半の時間観測されているスペクトル観測から分かり、間欠的にしか観測されないESWの存在の必要条件である。従って、まずは粒子観測とBENにより両者の関係を調査する。

(4) 波動捕捉器で100kHz以下の波形観測を行なっている。ESWの解析は、磁場計測器のデータを利用して、背景磁場に平行な電界成分と垂直な電界成分に分けて行う。ESWは磁気異常上空やウェイク境界域ほど観測される頻度が高いことが明らかになりつつあり、プラズマ計測器のデータも併用して、ESWが励起されるメカニズムを探ることで、磁気異常やウェイク境界域の物理を明らかにする。

(5) ESWとは異なるバイポーラ波形が波動が見つかっており、これらの波動の発生メカニズムなども追求する。また、電子プラズマ波も観測されている。これは、電子密度に対応しており、月周辺のプラズマ環境を明らかにすることが出来る。

4. 研究成果

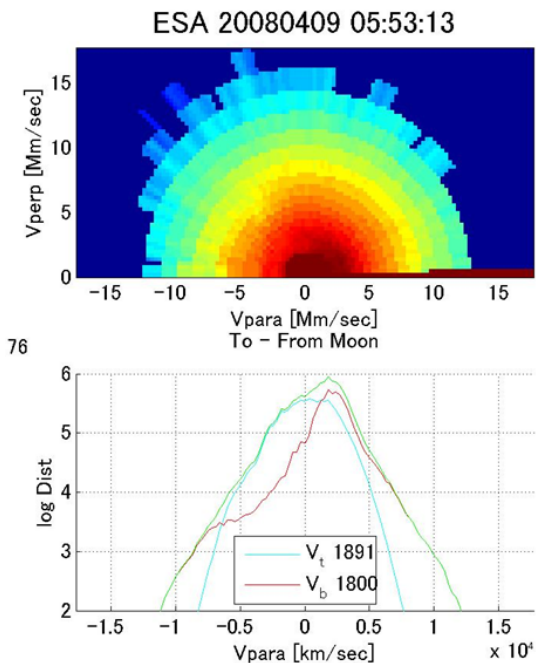
(1) ESWには背景プラズマに対して逆方向に流れる(counter streaming)ビームの存在が必要である。粒子観測とBENの関係の解析から、ESWがウェイク電場が発生するウェイク境界、ミラー反射がある磁気異常上の他、粒子計測器で発見された月表面で反射された粒子により太陽風側でも受信されている。ウェイク境界以外では、「かぐや」を通る磁場が月に繋がっていることなどが明らかになった。

(2) 波動観測器は、ダイポールアンテナを二つのモノポールとするモードを有している。一対のアンテナで逆位相で受かるESWとは異なり、同相となるバイポーラ波形も多数見つかった。これらは、ダスト(宇宙塵)が衛星本体に当たったことによる電位差を受信したものであることを明らかにした。

(3) 波動観測器では、ダイポールアンテナを二つのモノポールとするモードで解析を行ってきたが、雑音が多い。本来のダイポールとして使うと消える雑音も多く、二つのモノポール波形が異なりすぎることも多くあった。そこで、ダイポールアンテナとしての受信波形を理想的な背景磁場に平行な成分と垂直な成分の ESW 波形に分けてフィッティングを行うこととし、ESW の平行成分と垂直成分それぞれの特性時間や強度等を評価できるようにした。

(4) 「かぐや」近傍の磁場だけでなく、ACE 衛星で測られた惑星間空間磁場も参考に、周辺磁場方向と月との関係や惑星間空間磁場との関係が分かる。ウェイク境界で、惑星間空間磁場の方向との関連を議論でき、理論との比較が容易になった。

(5) 粒子観測装置 MAP-PACE については、以前から利用してきた粒子の E-t 図 (エネルギーの時間変化) に加えて、電子の磁場に対して平行と垂直の二次元速度分布図も求めた。さらに Geotail の例に倣って観測された速度分布から背景の熱粒子分布を仮定して引き去り、電子ビーム成分を抽出し、ESW の励起にとって重要な平行な速度分布関数も示すことができ、波動粒子相互作用の解明に有用な情報が得られるようになった。



図：(上) 電子の磁力線に平行および垂直な速度分布の等高線図 (下)：垂直成分を積分して得られた平行成分に対する速度分布関数。緑色が全体の分布で、水色の背景分布を引くと赤色のビーム成分が得られる

(6) 最近太陽風に対して月の裏側となるウェイク内部でもプラズマが観測されることが明らかになった。月の裏側にイオンが廻り込むことがある。その結果できた電界のために電子がウェイクの両側から入り込んで互いに逆方向のビームを形成する。スペクトル観測から BEN との相関が高いことが分かっている。波形データの同時観測は例が少なく、ESW の例を探している。

(7) プラズマ計測器を併用して、種々の観測地点における電子の速度分布を明らかにすることができた。ただし、ESW は 0.1 秒オーダーの現象であり、原則として 16 秒の粒子観測の間に様々な ESW が観測されるので、個々の ESW と速度分布との直接的な議論ができるわけではない。

(8) 地球の極域から発生するオーロラキロメートル電波 (AKR) は、月による掩蔽を利用して、源の半球を特定できることが明らかになった。WFC では 2 対のアンテナを利用して AKR の偏波が計測できるように設計されているが、両アンテナ間の位相差が想定に反して一定でなく、偏波の周波数依存性が測定できないことが明らかになった。しかし、最近、この位相差の周波数依存性が解明され、偏波測定に目処が立った。本研究期間には間に合わなかったが、今後の研究にとって力強い。

(9) 今後、これらの成果を元に月周辺における ESW の励起機構や ESW の励起領域における物理機構を明らかにしてゆきたい。

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 3 件)

- ① K. Hashimoto, M. Hashitani, Y. Kasahara, Y. Omura, M. N. Nishino, Y. Saito, S. Yokota, T. Ono, H. Tsunakawa, H. Shibuya, M. Matsushima, H. Shimizu, and F. Takahashi, Electrostatic solitary waves associated with magnetic anomalies and wake boundary of the Moon observed by KAGUYA, Geophysical Research Letters. 査読有, vol. 37, 2010, L19204, DOI: 10.1029/2010GL044529
- ② T. Ono, A. Kumamoto, Y. Kasahara, Y. Yamaguchi, A. Yamaji, T. Kobayashi, S. Oshigami, H. Nakagawa, Y. Goto, K. Hashimoto, Y. Omura, T. Imacahi, H. Matsumoto, and H. Oya, The Lunar Radar Sounder (LRS) Onboard the KAGUYA (SELENE) Spacecraft, Space Science

Reviews, 査読有, vol. 154, 2010, 145-192, DOI: 10.1007/s11214-010-9673-8

- ③ 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, and T. Terasawa, Effect of the solar wind proton entry into the deepest lunar wake, Geophysical Research Letters, 査読有, vol. 37, 2010, L12106, DOI: 10.1029/2010GL043948

〔学会発表〕 (計 17 件)

- ① 橋本弘藏, 大村善治, 笠原禎也, 小嶋浩嗣, 齋藤義文, 西野真木, 小野高幸, 綱川秀夫, かぐやで観測された月周辺静電孤立波 (ESW) と電子ビーム, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013. 5. 23, 千葉市, 幕張メッセ国際会議場
- ② K. Hashimoto, Y. Omura, Y. Kasahara, H. Kojima, Y. Saito, M. N. Nishino, T. Ono, and H. Tsunakawa, Electrostatic solitary waves and plasma distributions near the moon, SELENE Symposium 2013, 2013. 1. 24, 相模原市, JAXA 宇宙科学研究所
- ③ K. Hashimoto, Y. Omura, Y. Kasahara, H. Kojima, Y. Saito, M. N. Nishino, T. Ono, and H. Tsunakawa, Electrostatic solitary waves and plasma environment near the moon observed by KAGUYA, AGU Fall Meeting, 2012. 12. 7, Moscone Center, San Francisco, USA
- ④ K. Hashimoto, Y. Omura, Y. Kasahara, H. Kojima, T. Ono, and H. Tsunakawa, Analyses of electrostatic solitary waves (ESWs) observed by Kaguya near the Moon (Invited), AOGS - AGU (WPGM) Joint Assembly 2012, 2012. 8. 15, Resorts World Convention Centre, Singapore
- ⑤ K. Hashimoto, M. Hashitani, Y. Omura, Y. Kasahara, H. Kojima, T. Ono, and H. Tsunakawa, Analyses of electrostatic solitary waves (ESWs) observed by Kaguya near the Moon, American Geophysical Union Fall Meeting, 2011. 12. 5, San Francisco, California, USA
- ⑥ K. Hashimoto, M. Hashitani, Y. Omura, Y. Kasahara, H. Kojima, T. Ono, and H. Tsunakawa, Electrostatic Solitary Waves (ESWs) observed by KAGUYA near the Moon, 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, 2011. 8. 19, Istanbul, Turkey
- ⑦ K. Hashimoto, M. Hashitani, Y. Omura,

Y. Kasahara, H. Kojima, T. Ono, and H. Tsunakawa, Electrostatic Solitary Waves (ESWs) observed by Kaguya near the Moon, American Geophysical Union Fall Meeting, 2010. 12. 13, San Francisco, California, USA

〔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

橋本 弘藏 (HASHIMOTO KOZO)

京都大学・生存圏研究所・研究員

研究者番号 : 80026369

(2) 研究分担者

大村 善治 (OMURA YOSHIHARU)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号 : 50177002

(H24: 連携研究者)

笠原 禎也 (KASAHARA YOSHIYA)

金沢大学・総合メディア基盤センター・教授

授

研究者番号 : 50243051

(H23-H24: 連携研究者)