

## 太陽風プロトンとアルファ粒子が月磁気異常領域によって受ける影響の比較

# 加藤 大羽 [1]; 齋藤 義文 [2]; 西野 真木 [3]; 横田 勝一郎 [2]  
[1] 東大・理・地惑; [2] 宇宙研; [3] 名大 STE 研

## Comparison of the effects of lunar magnetic anomalies on the solar wind protons and alpha particles

# Daiba Kato[1]; Yoshifumi Saito[2]; Masaki N Nishino[3]; Shoichiro Yokota[2]  
[1] EPS, Univ. of Tokyo; [2] ISAS; [3] STEL, Nagoya University

Since the Moon is mostly located outside the Earth's magnetosphere except for the full moon period, lunar surface is directly affected by the solar wind. Observation of the solar wind ions around the Moon is very important in understanding not only the lunar plasma environment but also the space weathering of the lunar surface.

Investigating the interaction between the Moon and the solar wind is one of the typical science targets of the lunar plasma observation. In the lunar plasma environment, the solar wind ions are the major supplier of ion. Therefore, detailed study of the solar wind ions is important in understanding the lunar plasma structure. The flux of the magnetically reflected solar wind ions was reported to be about several tens of percent of the incident solar wind ion flux. The solar wind consists of protons as a major component, several percent of alpha particles as a second major component, and a small amount of heavier ions. Although the solar wind ions consist of multiple ion species, nobody has ever investigated the reflected solar wind ions over lunar magnetic anomalies separating the ion species.

We have analyzed the data obtained by low energy charged particle analyzers MAP-PACE and magnetometer MAP-LMAG on Kaguya. We have found that the reflected protons and the reflected alpha particles show significantly different behavior over lunar magnetic anomalies. In particular, the ratio of the reflected flux to the incident solar wind flux, and the bulk speed of reflected ions are different.

We will put focus on the bulk speed of the reflected protons and reflected alpha particles. We have newly found a relation between the observed direction and the magnitude of the deceleration where the magnitude of the deceleration is different between the reflected ions parallel and tangential to the lunar surface. This relation has no dependence on the angle between the incident solar wind ions and the lunar surface. It may be due to the different behavior between protons and alpha particles after being reflected by magnetic anomalies.

In order to understand the observation, we have made a model of the magnetic anomaly and calculated the trajectory of the solar wind protons/alpha particles. We have calculated the proton and alpha particle trajectory after magnetic mirror reflection, at the same observation position, with same magnetic field intensity, and with the same incident bulk speed and direction. In this case, Larmor radius of the alpha particle is twice larger than that of the proton. Therefore alpha particles have trajectory with larger spatial scale than protons. It can explain not only the difference in the deceleration but also the difference in the ratio of the reflected flux to the incident flux between the solar wind protons and alpha particles.

It has been thought that the solar wind ions over strong lunar magnetic anomalies are reflected by the magnetic field, and most of the reflected ions will not reach the lunar surface. The result of this study shows that the interaction between the solar wind and the Moon is different between the different solar wind ion species. Therefore, the amount of the solar wind ions that impact the Moon surface depends on the ion species. It is applicable to the research of lunar surface evolution process because the ion species reaching the lunar surface can be determined. This study can contribute to the lunar plasma physics and solid planetary science.

月は満月の前後の短い期間を除き、大部分の期間で地球磁気圏の外に位置している。この期間、月は直接太陽風と相互作用しており、月面近傍まで到達した太陽風イオンは月プラズマ環境や月表面の宇宙風化に大きな影響を与えている。

月面と太陽風の相互作用の解明は、月周辺のプラズマ環境の研究における代表的な科学目標である。厚い大気も大局的な固有磁場も存在しない月のプラズマ環境において、太陽風は最大のプラズマ粒子源である。月の磁気異常領域上空では、太陽風イオンの数十パーセントが磁場によって反射されることが知られている。太陽風イオンはプロトンが主成分であるが、ヘリウムの2価イオンである、アルファ粒子も数パーセントほど含まれており、ごく微量ながら酸素イオン等も確認されている。このように月へ飛来してくる太陽風イオンには複数の種類が存在しているにも関わらず、太陽風イオンをイオン種別に分類した上で月のプラズマ環境の議論はこれまで行われていない。太陽風イオンをイオン種で分類し比較することではじめて得られる情報を用いて詳細な議論を行うことで、月表面の磁場構造の把握やその上空の電場構造を含む、月周辺環境の理解を進めることができる。

月探査衛星「かぐや」に搭載されたプラズマ・磁場観測装置 MAP-PACE, LMAG の観測データを用い、磁気異常上空で反射されたイオンについて質量分析を含めた解析を行った。解析の結果、磁気異常領域上空において、磁気異常によって反射された太陽風イオンのプロトンとアルファ粒子は異なる分布を示すことが明らかとなった。特に反射フラックスの強度と、反射後の減速の度合いがこの2種類のイオン粒子で異なることが顕著に確認された。

本発表では、特に反射されたプロトンとアルファ粒子の減速に焦点を当てて発表を行う。同じ速度、同じ方向から入射してきた太陽風プロトンとアルファ粒子が、月磁気異常領域の磁場によって反射され高度を上げ、「かぐや」高度で観測

されたときの反射速度と観測方向の関係性を調べた。まずは月表面と垂直方向に入射してきた太陽風イオンが強い磁気異常によって反射されたとき、その上空で観測を行っていた「かぐや」の観測データを確認した。その結果、月表面から垂直方向に飛来してきた反射粒子と平行方向から飛来してきた反射粒子とで、減速の仕方に違いが確認された。またフラックス強度についても反射方向によって強度差が存在した。これらの特徴はプロトンよりもアルファ粒子の方が顕著に観測された。次に、太陽風イオンの入射方向に注目し、太陽風イオンの入射方向と月表面の角度が垂直方向でない場合についても調べたところ、同様の結果が得られた。このような太陽風イオンの反射方向と減速の関係は、太陽風イオンの入射角度に依らず確認されることから、反射後のプロトンとアルファ粒子が持つ特徴の差が表れていると考えられる。

この解析結果を理解するために、モデルとなる磁気異常を想定して入射太陽風イオンの反射軌道の計算を行った。入射速度、入射方向、磁場強度、観測位置などが同じ条件下でのプロトンとアルファ粒子の反射後の軌道を計算した。この場合、アルファ粒子のラーマー半径はプロトンのものの2倍の長さとなる。このラーマー半径の大きさの差によって、月面付近に到達した太陽風アルファ粒子は太陽風プロトンよりも大きな空間スケールの軌道を描いて反射し、観測高度まで到達するはずである。ラーマー半径の違いを考慮すると、太陽風プロトンとアルファ粒子の間の減速の仕方の違いだけでなく、反射後のフラックス強度の減少比の違いについても説明することができる。この粒子軌道計算結果と、「かぐや」観測の解析結果についての整合性についても本発表で併せて報告する。

これまで、月の強い磁気異常領域に飛来してきた太陽風イオンは磁場によって反射され、月表面にはほとんど到達しなくなると考えられてきた。しかし本研究の結果から、太陽風プロトンとアルファ粒子で月プラズマ環境の影響を受けた後の振る舞いが異なることが示唆された。このことはイオンの種類によって月表面への到達率が異なるということであり、月周辺空間におけるプラズマ物理学だけでなく固体惑星科学の分野にも役立つ情報を得られる事が期待できる。