

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地下構造探査手法の検討

#田中 絵美¹⁾, 土屋 史紀¹⁾, 熊本 篤志¹⁾, 笠羽 康正¹⁾, 三澤 浩昭¹⁾, 安田 陸人¹⁾, 北 元²⁾

⁽¹⁾ 東北大学・理, ⁽²⁾ 東北工業大学, ⁽³⁾ 東北大・理, ⁽⁴⁾ 東北大・理, ⁽⁵⁾ 東北大・理, ⁽⁶⁾ 東北工業大学

Method to explore the lunar subsurface structure by passive radar using auroral kilometric radiation with Kaguya/LRS

#Emi Tanaka¹⁾, Fuminori Tsuchiya¹⁾, Atsushi Kumamoto¹⁾, Yasumasa Kasaba¹⁾, Hiroaki Misawa¹⁾, Rikuto Yasuda¹⁾, Hajime Kita²⁾

⁽¹⁾Tohoku University, ⁽²⁾Tohtech, ⁽³⁾Tohoku University, ⁽⁴⁾Tohoku University, ⁽⁵⁾Tohoku University, ⁽⁶⁾Tohtech

The Lunar Radar Sounder (LRS) was installed on KAGUYA(SELENE). The purpose of the LRS is to perform radar soundings of the lunar surface and subsurface structure to understand the evolution of the Moon. The LRS consists of three subsystems: the sounder transmitter and receiver (SDR), the natural plasma wave receiver (NPW), and the VLF wave form capture (WFC). LRS-NPW is capable of natural wave observations in the frequency range of 20kHz to 30MHz. With this receiver, natural radio wave observations such as aurora kilometer radio waves (AKR) originating from the Earth's auroral latitudes and Jupiter radio waves in the hectometer band (HOM) have been successfully carried out [Kumamoto et al. 2016]. Recently, using echoes of these natural radio waves, investigations of the subsurface structure and ionosphere of Jupiter's icy satellites are being considered for implementation with the JUICE spacecraft. Such an observation technique is called a passive radar. Although there have been studies on the Moon applying AKR to ionospheric probes [Goto et al. 2011], there has been no investigation of lunar subsurface structure using AKR. The objective of this study is to investigate a method to probe the lunar subsurface structure from AKR data obtained by LRS-NPW. To probe the subsurface structure, we use interference fringes between AKR direct waves propagating from the Earth and AKR reflections on the lunar surface and subsurface structure. In this presentation, we will show the preliminary results of the feasibility study. AKR is observed in a low frequency range from several tens to several hundred kHz and has the potential to probe deeper subsurface structures than an active radar sounder (LRS-SDR) which was operated in 4-6MHz. According to Ono et al.2010, interference fringes between direct waves and surface reflected waves have already been observed in the LRS. To calculate the interference fringes produced on the radio spectrum by the direct waves from the Earth and the reflected waves from lunar surface and subsurface, the following assumption were made. In this preliminary study, for simplicity, the incident angle of AKR to the lunar surface is set to 0deg and two-layer subsurface structure whose, relative permittivities are 4.0 for the first layer and 8.0 for the second layer. The attenuation in the first layer is not considered. KAGUYA's altitude from the lunar surface is set to 100 km and the thickness of the first layer is set to 1 km. Based on the above assumptions, the frequency spacing [kHz] and amplitude [dB] were determined for interference fringes due to direct and surface-reflected waves, and for those due to surface-reflected waves and subsurface-reflected waves, respectively. As a result, the interval and amplitude of interference fringes due to direct and surface-reflected waves were 1.5 kHz and 6.0 dB, respectively. The interference fringe interval between the surface-reflected and subsurface-reflected waves was 75 kHz, and the amplitude was 8.3 dB. The interference fringes actually captured by KAGUYA is a combination of direct, surface-reflected, and subsurface-reflected waves; the calculated interference fringes of the three waves show that the frequency interval of the interference fringes between the surface and subsurface reflected waves on the lunar surface is 75 kHz and their amplitude is 2 dB. Since the frequency resolution of LRS-NPW is 6 kHz, interference fringes due to direct and surface reflected waves cannot be resolved in the region near (0deg E, 0deg N), where the incident angle is 0deg, but interference fringes between surface and subsurface reflected waves could be detectable. Since a frequency spacing of interference fringes become wider as the AKR incident angle is larger [Kumamoto et al. 2016], it is expected that the LRS-NPW will be able to capture the interference fringes due to the direct waves and the reflected waves. In order to reproduce the fringe under more realistic conditions, it is necessary to add the attenuation term in the first layer, which is currently not taken into account, and also to enable calculations at arbitrary angles of incidence, depending on KAGUYA's latitude and longitude, for comparison with LRS-NPW observation data. In this presentation, I will discuss the progress of the research and prospects for deep structure exploration of the Moon.

月周回衛星「かぐや」には、月レーダーサウンダー LRS(Lunar Radar Sounder) が搭載されている。LRS の目的は、月表面および地下構造のレーダーサウンディングを行い、月の進化について理解することである。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動観測が可能である。この受信機により地球のオーロラ帯を起源とするオーロラキロメートル電波 (AKR) やヘクトメートル帯の木星電波 (HOM) 等の自然電波観測に成功している [Kumamoto et al., 2016]。近年、このような自然電波のエコーを用いて、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や電離圏探査の検討が行われている。この様な観測手法をパッシブレーダーと呼ぶ。月では AKR を電離層探査機に適用した研究はあるものの [Goto et al.,2011]、AKR を用いた月面地下構造探査の検討は未だ行われていない。本研究の目的

は、LRS-NPW で得られた AKR 観測データから、月の地下構造を探查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查するため、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反射した AKR の干渉パターンを利用する。今回は、予備的な検討結果について発表する。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。Ono et al.,2010 によると、AKR の直達波と表面反射波の干渉縞が LRS で既に観測されている。地球からの 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するため、以下の仮定を行った。

今回の予備検討では、簡単のため、2層の地下構造を仮定し、AKR が月面に対して入射角 0° で入射する場合を考える。月面から1層目の比誘電率を 4.0、2層目を 8.0 と設定した。1層目での伝搬減衰は考えないものとする。かぐやの月面からの高度を 100km、1層目の厚さを 1km とする。以上の仮定の上、直達波と表面反射波による干渉縞と、表面反射波と地下反射波による干渉縞について、周波数の間隔 [kHz] と振幅 [dB] をそれぞれ求めた。その結果、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、表面反射波と地下反射波による干渉縞の間隔は 75kHz、振幅は 8.3dB であった。実際にかぐやが捉えるのは直達波、表面反射波と地下反射波の3つを組み合わせた干渉パターンである。3つの波の干渉縞を計算した結果、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 でその振幅は 2dB 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 の入射角が大きくなるような領域では干渉縞の間隔が大きくなるので [Kumamoto et al., 2016]、直達波と表面反射波の干渉縞も捉えることができるようになる。また、LRS-NPW が観測する典型的な強度の AKR はノイズレベルの差が 15dB 程度であるので、干渉縞の 2dB の振幅を検出できる可能性がある。

今後は、より現実的な状況を再現するために、現在は考慮していない月面内での伝搬減衰項を加え、さらに、LRS-NPW の観測データと比較するために、かぐやの緯度・経度に応じて、任意の入射角での計算を可能にする必要がある。

本講演では、研究の進捗状況および月の深部構造探查に対する展望等について述べる。