

Kaguya/LRS のオーロラキロメートル放射観測を用いたパッシブレーダーによる月面及び地下構造探査手法の検討

#田中 絵美¹⁾, 土屋 史紀²⁾, 熊本 篤志³⁾, 笠羽 康正⁴⁾, 三澤 浩昭⁵⁾, 安田 陸人⁶⁾, 北 元⁷⁾

⁽¹⁾ 東北大学, ⁽²⁾ 東北大・理・惑星プラズマ大気, ⁽³⁾ 東北大・理・地球物理, ⁽⁴⁾ 東北大・理, ⁽⁵⁾ 東北大・理・惑星プラズマ大気研究センター, ⁽⁶⁾ 東北大・理・惑星プラズマ大気研究センター, ⁽⁷⁾ 東北工業大学

Method to explore the lunar surface and subsurface structure by passive radar using AKR observed by Kaguya/LRS

#Emi Tanaka¹⁾, Fuminori Tsuchiya²⁾, Atsushi Kumamoto³⁾, Yasumasa Kasaba⁴⁾, Hiroaki Misawa⁵⁾, Rikuto Yasuda⁶⁾, Hajime Kita⁷⁾

⁽¹⁾Tohoku University, ⁽²⁾Graduate School of Science, Tohoku University, ⁽³⁾Graduate School of Science, Tohoku University, ⁽⁴⁾Graduate School of Science, Tohoku University, ⁽⁵⁾Graduate School of Science, Tohoku University, ⁽⁶⁾Tohoku university, ⁽⁷⁾Tohoku Institute of Technology

Passive radar is an exploration technique using echoes of strong natural radio emissions such as planetary auroral radio waves phenomena that are reflected at the solid surface and the ionosphere of target bodies. The passive radar has been studied for observations of the subsurface structure of Jupiter's icy moons with the JUICE spacecraft [Kumamoto et al. 2016], and applied to auroral kilometric radiation (AKR) to search the lunar ionosphere [Goto et al., 2011]. This study investigates a method to explore the lunar regolith layer and the subsurface structure using AKR observed by the Lunar Radar Sounder (LRS) onboard the lunar orbiter Kaguya. The LRS consists of three subsystems: the sounder transmitter/receiver (SDR), the HF natural wave receiver (NPW), and the VLF waveform receiver (WFC). The LRS-NPW is capable of natural wave observation in the frequency range of 20 kHz to 30 MHz, and the AKR observed by the NPW is used in this study. This study has two purposes. The first one is to explore the subsurface structure of the Moon from dynamic spectra of AKR observed by the LRS-NPW. To detect the lunar subsurface structure, we will use the interference patterns between direct waves of AKR propagating from the Earth and those reflected from the lunar surface and subsurface structures. Since the frequency of AKR (several 10 to several 100 kHz) is lower than active radar sounders (LRS-SDR, 4-6 MHz), it has the potential to explore deeper subsurface structures than active radar sounders. In this study, the dynamic spectrum was modeled by calculating the interference fringes on the radio spectrum at the position of Kaguya. The second purpose is global exploration of the physical properties of the lunar regolith layers, which will allow estimation of the permittivity of lunar surface materials from the surface echo intensity, since the longer wavelength of AKR (the order of 1 km) could reduce the effect of lunar surface irregularities on the surface echo intensity. Therefore, the dielectric constant of lunar surface materials could be estimated from the surface echo intensity. Since the dielectric permittivity obtained from return samples of the Apollo program depends on local characteristics of the Lunar surface, the remote sensing technique will enable to obtain a global survey of the regolith layer material of Moon. For these purposes, a two-layer subsurface structure was assumed, with a relative permittivity of 4.0 for the first layer from the lunar surface, 8.0 for the second layer, and the thickness of the first layer of 1 km. To consider the attenuation of radio waves in the first layer, the loss tangents of 0.01 and 0.003 are assumed. Under the above assumptions, the interference fringes at the position of Kaguya were calculated, and the frequency interval and amplitude of the interference fringes were derived. When the incident angle of AKR to the Lunar surface is 0 degrees, the frequency interval and amplitude of the interference fringes caused by direct and surface-reflected waves are 1.5 kHz and 6.0 dB, respectively. The frequency interval of the interference fringes between the surface and subsurface reflected waves was 75 kHz, and the amplitude was about 0.5 dB for a loss tangent of 0.01 and about 0.8 dB for a loss tangent of 0.003. Since the frequency resolution of LRS-NPW is 6 kHz, interference fringes due to direct-directed and surface-reflected waves cannot be observed if the incident angle is small. The interval of interference fringes increases as the incident angle increases [Kumamoto et al., 2016], and simulation results show that interference fringes can be observed with the LRS-NPW frequency resolution if the incident angle is larger than 79.2degree. Based on these studies, we have completed development of a tool to simulate interference fringes at arbitrary position of Kaguya. We will identify areas on the lunar surface where interference fringes are observed and investigate the subsurface structure of the lunar surface and the permittivity of materials in the regolith layer.

