

「かぐや」が観測した月 一月周辺プラズマの観測結果を中心に—

齋藤 義文^{*1}, 横田 勝一郎^{*1}, 田中 孝明^{*1}, 浅村 和史^{*1},
西野 真木^{*1}, 山本 忠輝^{*2}, 綱川 秀夫^{*3}, 渋谷 秀敏^{*4},
清水 久芳^{*5}, 高橋 太^{*3}, 松島 政貴^{*3}, 「かぐや」MAP 班

Lunar Plasma Observation by Kaguya — Results from MAP-PACE —

Yoshifumi SAITO^{*1}, Shoichiro YOKOTA^{*1}, Takaaki TANAKA^{*1}, Kazushi ASAMURA^{*1},
Masaki N. NISHINO^{*1}, Tadateru YAMAMOTO^{*2}, Hideo TSUNAKAWA^{*3}, Hidetoshi SHIBUYA^{*4},
Hisayoshi SHIMIZU^{*5}, Futoshi TAKAHASHI^{*3}, Masaki MATSUSHIMA^{*3} and KAGUYA MAP team

概 要

「かぐや」衛星搭載 MAP-PACE が高度 100 km の月周回軌道で低エネルギーイオンの連続観測を開始して以来 1 年が経過した。プラズマ観測装置 MAP-PACE は「かぐや」に搭載された 14 の観測装置の一つであり、月周辺プラズマの観測を行う。MAP-PACE は、電子観測器 ESA-S 1, S 2, イオン観測器 IMA と IEA 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 100 km の月周回軌道でこれまで観測された事の無かったイオンの質量分析を行った。MAP-PACE-IEA, IMA の観測によって初めて明らかになった月周辺における低エネルギーイオンの分布は、太陽風を別にすると次の 4 種類の特徴的な分布に大別できる 1) 月表面で反射／散乱された太陽風プロトン 2) 月面磁気異常によって反射された太陽風イオン 3) 月面で反射／散乱されたイオンが太陽風中の電場によってピックアップされ、加速されたもの 4) 月面／月面近傍の月大気を起源とするイオン。太陽風の反射／散乱は月周回で初めてその存在が観測されたが、グローバルな固有磁場が無く大気の希薄な天体には普遍的に存在するプロセスでありそれらの太陽風によるピックアップ加速も含めて天体周辺環境において無視できない重要なプロセスである。月面／月面近傍の月大気を起源とするイオンの観測も重要な成果のひとつである。これらのイオンの質量プロファイルを見ると、 C^+ , O^+ や Na^+/Mg^+ , K^+/Ar^+ などの重いイオンが含まれており、イオンが生成された月面位置との関係を調べる事で月面組成についての情報が得られるものと考えられる。

Keywords: 月, プラズマ, 磁気異常, アルカリ大気, 磁気圏, 太陽風

* 1 ISAS/JAXA
* 2 Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo
* 3 Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology
* 4 Department of Earth Science, Kumamoto University
* 5 Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1. は じ め に

月周辺の荷電粒子は1960年代から1970年代にかけて月周回衛星や、月面上に設置されたプラズマ観測装置により精力的に研究がなされた [Lyon *et al.*, 1967; Colburn *et al.*, 1967; Anderson *et al.*, 1972; Howe *et al.*, 1974; Neugebauer *et al.*, 1972; Clay *et al.*, 1972; Hills *et al.*, 1972]. しかしながらその後月を訪れた衛星の殆どは、月面のイメージングを目的としており、月周辺プラズマに関する新しいデータは長期間にわたって得られていなかった. 1990年代後半に米国の衛星ルナープロスペクタが月高度100 km以下での磁場と、低エネルギー電子の計測を行い月周辺の低エネルギー電子の分布については新しい結果が報告されている [Lin *et al.*, 1998; Halekas *et al.*, 2005]. 特に近年、月表面の帯電が将来の人類の月面活動に影響を与えるととしてルナープロスペクタの電子データを用いた月表面帯電に関する解析が行われている [Halekas *et al.*, 2007, 2008, 2009]. このように月周辺の低エネルギー電子分布については研究が進んでいるものの、月高度100 kmの周回軌道でこれまでにイオンの質量分析が行われた例は無く、MAP-PACEは世界で初めて月周辺イオンの分布を明らかにしたと言える. 本論文では、MAP-PACEの1年間にわたる月周回100 km高度で行った低エネルギーイオンの観測によって明らかとなった月周辺イオン分布について報告する.

