

## 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 4 月 20 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760297

研究課題名（和文）月探査衛星かぐやで取得した自然波動データを用いた月の電子密度構造の統計的推定

研究課題名（英文）Research of electron density on the lunar surface from natural wave data obtained by the KAGUYA spacecraft

研究代表者

後藤 由貴（GOTO YOSHITAKA）

金沢大学・電子情報学系・准教授

研究者番号：30361976

研究成果の概要（和文）：

本研究では、かぐや衛星で観測された自然波動の周波数スペクトルを用いて月面における電子密度の高度分布推定に取り組んだ。特に、過去の月探査により報告されてきた、いわゆる月電離層に関して、従来とは全く異なる手法を適用することにより、その存在を検証した。その結果、定常的かつ全球的な月電離層は存在していないことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we addressed an estimation problem of the electron density profile on the lunar surface from spectrograms of natural plasma waves observed by the KAGUYA spacecraft. As a result, the moon does not have global and steady dense plasma layers which become an evidence of the lunar ionosphere.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
2012 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：電波計測

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：センシング情報処理、かぐや衛星、自然電波

### 1. 研究開始当初の背景

月探査衛星「かぐや」は、2007年9月の打ち上げから約1年半におよぶ継続観測により、月および月周辺環境に関する様々なデータを取得し、重要な成果をもたらしてきた。かぐや衛星に搭載された低周波の電波観測器（LRS-WFC）で取得された自然電波の周波数スペクトルからは、月周辺環境における様々な物理パラメータを導出することができる。そ

の中でも、電子密度（プラズマ密度）は、月周辺のプラズマ環境を把握する上で重要なパラメータである。固有磁場によるシールド効果がほとんどなく大気が極めて希薄な月面上では、太陽からの電磁波や高エネルギー粒子が直接的に人体や電子機器に影響を及ぼすため、将来の月利用に向けて、プラズマ環境の調査は必要不可欠といえる。

月近傍の電子密度は、大局的には太陽からのプラズマの流れである太陽風により支配

されるが、ローカルには月の残留磁場による磁気異常領域の影響があり、両者の組み合わせにより複雑な空間構造をもつと考えられる。また月は、ひと月に数日間、地球の磁気圏尾部の中に位置するが、この領域においてはプラズマ環境が太陽風中のそれとは異なる。約1年半におよぶ継続観測で得られた「かぐや」の波動データは、こうした様々なパラメータに対する電子密度の依存性を調査するのに有効であると考えられる。

かぐや衛星で観測された電波の周波数スペクトルから直接得られる電子密度は、太陽風の影響が支配的な月面高度約100kmの衛星軌道上のローカルな値であり、磁気異常など月固有の影響を調べるためには、より低高度の空間構造をリモートセンシングする必要がある。こうした低高度領域には、電子密度の値が急激に変化するいわゆる月電離層が存在する可能性が指摘されており、その調査は月惑星科学において新たな知見の発見につながると期待される。

## 2. 研究の目的

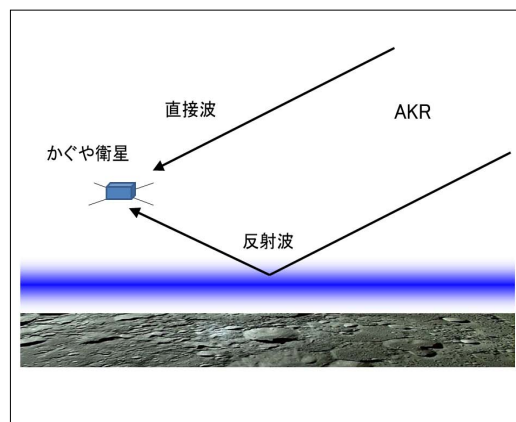
研究背景をふまえ、本研究では月面近傍の電子密度を推定するためのリモートセンシング法の開発を行い、衛星軌道上で取得された電子密度の観測値と合わせて、様々なパラメータ下における衛星軌道-月面間の電子密度分布を調査した。これにより、月電離層の存在について検証することを目指した。

## 3. 研究の方法

月面高度数 km に存在すると言われるいわゆる月電離層を検出するにはリモートセンシングが必要となる。これに対し本研究では、かぐや衛星で観測された地球の極起源のオーロラキロメトリック放射 (AKR) と呼ばれる自然電磁波を利用した月面近傍の電子密度分布の推定手法を開発した。

