

月磁気異常上空のプラズマ構造

齋藤 義文 [1]; 西野 真木 [2]; 山本 忠輝 [3]; 横田 勝一郎 [1]; 浅村 和史 [2]; 綱川 秀夫 [4]
[1] 宇宙研; [2] 宇宙研; [3] 東大・理・地惑; [4] 東工大・理・地惑

Plasma structure over dayside lunar magnetic anomalies

Yoshifumi Saito[1]; Masaki N Nishino[2]; Tadateru Yamamoto[3]; Shoichiro Yokota[1]; Kazushi Asamura[2]; Hideo Tsunakawa[4]

[1] ISAS; [2] ISAS/JAXA; [3] Earth and Planetary Science, Univ. of Tokyo; [4] Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo TECH

It is well-known that the Moon has neither global intrinsic magnetic field nor thick atmosphere. Different from the Earth's case where the intrinsic global magnetic field prevents the solar wind from penetrating into the magnetosphere, solar wind directly impacts the lunar surface. Since the discovery of the lunar crustal magnetic field in 1960s, several papers have been published concerning the interaction between the solar wind and the lunar magnetic anomalies including both numerical simulations and observation by lunar orbiters. MAG/ER on Lunar Prospector found heating of the solar wind electrons presumably due to the interaction between the solar wind and the lunar magnetic anomalies and the existence of the mini-magnetosphere was suggested. However, the detailed mechanism of the interaction has been unclear mainly due to the lack of the in-situ observed data of low energy ions.

MAGnetic field and Plasma experiment - Plasma energy Angle and Composition Experiment (MAP-PACE) on Kaguya (SELENE) completed its ~1.5-year observation of the low energy charged particles around the Moon on 10 June, 2009. Kaguya was launched on 14 September 2007 by H2A launch vehicle from Tanegashima Space Center in Japan. Kaguya was inserted into a circular lunar polar orbit of 100km altitude and continued observation for nearly 1.5 years till it impacted the Moon on 10 June 2009. During the last 5 months, the orbit was lowered to ~50km-altitude between January 2009 and April 2009, and some orbits had further lower perilune altitude of ~10km after April 2009. MAP-PACE consisted of 4 sensors: ESA (Electron Spectrum Analyzer)-S1, ESA-S2, IMA (Ion Mass Analyzer), and IEA (Ion Energy Analyzer). All the sensors performed quite well as expected from the laboratory experiment carried out before launch. Since each sensor had hemispherical field of view, two electron sensors and two ion sensors that were installed on the spacecraft panels opposite to each other could cover full 3-dimensional phase space of low energy electrons and ions. One of the ion sensors IMA was an energy mass spectrometer. IMA measured mass identified ion energy spectra that had never been obtained at 100km altitude polar orbit around the Moon.

When Kaguya flies over strong magnetic anomalies, deceleration of the solar wind ions, acceleration of the solar wind electrons, and heating of the ions reflected by magnetic anomalies are observed. The deceleration of the solar wind ions is observed for both two major solar wind ion components: protons and alpha particles. Deceleration of the solar wind has the dE/q (dE : deceleration energy, q : charge) for both protons and alpha particles. In addition, the acceleration energy of the electrons is the same as the deceleration energy of the ions. It indicates the existence of DC electric field over Kaguya spacecraft. Since the gyro-radius of the electrons is smaller than the size of the magnetic anomalies, incident electrons are mirror reflected back. On the other hand, the gyro-radius of the ions is much larger than the size of the magnetic anomalies. Therefore the incident ions can penetrate deeper into the magnetic anomalies. As a result, DC electric field is generated over dayside magnetic anomalies. The reflected ions are observed in much larger area than the area where strong magnetic field is observed. These reflected ions have higher temperature and lower energy than the incident solar wind ions. It clearly indicates the existence of a non-adiabatic interaction between solar wind ions and lunar magnetic anomalies.

月にはグローバルな固有磁場が無く、濃い大気も無い事がよく知られている。強い固有磁場によって太陽風の磁気圏への直接侵入が妨げられている地球とは異なり、月表面には太陽風が直接衝突する事ができる。月表面磁気異常が発見された1960年代以降、太陽風と月面磁気異常の相互作用に関する、計算機シミュレーション、人工衛星による観測を含むいくつかの研究がなされている。米国のルナープロスペクターに搭載されたMAG/ERは、低エネルギー電子の観測によって太陽風と月表面磁気異常の相互作用によると考えられる電子の加熱を発見し、小型磁気圏の存在を示唆した。しかしながらその相互作用の詳細なメカニズムについては、低エネルギーイオンの直接観測データが無かったことからよくわからない状態が続いていた。

「かぐや」衛星搭載プラズマ観測装置MAP-PACE (MAGnetic field and Plasma experiment - Plasma energy Angle and Composition Experiment)は高度100kmの月周回軌道で低エネルギーイオンの連続観測を約1年半にわたって行なった。最後の半年間は、高度50kmに軌道を下げ、その後更に低い30km以下の高度での観測も行った。MAP-PACEは「かぐや」に搭載された14の観測装置のうちの一つであり、電子観測器ESA (Electron Spectrum Analyzer)-S1, S2、イオン観測器IMA (Ion Mass Analyzer)とIEA (Ion Energy Analyzer)の4種類のセンサーで構成されている。各センサーは半球面の視野を持っており、2台の電子観測器と2台のイオン観測器で低エネルギー電子とイオンの3次元分布関数を計測することができる。イオン観測器のうち、月面方向に視野を持つIMAは質量分析器であり、高度100kmの月周回軌道で初めてイオンの質量分析を行った。

「かぐや」が強い磁気異常上空を20kmの低高度で通過した際、入射太陽風イオンの減速、入射太陽風電子の加速、反射イオンの加熱などが観測された。入射太陽風イオンの減速については太陽風の主成分である水素イオンと、ヘリウム2価イオンの両方について観測され、それらの減速は、 E/q がほぼ一定であるような減速であることがわかった。更

に、入射太陽風電子の加速量と入射太陽風イオンの減速量はよい一致を示すが、このことは「かぐや」衛星上空に DC 電場が存在する事を示している。太陽風電子は磁気異常の磁場によって磁気ミラー反射されるが、太陽風イオンはラーマー半径が大きいためにより磁気異常近くまで侵入する事ができる。このことによって上記の電場が形成されと考えられる。更に、反射イオンについて調べたところ、磁力計で検出された磁気異常よりも広い領域に分布していること、入射太陽風イオンに比べて加熱されていることなどが明らかになった。特にヘリウムイオンについては顕著なエネルギーの減少が見られた。このことは、磁気異常による太陽風イオンの反射が単純な磁気ミラー反射では無く、非断熱過程を含む月面磁気異常との相互作用を経たものであることを示している。