2. 低エネルギープラズマ観測装置 MAP-PACE

プラズマ観測装置MAP-PACE (MAGnetic field and Plasma experiment — Plasma energy Angle and Composition Experiment) 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、月周辺プラズマの観測を行う. MAP-PACEは、電子観測器ESA (Electron Spectrum Analyzer) -S 1, S 2, 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 [Saito *et al.*, 2008 a].

電子観測器ESA-S 1, S 2は入射口に視野角方向掃引電極 (上部デフレクター, 下部デフレクター) を装備、観測装置内部のトロイダル型の偏向電極を用いて電子のエネルギー分析を行う. ESA-S 1, S 2の観測視野は、取り付け衛星パネルに垂直な方向 (観測装置の回転対称軸と同じ) から45度傾いた方向を中心に、視野角方向掃引電極を用いて ± 45 度の範囲をカバーしている. 回転対称軸周りの視野と併せて、1台あたり半球面の観測視野を実現している. 2台の電子観測器ESA-S 1とESA-S 2は「かぐや」衛星の+Z面 (月面を見下ろす側の衛星パネル) と-Z面 (月面と反対側の衛星パネル) にそれぞれ搭載されており、これら2台のセンサーを用いることで、電子の3次元分布関数の計測を行う事が出来る. 視野角方向掃引電極には0 Vから+4 kVの高圧が印加され、トロイダル型の偏向電極にはこれと同期して0 Vから+3 kVの高圧が印加される. 視野角方向掃引電極を通り抜けた電子のうち、トロイダル型の偏向電極に印加された高圧レベルに対応したエネルギーの電子のみが偏向電極を通り抜け荷電粒子の検出器であるMCP (マイクロチャンネルプレート) に入射、その背後に置かれた1次元円型抵抗体アノードで検出される. 電子の検出された位置から、回転対称軸まわりの電子の入射方向を特定することができる. 図1にESAの構造概念図を、表1にESA-S 1, ESA-S 2の性能を示す.

