

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 19 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420402

研究課題名(和文) 月探査衛星かぐやで取得した多種データの統合解析による月面誘電率の周波数特性の推定

研究課題名(英文) Estimation of frequency dependence of lunar surface permittivity from various data obtained by Kaguya

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：月面の誘電率は月の形成を理解するための重要なパラメータであることから、人工衛星を用いたレーダ観測が行われてきた。こうした観測は機器的制約から高周波の電波が用いられる。月面誘電率に関する面白いトピックの一つとして水分検出の指標となる低周波の周波数応答が挙げられる。かぐや衛星では高周波のレーダ観測の他に、超低周波の自然波動を観測できるが、本研究ではこの自然電波の観測データを使って月面誘電率を推定する手法の開発を行った。また、高周波のレーダ観測に基づく、月面誘電率のグローバルマップの作成も行った。

研究成果の概要(英文)：Lunar surface permittivity is an important parameter for understanding the Moon and has been observed by many radar experiments from spacecraft. In these observations, frequencies of radio transmissions are generally high because of instrumental limitations. One of the interesting topics about the lunar surface permittivity is its frequency response in lower bands which is related to the moisture content. The Japanese lunar orbiter Kaguya carried out radar observations of the lunar subsurface structures and also passive observations of natural waves in super low frequency. In this study, we developed an estimation method of lunar surface permittivity for low frequencies by using the natural wave data of Kaguya. We also created a global map of lunar surface permittivity for high frequencies from the radar observations.

研究分野：電波工学

キーワード：惑星探査 かぐや衛星 自然電波 月面誘電率 オーロラキロメトリック放射

1. 研究開始当初の背景

月面環境の調査は、将来の月の利活用を見据え、近年の月探査の大きなモチベーションになっている。月面誘電率の周波数特性は、こうした調査において興味深い役割を果たす。これは、乾燥大地と氷を含んだ大地とでは、数 100 kHz 以下の低い周波数帯において誘電率に顕著に差が現れるためである。しかし実際には、レーダにより低周波に対する誘電率を計測するのは衛星搭載機器の制約から難しく、未だ実現していない。

日本の月探査衛星「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、数々の重要な成果をもたらしてきた。かぐや衛星で取得されたデータからは、月環境の様々な物理パラメータを導出することができる。かぐや衛星に搭載された月レーダサウンダ装置は、短波レーダにより月の地下構造の計測を行う機器であるが、サブ機器として、超低周波までの自然電波を観測する受信機を搭載している。この自然電波の観測データを利用することにより、低周波の月面の誘電率の推定が期待できる。

月面の誘電率の推定は、月面の氷の調査だけでなく、その領域分布から月表層の形成メカニズムを理解することにもつながる点で大きな意義がある。

2. 研究の目的

前述の研究背景をふまえ、本研究では次の 2 つを目的とする。(1) 自然電波を用いて、低周波に対する月面誘電率を計測するための手法を開発する。(2) レーダサウンダの計測データからの月面誘電率の全球マップを作成する。

(1) について、先行研究において取り扱った、かぐや衛星に到来する自然電波の直接波と月面反射波の干渉を利用した月面電子密度の高度分布推定法を発展させて、低周波(数 100 kHz 以下)における月面の誘電率を推定する手法を開発する。

(2) について、かぐや衛星の軌道に沿って連続的に取得されたレーダサウンダの反射率のデータに対して、地形カメラのデータから算出した月面の後方散乱係数を考慮することで、高周波(HF 帯)における誘電率のマップを作成する。

(1) および(2)により誘電率の周波数に対する応答を調査することが可能となる。

3. 研究の方法

(1) 電波の反射率が誘電率と導電率によって決まることから、自然電波の月面反射率を求めることにより低周波に対する誘電率を推定することができる。本研究では、自然電波として、地球の極域起源のオーロラキロメートル放射(AKR)を利用した。AKR は、非常に強度の強い電磁波放射で月軌道においても高頻度で観測されている。かぐや衛星では、

この AKR の直接到来波と月面反射波の合成波が観測されるが、両者の干渉によって合成波の周波数スペクトルには縞構造が生じる。これを最も良く再現するように月面反射率を推定するいわゆる逆問題を取り扱う。解法として、観測モデルの違いから、スペクトル平滑化法、相関法、偏波法の 3 つの方法を考案し、計測誤差や軌道パラメータの誤差に対する耐性を、疑似観測データを用いて調査した。その後、実観測データへの適用を行った。

(2) レーダサウンダの反射に基づく誘電率推定に関しては、地形・分光カメラのデータを用いることで、月面の高度マップおよび表面の粗さに関するパラメータを求めることができる。それらを利用して、レーダ方程式からエコー強度を求めた。低周波と同様に、理論的なエコー強度と実測値を比較することにより最適な月面誘電率を求解できる。