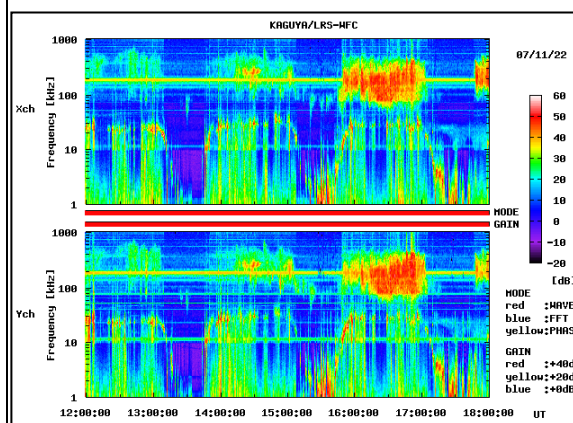
図1に示すように、かぐや衛星で観測されたAKRは、波源から直接到来するものと、月面で一旦反射してから到来するものの合成となる。このため、衛星で取得されたAKRの周波数スペクトルには、入射波と反射波の位相差に基づく干渉縞が生じている。位相差は基本的に行路差に依存するが、行路上の電子密度が一樣でない場合には屈折率の差異により電波の群速度に差が生じることになる。すなわち、干渉縞は衛星軌道より下の電子密度を反映しており、観測された干渉縞に対する逆問題を解くことで月面付近の電子密度を推定することが可能となる。本研究で開発したリモートセンシング法は、人工衛星か

ら電波を放射して、その直下の電離層を測定するいわゆるトップサイドサウンディングの観測原理を、パッシブな自然波動の観測データに応用したものといえる。



(図1)

一方、かぐや衛星の軌道上の電子密度の値は、図2に示したような電波の周波数-時間ダイアグラムからプラズマ周波数を読み取ることにより得られる。周波数スペクトルには、狭帯域の機器干渉ノイズが多数現れており、プラズマ周波数を自動検出するには、これらノイズを適切に取り除く必要がある。これに対して、各干渉ノイズの原因となる機器のステータスをあらかじめ特定し、その時系列変化を先験情報として利用することにより、効率的にノイズ成分を削減する手法を用いた。



(図2)

## 4. 研究成果

開発した電子密度の月面高度プロファイル推定法をかぐや衛星で取得した自然波動の干渉縞のデータに適用することにより、月の昼夜、地球磁気圏の内外、月の磁気異常領

域の内外など様々な条件下での高度プロファイルの調査を行った。結果として、衛星軌道から月面へ向かって電子密度が大きく増加する例は無く、月電離層を裏付けるプロファイルは確認されなかった。従来の地球電離圏・プラズマ圏の影響を受ける電波掩蔽観測法と異なり、月周回軌道からのリモートセンシングに基づいて月面上に高い電子密度の層が検出されなかったという本結果は大変興味深いものである。

さらに別の視点から同結果について検証を行った。干渉縞の間隔に対して先と同様の逆問題を解くことで、反射波の反射高度を近似的に算出することが可能である。これに基づき AKR の反射高度に関して統計解析を行ったところ、反射高度は月面を中心として高度に対して対称な頻度分布になっていることが明らかになった。この結果は、月電離層が存在しなかったことを示唆している。以上の研究結果について、米国地球物理連合秋学会 (AGU Fall Meeting 2010, 2012)、国際電波科学連合総会・シンポジウム (URSI GASS 2011) 等において発表を行った。

得られた結果を利用することで、将来、低周波の電波に対する月面誘電率の推定を実現できる可能性がある。スペクトルに現れる干渉縞の強弱比を利用することにより、月面の反射率を求めることができると考えられる。これによりレーダーとして用いられてきたマイクロ波や短波とは異なる低周波の電波に対する誘電率が得られる。低周波は月面下への浸透が大きいことから、未知の知見の発見につながる可能性がある。

一方、かぐや衛星で連続的に取得された波動スペクトルのデータから電子プラズマ波の周波数を読み取ることで、衛星軌道上の電子密度に関する統計解析を行った。この結果、月の昼側領域における電子密度は、惑星間空間磁場との関係において特徴的な傾向を示し、特に昼夜境界領域において顕著になることが確認された。この境界領域における傾向は、報告されている計算機シミュレーションによる結果と定性的に矛盾しないことを確認した。