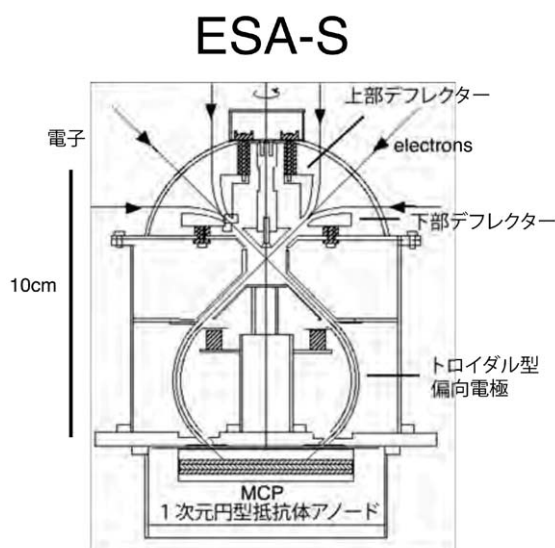


図1 ESA-S 1, ESA-S 2の構造概念図

表1 ESA-S 1, ESA-S 2 の性能

< ESA-S1 >		< ESA-S2 >	
Energy range	6 eV– 9 keV	Energy range	9 eV–16 keV
Energy resolution	15% (FWHM)	Energy resolution	10% (FWHM)
Energy sweep step	32	Energy sweep Step	32
Field of view	2π str.	Field of view	2π str.
FOV swccp range	$45^\circ \pm 45^\circ$ (Pol)	FOV sweep range	$45^\circ \pm 45^\circ$ (Pol)
Angular resolution	5° (Pol) \times 8° (Az) (FWHM)	Angular resolution	5° (Pol) \times 8° (Az) (FWHM)
g-factor ($5^\circ \times 22.5^\circ$)	5.3×10^{-4} cm ² str keV/keV (efficiency is not included)	g-factor ($5^\circ \times 22.5^\circ$)	1.2×10^{-4} cm ² str keV/keV (efficiency is not included)
Time resolution	1 s	Time resolution	1 s
Analyzer type	Toroidal analyzer	Analyzer type	Toroidal analyzer
Average radius	30 mm	Average radius	30 mm
Gap	5 mm	Gap	3 mm
Eccentricity	5 mm	Eccentricity	5 mm

IMA は ESA と同様の構造を持ったエネルギー分析部と、LEF (Linear Electric Field) TOF (Time Of Flight) イオン質量分析部で構成される [Yokota *et al.*, 2005]. IEA は IMA のエネルギー分析部と同じエネルギー分析器である. IMA は「かぐや」衛星の +Z 面に、IEA は -Z 面に搭載されている. 視野角方向掃引電極 (上部デフレクター, 下部デフレクター) には 0 V から +4 kV の高圧が印加され、球型の偏向電極にはこれと同期して 0 V から -4 kV の高圧が印加される. 視野角方向掃引電極と球型の偏向電極の間にある一対の電極は、感度調整電極であり IMA, IEA の感度を電氣的に 1/100 まで減衰させる事ができる. 太陽風イオンのフラックスと、月起源イオンのフラックスの強度は大きく異なるため、検出器の MCP を飽和させずに太陽風を計測し、同時に希薄な月起源イオンを十分な統計精度で計測できるようにこの感度調整電極を使用する. IEA の球型偏向電極を通り抜けたイオンは、MCP とその背後に置かれた 1 次元円型抵抗体アノードで検出される. イオンの検出された位置から、回転対称軸まわりのイオンの入射方向を特定することができる. 一方 IMA の球型偏向電極を通り抜けたイオンは、最大 15 kV 加速されて LEF TOF 質量分析部に入射する. 非常に薄い ($0.5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) カーボンフォイルが LEF TOF 質量分析部の入り口に取り付けられており、これを加速されたイオンが通過する際に 2 次電子 (スタート電子) を放出する. スタート電子は、質量分析器内部の電場で加速され、質量分析部の下方に置かれた MCP とその背後の 1 次元円型抵抗体アノードで検出される. スタート電子が検出された位置から回転対称軸まわりのイオンの入射方向を特定することができる. 更にこれらのスタート電子は、MCP と抵抗体アノードの間に置かれたメッシュ電極を通過する際スタート信号を生成する. カーボンフォイルを通過したイオンの殆どは電荷を失い、中性粒子として質量分析部に入射する. これらの中性粒子は抵抗体アノードの中央に置かれたアノードで検出され、その出力信号がストップ信号として使用される. カーボンフォイルを通過した一部のイオンは、正イオンとして質量分析部に入射する. これらのイオンは、入射位置からの距離に比例して大きくなる線形電場 (LEF) によって反射され、質量分析部の上部に衝突しそこで 2 次電子を生成する. これらの 2 次電子は、加速されて抵抗体アノードの中央に置かれたアノードでストップ信号として検出される. スタート信号とストップ信号の間の時間差を計測することで、イオンの質量を求めることができる. 特に反射イオンによって生成されたストップ信号を用いると、カーボンフォイルをイオンが通過する時に発生するエネルギー減衰の統計的揺らぎや、角度散乱の影響を受けずにイオンの質量を決定する事ができるため、ナトリウム、カリウムなどの重いイオンの質量分析を行うことが可能となる. 図 2 に IEA と IMA の構造概念図を、表 2 に IEA と IMA の性能を示す.

3. 月周辺電子、イオンの観測例

図 3 に ESA-S 1, S 2, IEA, IMA の観測視野を示す. ESA-S 1, IMA は常に月面を向いており、ESA-S 2, IEA は常に反月面側を向いている. 図 4 には月周回軌道における電子とイオンの観測例を示す. 図 4(a) は図 4(b) に示したデータを取得

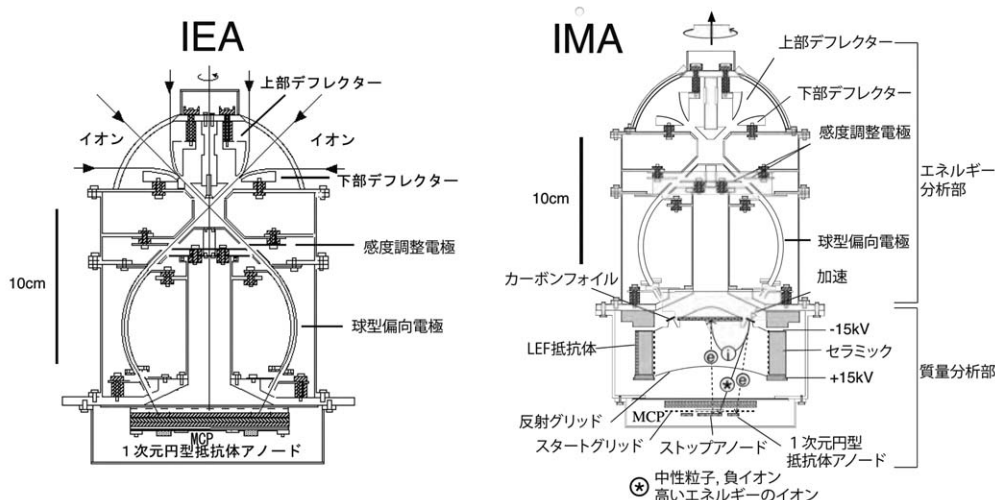


図2 IEA の構造概念図と性能

表2 IEA と IMA の性能

< IEA >		< IMA >	
Energy range	7 eV/q–29 keV/q	Energy range	7 eV/q–28 keV/q
Energy resolution	5% (FWHM)	Energy resolution	5% (FWHM)
Energy sweep step	32	Energy sweep step	32
Field of view	2π str.	Mass range	1–60
FOV sweep range	$45^\circ \pm 45^\circ$ (Pol)	Mass resolution	$m/\Delta m \sim 15$
Angular resolution	5° (Pol) \times 5° (Az) (FWHM)	Field of view	2π str.
g-factor ($5^\circ \times 22.5^\circ$)	$10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ str keV/keV}$ (variable) (efficiency is not included)	FOV sweep range	$45^\circ \pm 45^\circ$ (Pol)
Time resolution	1 s	Angular resolution	5° (Pol) \times 10° (Az) (FWHM)
Analyzer type	Spherical analyzer	g-factor ($5^\circ \times 22.5^\circ$)	$10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ str keV/keV}$ (variable) (efficiency is not included)
Average radius	55 mm	Time resolution	1 s
Gap	4 mm	Analyzer type	Spherical analyzer
		Average radius	55 mm
		Gap	4 mm