惑星のオーロラ帯を起源とする強い自然電波放射が衛星の表層や電離圏で反射するエコーを利用した探査手法をパッシブレーダーと呼び、木星探査機 JUICE での実施を想定した木星の氷衛星の地下構造探査の検討 [Kumamoto et al., 2016] や、オーロラキロメートル電波 (AKR) を月の電離層探査に適用した研究がある [Goto et al., 2011]。本研究では月周回衛星「かぐや」に搭載された月レーダーサウンダー LRS(Lunar Radar Sounder) が観測する AKR を用いて、月面のレゴリス層とその下の地下構造を探査する手法の検討を行う。LRS はサウンダー送受信部 (SDR)、HF 帯自然波動受信部 (NPW)、VLF 帯波形受信部 (WFC) の 3 つのサブシステムから成っている。LRS-NPW では 20kHz~30MHz の周波数帯で自然波観測が可能であり、本研究では NPW が観測する AKR を検討に使用する。

本研究の目的は、2つある。1つ目の目的は、LRS-NPW で得られた AKR 観測データから、月の地下構造を探索する手法を検討することである。AKR の地下エコーから月の地下構造を探索するため、地球方向から伝搬する AKR の直達波と、月面及び地下構造での反射波の干渉パターンを利用する。AKR の周波数は数 10~数 100kHz と低周波であり、4-6MHz のアクティブレーダーサウンダー (LRS-SDR) よりも深い地下構造を調べられる可能性がある。本研究では、AKR の直達波と、月面と地下からの反射波により、電波スペクトル上に生じる干渉縞を計算し、観測されたダイナミックスペクトルとの比較を行う。

2つ目の目的は、月のレゴリス層の物性を全球的に探索する手法を検討することである。AKR は波長が 1km スケールとなるため、アクティブレーダーと比べて表面エコー強度が月表面の凹凸から受ける影響が小さくなることから、表面エコー強度から月表面物質の誘電率を推定できる可能性がある。アポロ計画において持ち帰られた「月の石」の分析から得られる誘電率は局所的なものであり、本研究では LRS で得られた観測結果から、月全体のレゴリス層物質のグローバルな調査が可能かどうかの検討を行う。

本研究の検討では、2層の地下構造を仮定し、月面から1層目の比誘電率を 4.0、2層目を 8.0、1層目の厚さを 1km と設定した。1層目での電波の減衰については、比誘電率の虚数部から算出される損失角が 0.01 の場合と 0.003 の場合を検討した。以上の仮定のもとで、AKR の直達波、月面での表面反射波、及び地下反射波の3つの電波をかぐやが受信した時に生じる干渉縞を計算し、干渉縞の周波数の間隔 [kHz] と振幅 [dB] を導出した。その結果、入射角が 0 度の時、直達波と表面反射波による干渉縞の間隔は 1.5kHz、振幅は 6.0dB であった。また、月面の表面反射波と地下反射波の干渉縞の周波数間隔は 75kHz、振幅は損失角が 0.01 の場合は約 0.5dB、損失角が 0.003 の場合は約 0.8dB となった。LRS-NPW の周波数分解能は 6kHz なので、入射角 0° となるような (0° E, 0° N) の付近の領域では直達波と表面反射波による干渉縞を十分な分解能で観測できないが、表面反射波と地下反射波の干渉縞は検出できる可能性がある。一方で、AKR の月面への入射角が大きくなると干渉縞の間隔が大きくなり [Kumamoto et al., 2016]、シミュレーション結果から、入射角が 79.2° 以上であれば LRS-NPW の周波数分解能でも干渉縞の観測が可能であることが分かった。

以上の検討をもとに、かぐやの緯度・経度に応じた、任意の入射角での干渉縞シミュレーションを行うツールを完成させ、実際の LRS-NPW 観測データと、シミュレーション結果の比較を通して、干渉縞の観測可能な領域を調査している。今後は、干渉縞が観測可能な月面上の領域を特定し、月面地下構造を調査するとともに、2つ目の目的に設定したレゴリス層の物質の誘電率を求める検討を行う。