4. 研究成果

干渉縞の強度比から反射率を推定するスペクトル平滑法と相関法の 2 手法について、様々な疑似観測データに適用し、推定精度を検討した結果、月面誘電率を十分な精度で求めることが難しいことが分かった。一方、強度比に加え偏波を利用する偏波法について、同様に疑似観測データを用いてノイズに対する耐性を検討した結果、実用上問題ないレベルで誘電率の推定が可能であることが確認された。この結果より、偏波法を用いて、実データの解析を行った。

偏波法の実観測データへの適用に際して、かぐや衛星の直交アンテナで取得した電界 2 成分の位相較正を行う必要があるが、これに対して、自然電波を用いて較正する新しい手法を考案し、高精度で AKR の偏波を求めることができるようになった。

低周波の月面誘電率推定の結果として、月の海の領域および高地における誘電率に差異があることが確認された。この結果は高周波における誘電率と矛盾しないものであった。

一方、高周波に対する誘電率に関しては、レーダ観測データを元に全球マップを作成した。海および高地の典型的な誘電率の値から Maxwell-Garnett モデルに基づき、月面下 10 メートルまでのバルク密度を求め、その違いが各領域のレゴリス層の厚みに関することを明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 13 件)

K. Hashimoto, Y. Goto, Y. Kasahara, and H. Matsumoto, R. Anderson, Auroral kilometric radiation Polarization and spectra observed far from the Earth, Auroral Dynamics and Space Weather Understanding and Applications (eds.

by Y. Zhang, L. Paxton), AGU Geophysical Monograph Series, Wiley, 255-273, 2015, 査読有.

M. Ota, Y. Kasahara, Y. Goto, A new method for direction finding based on Markov random field model, Radio Science, 50(7), 598-613, 2015, 査読有. doi:10.1002/2014RS005635

S. Matsuda, Y. Kasahara, Y. Goto, M/Q = 2 ion distribution in the inner magnetosphere estimated from ion cyclotron whistler waves observed by the Akebono satellite, J. Geophys. Res., 120(4), 2783-2795, 2015, 査読有. doi:10.1002/2014JA020972

笠原禎也, 後藤由貴, 大池悠太, あけばの衛星アナログ広帯域受信器による観測データの自動較正法, 宇宙科学情報解析論文誌, JAXA-RR-14-009, 41-49, 2015, 査読有.

Y. Bando, A. Kumamoto, N. Nakamura, Constraint on subsurface structures beneath Reiner Gamma on the Moon using the Kaguya Lunar Radar Sounder, Icarus, 254, 144-149, 2015, 査読有. DOI: 10.1016/j.icarus.2015.03.020

Y. Oike, Y. Kasahara, and Y. Goto, Spatial Distribution and Temporal Variations of Occurrence Frequency of Lightning whistlers Observed by VLF/WBA onboard Akebono, Radio Science, 49(9), 753-764, 2014, 査読有. doi:10.1002/2014RS005523

S. Oshigami, S. Watanabe, Y. Yamaguchi, A. Yamaji, T. Kobayashi, A. Kumamoto, K. Ishiyama, and T. Ono, Mare volcanism: Reinterpretation based on Kaguya Lunar Radar Sounder data, J. Geophys. Res. Planets, 119, 1037-1045, 2014, 査読有. doi:10.1002/2013JE004568.

S. Matsuda, Y. Kasahara, and Y. Goto, High-altitude M/Q = 2 Ion Cyclotron Whistlers in the Inner Magnetosphere Observed by the Akebono Satellite, Geophys. Res. Lett., 41(11), 3759-3765, 2014, 査読有. doi:10.1002/2014GL060459

S. Matsuda, Y. Kasahara, and Y. Goto,

Electromagnetic Ion Cyclotron Waves Suggesting Minor Ion Existence in the Inner Magnetosphere Observed by the Akebono Satellite, J. Geophys. Res., 119(6), 4348-4357, 2014, 査読有. doi:10.1002/2013JA019370

石山謙, 熊本篤志, 小野高幸, 山口靖, 春山純一, 大竹真紀子, 加藤雄人, 寺田直樹, 押上祥子, かくや衛星観測データに基づく月上旬の玄武岩質溶岩ユニットのバルク誘電率と空隙率推定, 日本惑星科学会誌「遊星人」, 23(1), 4-14, 2014, 査読有.

S. Oshigami, S. Watanabe, Y. Yamaguchi, A. Yamaji, T. Kobayashi, A. Kumamoto, K. Ishiyama, and T. Ono, Mare volcanism: Reinterpretation based on Kaguya Lunar Radar Sounder data, J. Geophys. Res. Planets, 119(5), 1037-1045, 2014, 査読有. doi:10.1002/2013JE004568

K. Ishiyama, A. Kumamoto, T. Ono, Y. Yamaguchi, J. Haruyama, M. Ohtake, Y. Katoh, N. Terada, and S. Oshigami, Estimation of the permittivity and porosity of the lunar uppermost basalt layer based on observations of impact craters by SELENE, J. Geophys. Res. Planets, 118(7), 1453-1467, 2013, 査読有. doi:10.1002/jgre.20102

M. N. Nishino, M. Fujimoto, Y. Saito, H. Tsunakawa, Y. Kasahara, M. Kawamura, M. Matsushima, F. Takahashi, H. Shibuya, H. Shimizu, Y. Goto, K. Hashimoto, Y. Omura, A. Kumamoto, T. Ono, S. Yokota, Type-II Entry of Solar Wind Protons into the Lunar Wake: Effects of Magnetic Connection to the Night-side Surface, Planetary and Space Science, 87, 106-114, 2013, 査読有. doi:10.1016/j.pss.2013.08.017

[学会発表](計16件)

Y. Goto, R. Kimura, Y. Kasahara, and A. Kumamoto, Estimation of Lunar Surface Permittivity for Low Frequency from Polarizations of Natural Waves Observed by SELENE (Kaguya), AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, 2015.12.