した日の月の位置を GSE (Geocentric Solar Ecliptic) 座標系で示したものであり、地球磁気圏界面の平均的な位置も併せて示してある。この日、月およびその周りを周回する「かぐや」は地球磁気圏の外の太陽風中に存在したことがわかる。図4 (b) は E-t 図と呼ばれるもので、横軸は時間、縦軸は測定したエネルギー／電荷であり、カラーマップで電子、イオンのカウント値を示す。横軸の時間は0時から24時迄であり、24時間のデータを示したものである。「かぐや」は、約2時間で月の周りを1周する。IEA のデータを見ると、約2時間毎に強いイオンのフラックスが観測されているが、これが太陽風イオンである。太陽風イオンとしては750 eV/q 付近の水素イオン (H^+ ；プロトン) と、1.5 keV/q 付近の2価のヘリウムイオン (He^{++} ；アルファ粒子) が観測されている。

太陽風イオンが観測される間、電子のフラックスも高くなっており、太陽風電子が観測されている事がわかる。太陽風イオンのフラックスが非常に弱くなる期間が2時間毎に見られるが、これはウェイクと呼ばれる月の太陽風と反対側の領域である。月によって太陽風が遮蔽されるため、この領域のプラズマ密度は非常に低くなっている。「かぐや」がウェイクに入る直前と直後に IMA でも強いイオンのフラックスが観測されている。IMA は常に月面側を向いているが、図3に示すように「かぐや」がウェイクに入る直前と直後には、太陽風を観測する事がわかる。IEA のデータをよく見ると 2.9 keV/q 以上のところとそれ以下のところに境界があるように見える。これは、2.9 keV/q 以下では IEA の感度を約 1/50 に減衰させ

ているため、 2.9 keV/q 以上で検出できるイオンの最少フラックスと 2.9 keV/q 以下で検出できるイオンの最少フラックスが異なるためであるが、こうすることによって高いフラックスの太陽風プロトンに飽和する事無く計測することができる。

