

修士論文

月起源イオンの生成過程及び生成量に関する
観測的研究

河村 麻梨子

東京大学大学院理学系研究科
地球惑星科学専攻
宇宙惑星科学大講座

平成26年2月

要旨

月には地球のようなグローバルな固有磁場や厚い大気は存在しないため、月面は太陽光や太陽風の影響を直接受ける。月周回衛星「かぐや」による月周辺プラズマ観測などによって、月固体表面を源とする月起源イオンの存在が確認された。その生成過程として、過去の地上/衛星観測の結果をもとに太陽光による光脱離 (PSD: Photon Stimulated Desorption) や太陽風スパッタリングなどが提案されている。しかし、これらの微視的な生成過程を詳細に理解するためには、リモート観測による視線方向に積分された観測量ではなく、現象の直接観測量が必要である。これまで、月周辺プラズマの直接観測をもとにした月起源イオンの生成過程に関する議論は殆ど行われておらず、その理解は未だ不十分である。月起源イオンの生成過程を理解することは、月固体表面と太陽光/太陽風の微視的な相互作用の理解という観点で重要であり、さらに月周辺に存在する希薄なプラズマ環境の成因を調査する意味でも重要である。

そこで本研究の目的は、月周回衛星「かぐや」搭載プラズマ観測装置 MAP-PACE の観測データを用い、月起源イオンの生成過程を定量的に理解することである。特に、主生成過程とされる PSD と太陽風スパッタリングに着目し、観測データからそれぞれの生成量を算出し比較した。MAP-PACE は電子観測器 2 台、イオン観測器 2 台で構成されており、本研究ではイオン観測器 IMA 及び IEA の観測データを用いた。「かぐや」衛星は 3 軸姿勢制御を行っており、月面側の衛星パネルに IMA が、反月面側の衛星パネルに IEA が搭載されている。IMA は、イオンのエネルギーや入射方向の情報に加え質量分析機能も有するため、検出したイオンのイオン種同定が可能である。

IMA が検出する月起源イオンを生成過程で分別すると、月面で生成されたイオン (月面生成成分) と中性大気 of 電離により生じたイオン (電離成分) となる。さらに月面生成成分には PSD により生成されたイオンと太陽風スパッタリングにより生成されたイオンが含まれる。本研究では、まず (1) 月面生成成分と電離成分が持つエネルギーの違いから両者を分別し、(2) 磁気異常領域と非磁気異常領域における月面生成成分を比較することで PSD による生成量と太陽風スパッタリングによる生成量を分別する手法を構築した。次に、構築した手法を用いて PSD および太陽風スパッタリングによる生成量を推定した。その結果、典型的な太陽風フラックス $3 \times 10^8 \text{ ions/cm}^2 \cdot \text{s}$ を仮定すると、月起源イオンの生成割合は PSD が 73%、太陽風スパッタリングが 27% であることがわかった。さらに太陽天頂角 θ 依存性は、PSD および太陽風スパッタリングともに $\cos^2 \theta$ であることがわかった。PSD については生成効率が月面温度に依存するために、生成量が $\cos^2 \theta$ 依存性を持ったと推測され

る。太陽風スパッタリングについては、太陽風によるガーデニング(かき混ぜ)効果によって月面表層粒子が放出されやすくなり、その密度分布が太陽風侵入長の動径成分に比例するために、生成効率が $\cos^2 \theta$ に比例したと考えられる。

PSD および太陽風スパッタリングによる月面からの粒子放出は、月と同様に太陽風が固体表面と直接相互作用する天体で普遍的に生じていると考えられる。本研究で得られた天体固体表面に起源を持つイオンの生成過程に関する知見は、月外気圏や月周辺プラズマの理解への手掛かりとなるだけでなく、月と同様の特徴を持つ天体プラズマ環境の理解にも応用できると考えられる。

Abstract

Since the Moon has neither thick atmosphere nor global intrinsic magnetic field, lunar surface is affected by both solar light and solar wind. The existence of lunar originating ions, which are emitted from lunar solid surface, has been observed by plasma measurements such as Apollo, Kaguya, and so on. Their generation processes have long been discussed and multiple generation processes - such as Photon Stimulated Desorption (PSD), solar wind sputtering, ionization of neutral particles, etc. - have been proposed. However, due to the absence of quantitative discussion based on direct observation of the lunar ambient plasma, understanding about production rates or contribution of each process is still not enough. Understanding generation processes of lunar ions is very important especially from the two view points: that it helps us to understand microscopic interactions between lunar solid surface and external input, and that it enables us to investigate the origin of rarefied plasma environment around the Moon.

In order to quantitatively understand the generation processes of lunar originating ions, we estimated and compared the amount of lunar originating ions generated at lunar surface by PSD and solar wind sputtering using data obtained by plasma analyzer MAP-PACE on “Kaguya”. MAP-PACE consisted of two electron analyzers and two ion analyzers, and we used data of ion analyzers, IMA and IEA. Since “Kaguya” was a three-axis stabilized spacecraft, one of the spacecraft panels on which IMA was installed always faced the lunar surface, and another panel on which IEA was installed always looked opposite direction. IMA, which was able to not only analyze energy and incident angle of detected particles but also perform mass analysis, made it possible to identify species of the detected ions.

Ions detected by IMA consist of ions generated at the lunar surface by PSD/solar wind sputtering and ionized neutrals. We established a method how to compare the amount of ions generated by PSD and by solar wind sputtering. First, we excluded ionized neutrals using the difference between the energy of ions generated at the lunar surface and that of ionized neutrals. Second, we discriminated ions generated by PSD and solar wind sputtering using both data obtained at magnetic anomaly regions and regions without magnetic anomalies.

We estimated production rate of lunar originating ions by PSD and solar wind sputtering using method we established. As a result, we found that 73% of the lunar originating ions were generated by PSD and 27% by solar wind sputtering under a typical condition in which solar wind flux was about 3×10^8 ions/cm² · s. We also found that production

rate of both PSD and solar wind sputtering varied as the square of cosine solar zenith angle. We proposed the solar zenith angle dependence of PSD was due to dependence of lunar surface temperature, while that of solar wind sputtering could be explained by the solar wind gardening effects.

Both PSD and solar wind sputtering occur at all astronomical bodies where solar wind ions directly interact with the surface, like the Moon. What we have showed in this thesis not only gives us clues for understanding lunar exosphere and plasma environment around the Moon, but also contributes to the understanding of plasma environment of astronomical bodies that have neither thick atmosphere nor global intrinsic magnetic field.