A. Kumamoto, Y. Yamaguchi, A. Yamaji, T. Kobayashi, S. Oshigami, K. Ishiyama,

N. Nakamura, and Y. Goto, Studies based on global subsurface radar sounding of the Moon by SELENE (Kaguya) Lunar Radar Sounder (LRS): A summary, AGU Fall Meeting 2015, San Francisco, 2015.12.

Y. Goto, R. Kimura, Y. Kasahara, and A. Kumamoto, Effect of Lunar Surface Reflection on Polarizations of Auroral Kilometric Radiation (AKR) Observed by KAGUYA, The URSI-Japan Radio Science Meeting (URSI-JRSM), Tokyo, 2015.9.

熊本篤志, 石山謙, 押上祥子, 春山純一, 後藤由貴, SELENE(かぐや)で観測された嵐の大洋・雨の海の高誘電率領域, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 千葉, 2015 年 5 月.

A. Kumamoto, K. Ishiyama, S. Oshigami, J. Haruyama, and Y. Goto, High permittivity regions in Oceanus Procellurum and Mare Imbrium found by SELENE (Kaguya), 46th Lunar and Planetary Science Conference, Woodlands, Texas, 2015.3.

Y. Goto, K. Shima, T. Kanbayashi, and Y. Kasahara, Onboard Identification of Plasma Waves based on Large-data Clustering and its Feature Aggregation, European Planetary Science Congress, 9, EPSC2014-106, Lisbon, 2014.9.

熊本篤志, 石山謙, 押上祥子, 春山純一, 月表面誘電率の全球分布, 日本惑星科学会 2014 年秋期講演会, 仙台, 2014 年 9 月.

Y. Goto, K. Uda, Y. Kasahara, and K. Hashimoto, Latitudinal distribution of auroral kilometric radiation ordinary and extraordinary wave modes observed by KAGUYA, 31th Int. Union of Radio Science (URSI), Beijing, 2014.8. doi:10.1109/URSIGASS.2014.6929952.

Y. Goto, R. Moriuchi, Y. Kasahara, and A. Kumamoto, Estimation of Low-frequency Reflectivity of Lunar Surface Using Natural Waves Observed by the KAGUYA, 11th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society, PS16-D3-PM2-P-024, Sapporo, 2014.7.

熊本篤志, 石山謙, 小林敬生, 押上祥子, 春山純一, かぐやで観測されたレーダエコー強度に基づく月表面誘電率の決定, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜, 2014 年 4 月.

A. Kumamoto, K. Ishiyama, T. Kobayashi, S. Oshigami, J. Haruyama, Estimation of the effective dielectric constant and the density of the lunar surface media, International Symposium of Lunar Science and Exploration using data from Multi-Instruments, Mitaka, 2014.3.

A. Kumamoto, K. Ishiyama, T. Kobayashi, S. Oshigami, J. Haruyama, Determination of the effective dielectric constant of the lunar surface based on the echo intensity observed by the Kaguya, 45th Lunar and Planetary Science Conference, Woodlands, Texas, 2014.3.

Y. Goto, K. Uda, Y. Kasahara, and K. Hashimoto, Determination of Source Hemisphere of Auroral Kilometric Radiation (AKR) observed by KAGUYA, SM23A-2207, 2013 AGU Fall Meeting, San Francisco, 2013.12.

熊本篤志, かぐやレーダサウンダ観測による月表面媒質の実効誘電率及び密度の推定, 日本惑星科学会 2013 年度秋季講演会, 石垣, 2013 年 11 月.

Y. Goto, K. Uda, Y. Kasahara, and K. Hashimoto, Calibration Technique Applied on the KAGUYA/WFC Data for AKR Polarization Analysis, 2013 Asia-Pacific Radio Science Conference, PI-H2-1, Taipei, 2013.9.

熊本篤志, 小野高幸, 小林敬生, 春山純一, かぐやで観測されたレーダエコー強度にもとづく月表面誘電率の決定, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 千葉, 2013 年 5 月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 由貴 (YOSHITAKA, Goto)
金沢大学・理工研究域・電子情報学系・
准教授
研究者番号: 30361976

(2) 研究分担者

笠原 禎也 (YOSHIYA Kasahara)
金沢大学・総合メディア基盤センター・
教授
研究者番号: 50243051

(3) 連携研究者

熊本 篤志 (ATSUSHI Kumamoto)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・
准教授
研究者番号：00302076