さらに、昼夜境界領域におけるより詳細な調査のためにスペクトルデータではなく生波形のデータを利用したプラズマ周波数の検出法を検討している。この手法では、空間的に直交する2つのアンテナで取得された波形データからの偏波情報を利用することで、低周波に存在する別の波動の影響を避け、低い電子プラズマ周波数の読み取りを実現している。これにより電子密度の値が小さいよりウェイク内部に近い領域の推定が可能となった。

## 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6件)

- ① 西部匡洋, 後藤由貴, 笠原禎也, かぐや衛星で観測した波動スペクトルにおける機器干渉ノイズ低減に関する研究, 査読有, 電子情報通信学会論文誌, J95-B(11), 2012, 1567-1575  
Online ISSN: 1881-0209
- ② Goto, Y., Kasahara, Y., Ide, T., Improvement of equatorial density distribution of the global core plasma model using GPS-derived TEC, 査読有, Radio Science, 47, RSOF12, 2012  
DOI:10.1029/2011RS004763
- ③ 大池悠太, 笠原禎也, 後藤由貴, かぐや衛星搭載自然波動観測装置 (LRS/WFC) におけるデータ選別アルゴリズムの性能評価, 査読有, 電子情報通信学会論文誌, J94-B(8), 2011, 978-987  
Online ISSN: 1881-0209
- ④ Goto, Y., (他4名), Lunar Ionosphere Exploration Method using Auroral Kilometric Radiation, 査読有, Earth, Planets and Space, 63, 2011, 47-56  
DOI:10.5047/eps.2011.01.005
- ⑤ Goto, Y., (他13名, 9番目), The Lunar Radar Sounder (LRS) onboard the KAGUYA (SELENE) spacecraft, 査読有, Space Science Reviews, 2010, DOI:10.1007/s11214-010-9673-8
- ⑥ Goto, Y., (他15名, 7番目), Effect of the solar wind proton entry into the deepest lunar wake, 査読有, Geophysical Research Letters, 37, L12106, 2010  
DOI:10.1029/2010GL043948

[学会発表] (計9件)

- ① Goto, Y., Estimation of electron density profile near the lunar surface from the AKR reflections, 2012 American Geophysical Union Fall Meeting, 2012.12.6, Moscone Convention Center (USA)
- ② 後藤由貴, AKR の干渉縞を利用した月面電子密度に関する研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第132回総会・講演会, 2012年10月20日, 札幌コンベンションセンター (北海道)
- ③ Goto, Y., Vertical Plasma Extent above the Lunar Surface Derived from Interference Pattern of Auroral Kilometric Radiation, XXX URSI General Assembly and Scientific

Symposium of International Union of Radio Science, 2011.8.19, Istanbul LutfiKirdar Convention and Exhibition Centre (Turkey)

- ④ 後藤由貴, かぐや衛星で観測された AKR 波の昼側/夜側領域における周波数スペクトルの差異, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 23 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県)
- ⑤ Goto, Y., Estimation of Vertical Plasma Extent above the Lunar Surface Using Interference Pattern of Natural Plasma Waves, International Symposium on Planetary Science 2011, 2011.3.8, Tohoku University, Katahira Sakura Hall (Miyagi)
- ⑥ Goto, Y., Vertical Extent of the Circumlunar Plasma Estimated by Natural Plasma Wave Observations, 2010 American Geophysical Union Fall Meeting, 2010.12.17, Moscone Convention Center (USA)
- ⑦ Goto, Y., Modeling of the Plasmaspheric Density Profile from Large Data Sets of VLF waves and GPS signals, 2010.9.23, Toyama International Conference Center (Toyama)
- ⑧ 後藤由貴, 自然波動を用いた月電離層探査に関する研究, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 24 日, 幕張メッセ国際会議場 (千葉県)
- ⑨ Goto, Y., Examination of Existence of Lunar Ionosphere with Interference Pattern of Natural Waves, 4th KAGUYA (SELENE) Science Working Team Meeting, 2010.1.31, Hotel Machida Villa (Tokyo)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

後藤 由貴 (GOTO YOSHITAKA)  
金沢大学・電子情報学系・准教授  
研究者番号 : 30361976

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし