

かぐや MAP-PACE 観測データを用いた月面磁気異常領域における H₂O 存在量解析

#新井 雄大^{1,2)}, 齋藤 義文²⁾

(¹ 東京大学, (² 宇宙航空研究開発機構

Analysis of H₂O abundance in the lunar magnetic anomaly region using KAGUYA MAP-PACE data

#Yudai ARAI^{1,2)}, Yoshifumi SAITO²⁾

(¹The University of Tokyo, (²Japan Aerospace Exploration Agency

Understanding when and how water was delivered to or generated on the Moon is crucial for deciphering the history of the Moon's formation and evolution. Several previous missions suggested the presence of water on the lunar surface. Infrared spectroscopic observations with the M3 onboard Chandrayaan-1 indicated the existence of water ice in the permanent shadow of the polar regions. Furthermore, observations by the Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA) have detected a water molecule emission line at 6.1 μ m in the high-latitude surface layers of the Moon. These observations highly suggest the presence of water in the permanent shadows of the Moon. One hypothesis for the origin of lunar water is the chemical reaction between solar wind protons and oxygen atoms in the surface minerals. Surface minerals irradiated by protons are thought to form hydroxyl (OH) groups, and with further proton irradiation, H₂O is generated.

While the Moon does not have a global intrinsic magnetic field like Earth's, numerous localized regions of strong magnetic fields, known as magnetic anomalies, are known to exist, as discovered by the Lunar Prospector electron reflectometer and the MAP-LMAG magnetometer onboard the KAGUYA satellite. In these magnetic anomaly regions, it is suggested that the motion of ions and electrons is separated due to their interaction with the magnetic anomalies, leading to the formation of an upward-pointing electric field. This upward electric field is inferred to suppress the amount of solar wind protons reaching the lunar surface. Consequently, it is speculated that the water production rate decreases in magnetic anomaly regions.

In this study, we attempt to clarify the difference in H₂O abundance on the lunar surface by directly comparing the amount of H₂O ions above lunar magnetic anomaly regions and non-magnetic anomaly regions, using the data obtained by MAP-PACE onboard the lunar orbiter KAGUYA. This aims to verify whether the solar wind shielding effect by magnetic anomalies on lunar water generation can be detected through in-situ ion observations. We used MAP-LMAG data to classify observational points of KAGUYA's low-altitude (~50km) MAP-PACE data into magnetic anomaly and non-magnetic anomaly regions. In order to confirm the direct influence of the solar wind, we limited our data to the dayside with a specific range of solar zenith angles. Furthermore, we selected data from periods when the Moon was not within the Earth's magnetotail, allowing us to analyze the pure interaction between the solar wind and magnetic anomalies. Using these filtered datasets, we compared the counts corresponding to the time-of-flight of H₂O ions inside and outside the magnetic anomalies. The analysis revealed that the counts of H₂O ions and many other ion species were significantly reduced in magnetic anomaly regions compared to non-magnetic anomaly regions. This result is consistent with previous research, indicating that the magnetic anomalies either deflect or reflect the solar wind ions, which generate lunar surface-origin ions, thereby suppressing their interaction with the surface, or that low-energy ions generated within the magnetic anomaly are unable to escape. On the other hand, it was also confirmed that the ratio of counts observed in non-magnetic anomaly regions to those in magnetic anomaly regions changes at specific time-of-flights. In future work, we will consider the origin of the counts corresponding to the time-of-flight of H₂O ions detected above magnetic anomaly regions, as well as identify the particle species with differing count ratios between magnetic anomaly and non-magnetic anomaly regions and investigate their origins. We also plan to apply filters for latitude and longitude in order to investigate location dependency.

月の水がいつ、どのようにして月面に供給・生成されたかを理解することは、月の形成と進化の歴史を解明する上で重要な情報となる。先行する複数のミッションにより、月面に水が存在することが示唆されている。Chandrayaan-1 搭載の M3 による赤外分光観測によって、極域の永久影での水氷の存在が示唆されている他、成層圏赤外線天文台 SOFIA による観測では水分子特有の 6.1 μ m 輝線スペクトルが月の高緯度の表層で検出されている。これらの観測によって月の永久影における水の存在可能性が高まっている。月の水の起源の一つとして、太陽風中のプロトンと表層鉱物中の酸素原子の化学反応が考えられている。プロトン照射を受けた表層鉱物が OH 基を形成し、さらにプロトンが照射されることにより H₂O が生成される。

月は地球のようなグローバルな固有磁場は持たないが、Lunar Prospector の電子反射計や「かぐや」衛星に搭載された月磁場観測装置 MAP-LMAG により、局所的に磁場の強い領域である磁気異常領域が多数存在することが知られている。これらの磁気異常領域では太陽風プラズマとの相互作用によりイオンと電子の運動が分離され、上向きの電場が形成されることが示唆されている。この上向き電場は、月面に到達する太陽風プロトンの量を抑制し、結果として磁気異常領域では水の生成率が減少すると推測されている。

本研究では、月周回衛星「かぐや」に搭載されたプラズマ粒子観測装置 MAP-PACE の観測データを用いて、月面磁気

異常領域上空と非磁気異常領域上空における H₂O イオンの検出量を直接比較し、それぞれの領域における月表面の H₂O 存在量の差異を明らかにすることを試みる。これにより、磁気異常による太陽風遮蔽効果が月面での水生成に与える影響を、イオンの in-situ 観測によって検出することができるかどうかを検証する。「かがや」が低高度 50km で取得した MAP-PACE 観測データに対して、磁力計 MAP-LMAG データを用いて、観測点を磁気異常領域と非磁気異常領域に分類した。次に、太陽風の直接的な影響を確認するため太陽天頂角が一定範囲内の日中側のデータに限定した。さらに、月が地球の磁気圏尾部に入っていない期間のデータを選択し、太陽風と磁気異常の相互作用を解析できるようにした。これらのフィルターを適用したデータセットを用いて、質量分析中のイオンの飛行時間が H₂O イオンの飛行時間に相当する部分の count を比較した。解析の結果、磁気異常領域における H₂O を含む多くの粒子種の count は、非磁気異常領域と比較して有意に減少していることがわかった。これは、磁気異常が、月表面起源のイオンを生成する原因となる太陽風を偏向・反射させ、月表面層との相互作用を抑制するか、あるいは、磁気異常中で生成された低いエネルギーのイオンが、磁気異常から抜け出せないことを示しており、先行研究と矛盾しない結果である。一方で、特定の飛行時間において非磁気異常領域で観測された count と磁気異常領域で観測された count の比率が変化しているデータもあることが確認された。今後は、磁気異常領域上空において検出された H₂O イオンの飛行時間に相当する count の起源について考察するとともに、磁気異常領域と非磁気異常領域で count の比率が異なる粒子種の同定とその成因について考察する。また、緯度・経度についてもフィルターをかけ、場所依存性についても調査する予定である。本発表では上記の現状を報告する。