

# Observation of the lunar ionosphere by the dual-spacecraft radio occultation technique in SELENE

## Abstract

Observations of the bending near the moon of radio waves emitted from the radio star in the 1960s and radio occultation experiments performed in the Luna missions of Russia in the 1970s indicated the existence of the lunar ionosphere on the sunlit side with electron densities of the order of  $100 \text{ cm}^{-3}$ . On the other hand, theoretically the lunar ionosphere is thought to have densities on the order of  $1 \text{ cm}^{-3}$  when we consider that the solar wind electric field sweeps ions and electrons away and that the density of the lunar neutral atmosphere is as low as  $10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$ . The radio science (RS) experiments in the SELENE (KAGUYA) mission aims at solving this problem.

In the SELENE RS, we have conducted more than 300 observations of the lunar ionosphere by using two radio frequencies of 2218 MHz and 8456.125 MHz transmitted from a single spacecraft (Vstar). The purpose of using two radio frequencies is to extract the contribution from the electrons density along the ray path by removing the effects of the frequency variations of the onboard frequency source via a linear combination of the phase variations in the two frequency bands. In addition to this single spacecraft method, we have conducted a new occultation method using two satellites, which is the theme of this thesis. In this method, one of the two sub-satellites, Rstar, is used to measure the terrestrial ionosphere contribution while another sub-satellite, Vstar, is occulted by the moon; the difference between the two measurements gives the lunar ionosphere component without being disturbed by the Earth's ionosphere. A difficulty in this method was that we were forced to use two S-bands whose frequencies are close to each other (2218 MHz and 2287 MHz) because of the specification of the Rstar's transponder. This results in a relatively large uncertainty in the derived electron density. Another difficulty was that the two sub-satellites must be present within the beam diameter of the ground antenna, and consequently, the number of observation opportunities was limited.

The 21 observations by this method covered the solar zenith angles (SZA) ranging from  $71.5^\circ$  to  $123.2^\circ$ . Within this SZA range we do not see a steady increase of the electron density even on the sunlit side of the lunar surface; this result is not in harmony

with the result from the Luna missions, in which the enhanced electron density is a stable feature on the sunlit surface even near the terminator. There are two exceptional cases at  $SZA = 71.1^\circ$  and  $81.1^\circ$ , in which enhancements of the electron column density were observed below  $\sim 30$  km altitude with magnitudes similar to those observed in the Luna missions. This implies that the lunar ionosphere has a sporadic or localized feature in this SZA range.

## 要旨（日本語訳）

1960年代の電波天体を用いた掩蔽観測や1970年代のロシアの月ミッションでの電波掩蔽観測により、昼側の月面近傍に密度にして数百個  $\text{cm}^{-3}$  の電子が存在することが示唆された。一方、月には地球のような磁気圏が存在しないため、太陽風の電場によりプラズマが速やかに剥ぎ取られることが予想される。そのためせいぜい  $10^4$  -  $10^5$  個  $\text{cm}^{-3}$  程度の密度である月の中性大気が電離されることだけを考慮すると、月周辺の電子密度は1個  $\text{cm}^{-3}$  程度であると理論的に見積もられる。また電波天体を用いた掩蔽観測で月の電離層の存在を否定するような結果も得られているということもあり、一般的には月の電離層の存在は受け入れられていない。もし月に電離層があるとなれば月の環境科学に対して新たな知見を得る事になる。かぐや電波科学(RS)ではこの問題に決着を付ける事を目的としている。

かぐや電波科学では、1機の衛星から送信される 2218 MHz と 8456.125 MHz の電波を用いる従来型の電波掩蔽観測を 300 回以上実施した。2周波を用いるのは、これらの位相の線形結合により搭載発振器の周波数変動の影響を除去して電子密度の寄与を取り出すためである。この手法に加えて私は、かぐやミッションにおける2機の子衛星を同時に用いる電波掩蔽により月の電離層の観測をするという、世界でも類をみない手法を試みた。従来の電波掩蔽観測のように電波源が一つの場合は、地球電離層や太陽風プラズマの寄与と月電離層の寄与を分離できないという問題があったが、今回は1機が月で掩蔽されている間にもう1機で地球電離層と太陽風プラズマの寄与をモニターすることにより、月周辺の電子密度のみを測定できる。だが2機観測の場合には、一方の衛星の設計から、使用できる2つの周波数が 2218 MHz と 2287 MHz という極めて近いものである。そのためこれらの位相の線形結合で求めた電子コラム密度には観測ノイズが大きいという問題がある。また2機の衛星がアンテナのビーム径に入っていないと十分な観測回数と観測領域が限られるという欠点がある。私はこれらの制限のもとで月電離層の寄与を検出すべくデータ解析を実施した。

2機による観測では月面での太陽天頂角が  $74.1^\circ \sim 123.1^\circ$  の範囲で 21 回にわたってデータが得られた。この範囲では、平均的には月面近傍での電子密度の増分は見られなかった。この結果は、日照側であれば太陽天頂角が比較的大きく

でも安定した電離層が存在すると結論づけたロシアの観測結果と異なる。その一方で、例外的に日照側の2例において、有意と思われる電子密度の増分が見られた。