

修士論文

月磁気異常による太陽風イオン反射の  
質量依存性

加藤 大羽

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28年1月21日

# 要旨

月は満月の前後を除いた約 8 割の期間で地球磁気圏の外側に位置している。月には地球のような全球的な固有磁場も濃い大気も存在しないため、太陽風と月面が直接相互作用している。1960 年代に磁気異常と呼ばれる局所的に強い磁場を持つ領域が月面で発見されて以降、月磁気異常と太陽風の相互作用の解明は、月周辺プラズマ環境における代表的な科学目標となっている。

太陽風イオンは  $H^+$  が主成分で、次に  $He^{++}$  が数パーセントほど存在し、その他の重イオンはごく微量のみ含まれている。月磁気異常領域上空では太陽風イオンの 10 パーセント程度が磁場によって反射されることが知られている。しかしながらイオンの質量は磁気反射の運動を決める重要なパラメーターであるにも関わらず、反射イオンの質量依存性についてこれまで十分な理解が得られていない。

本研究では月周回衛星「かぐや」搭載イオン観測装置 MAP-PACE-IEA, IMA と磁場観測器 MAP-LMAG の観測データを用いて、月磁気異常でのイオン反射過程を定量的に理解することを目的とする。「かぐや」衛星は 3 軸姿勢制御衛星であるので、常に衛星の同じ一面が月面を向く。そのため IMA が月面方向、IEA が反月面方向の視野を確保して観測している。IMA には質量分析機能が搭載されており、観測イオンのイオン種判別が可能である。

反射イオンの解析を行った結果、太陽風  $H^+$  と太陽風  $He^{++}$  の月磁気異常による反射が確認された。特に反射  $He^{++}$  の定量的な観測は今回が初となる。2 種類の反射イオンについて、フラックスの反射率および入射太陽風イオンと比較した反射率を求めた他、速度、密度、温度の比較を行った。 $H^+$  と  $He^{++}$  で共に反射による加熱が確認されたが、 $He^{++}$  の方が強く減速しておりフラックス反射率も小さいことが分かった。

次に反射イオンの軌道に制限を与えるため観測角度方向を分割し、反射イオンの方向依存性を調べた。月表面に対し垂直方向から飛来してきた反射イオンと平行方向からの反射イオンに分けてエネルギースペクトルを調べたところ、垂直方向イオンが水平方向イオンに比べ低速度になっていることが確認された。また反射イオンが高エネルギーであるほど、垂直方向イオンのフラックスの方が水平方向イオンよりも急激に減少していた。これらの現象について反射  $H^+$  と反射  $He^{++}$  の結果を定量的に比較することで、イオン反射の質量依存性も調べた。

観測方向の違いによる速度差が大きいほど、反射イオンの温度が高くなることが分かった。垂直方向で観測された反射イオンの方が低高度まで侵入した反射軌道を取るため、「かぐや」衛星の高度より下の領域でイオン加熱が行われ、非断熱的な反射を行うと考えられる。また反射  $H^+$  と反射  $He^{++}$  で高エネルギーイオンのフラックス損失を比較した結果、フラックス損失の傾向にはラーマー半径依存が存在するこ

とが分かった。ラーマー半径が大きいほど太陽風イオンが低高度まで侵入するため、月面衝突しやすくなる。太陽風  $\text{He}^{++}$  は太陽風  $\text{H}^+$  の約 2 倍のラーマー半径を持ち、 $\text{He}^{++}$  の方が大回りの軌道を描く。そのため月磁気異常領域上空の太陽風イオンは、 $\text{He}^{++}$  の方がより低高度まで侵入し衝突が起こりやすい。これらの結果について、磁場や電場が反射過程に与える効果や粒子軌道の数値計算結果との比較、太陽天頂角依存性についての検証を行った。

天体の固有磁場によるイオン反射は、あらゆる天体で起こる普遍的な物理素過程である。月磁気異常領域は太陽系内で最小スケールの天体固有磁場の 1 つであり、この領域でのイオン反射メカニズムの解明は月周辺プラズマ環境のみならず、他の天体が持つ多様な環境の理解にも応用できると考えられる。

# Abstract

The Moon is located outside the Earth's magnetosphere at a rate of about 80% except for the full moon period. The solar wind can directly interact with the lunar surface since the Moon has neither thick atmosphere nor global magnetic field. Since the discovery of locally magnetized regions called the lunar magnetic anomalies in 1960s, the interaction between the lunar magnetic anomalies and the solar wind is one of the typical science targets of the lunar plasma environment research.

The solar wind consists of  $H^+$  as a major component, several percent of  $He^{++}$  as a second major component, and a small amount of heavier ions. It is known that the flux of the magnetically reflected solar wind ions is about ten percent of the incident solar wind ion flux. Although ion mass is an important parameter of the magnetically reflection process, mass dependence of the reflected ions is not known at all.

The purpose of this thesis is to understand the ion reflection process over lunar magnetic anomalies, using the data obtained by low energy charged particle analyzers MAP-PACE and magnetometer MAP-LMAG on Kaguya. Since Kaguya is a three-axis stabilized spacecraft, one of the spacecraft panels on which an ion mass spectrometer MAP-PACE-IMA is installed always faces the lunar surface. Therefore MAP-PACE analyzers are designed to have a hemispherical field of view. MAP-PACE-IMA is an energy mass spectrometer that is possible to identify ion species of the observed ions.

As a result of the analysis of the reflected ions, we have found that solar wind  $H^+$  and  $He^{++}$  are both reflected by magnetic anomalies. In particular, quantitative observation of reflected  $He^{++}$  is made for the first time. For the two species of the reflected ions, the parameters such as flux, velocity, density and temperature were investigated. We have also calculated the ratio of the reflected ions to the incident solar wind ions. Although the reflected ions have higher temperature than the incident solar wind ions, the reflected  $He^{++}$  ions have lower velocity and flux than the reflected  $H^+$  ions.

In order to understand the different behavior of  $H^+$  and  $He^{++}$  ions, we have investigated a relation between the observed direction and parameters of the reflected ions. As a result, we have found significant velocity difference between the vertically reflected and tangentially reflected ions. We have also found that the high energy part of the vertically reflected ion flux decreased more than that of the tangentially reflected ion flux. By comparing energy spectra of the  $H^+$  and  $He^{++}$ , we examined the mass dependence of ion reflection process.

The temperature of reflected ions is related to the energy difference between vertical

and tangential directions. Since the vertically reflected ions can penetrate to low altitude, the vertically reflected ions are more significantly heated and decelerated than the tangentially reflected ions. It clearly indicates the existence of a non-adiabatic interaction between solar wind ions and lunar magnetic anomalies. Since high energy ions have larger larmor radius, the high energy ions can penetrate deeper into the magnetic anomalies than the low energy ions. Therefore, the amount of the solar wind ions that impact the Moon surface depends on the ion species. We have examined the effect of the magnetic field and electric field on the reflection process by comparing with the result of numerical simulations.

Ion reflection occurs at all astronomical bodies that has intrinsic magnetic field. Lunar magnetic anomaly is one of the examples that have the smallest scale in the solar system. The knowledge acquired by this study is useful not only to understand lunar plasma environment, but also to understand plasma environment around various astronomical bodies.