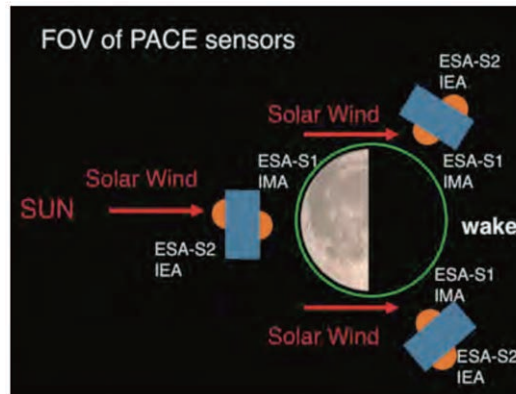


図3 PACEセンサーの視野

KAGUYA MAP-PACE 20080227 000000 - 240000

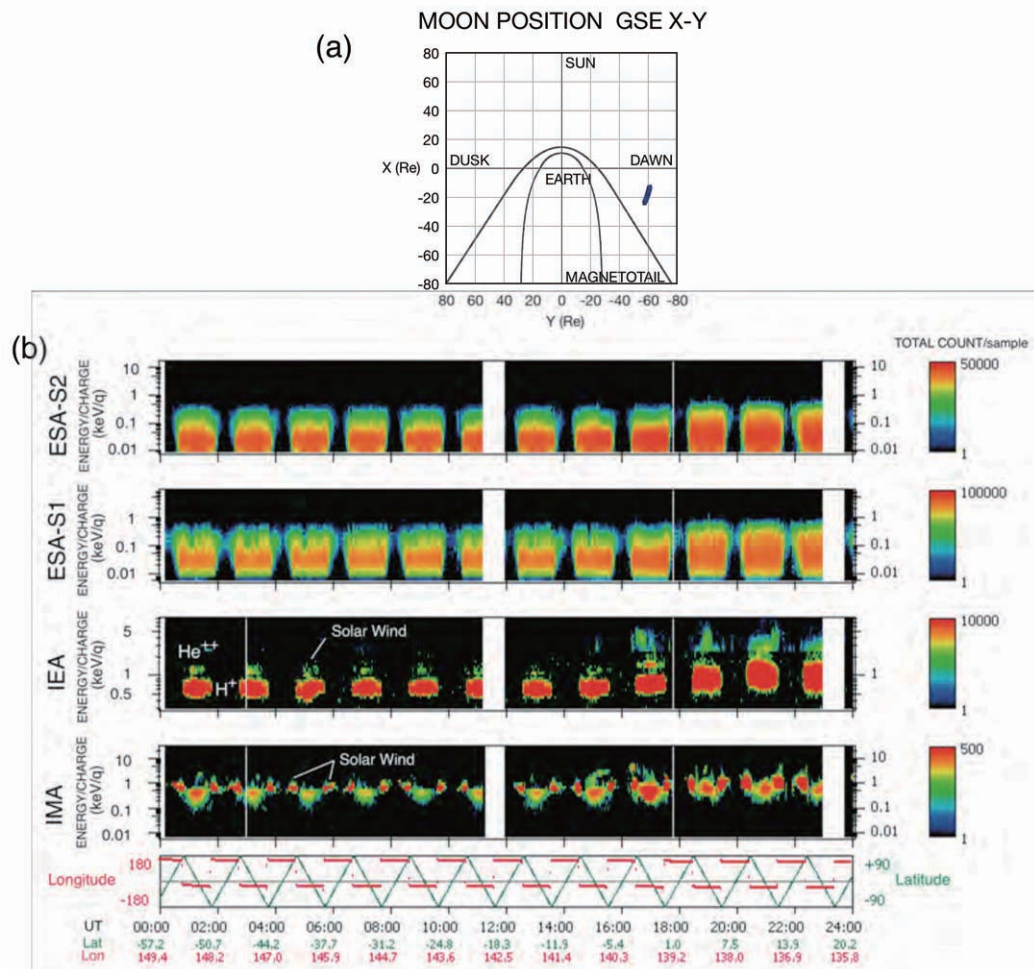


図4 月周回軌道における電子とイオンの観測例 (a) 2008年2月27日の「かぐや」の位置
(b) 2008年2月27日に観測されたPACEのE-t図

4. 月周辺低エネルギーイオンの分布

4.1. 月周辺低エネルギーイオンの概要

「かぐや」搭載 MAP-PACE の2台のイオンセンサー IEA, IMA は月周回高度 100 km で低エネルギーイオンの3次元分布を明らかにすると共に、初めてイオンの質量分析を行った。低エネルギーイオンとしては太陽風イオンの他に、太陽風が月面で散乱された成分、太陽風が月表面磁気異常によって反射された成分、月面で反射／散乱されたイオンが太陽風中の電場で加速された成分、そして月表面／月大気起源のイオンが観測された。以下にそれぞれのイオン分布について述べることにする。

4.2. 月面における太陽風イオンの散乱

IEA が太陽風を観測している間、IMA にも太陽風よりは強度は低いが、月方向から飛来するイオンが観測された [Saito *et al.*, 2008 b]。図5に IEA と IMA の E-t 図、「かぐや」衛星の月緯度、月経度と太陽天頂角を示す。横軸は2時間であり、「かぐや」が月周回を1周した間に得られたデータである。

IEA が太陽風を計測している一方で IMA に太陽風のエネルギーよりも少しエネルギーが低く、フラックスにして 0.1 % から 1 % 程度の月方向から飛来するイオンが計測されていることがわかる。IMA は質量分析器であるため、これらの月方向から飛来するイオンの質量プロファイルを調べたところ殆どがプロトンである事がわかった。一方で太陽風の質量プロファイルを調べたところ、主成分のプロトンの他に2番目に多いイオン種としてアルファ粒子が含まれていた。月方向から飛来するイオンは太陽風よりもエネルギーが低くフラックスも太陽風に比べて遥かに低いことから、太陽風が月表面に衝突して散乱された成分であると考えられる。もともと太陽風に含まれていたアルファ粒子が散乱イオンに含まれないのは、イオンが物質表面に衝突する際のイオン化率の差に依ると考えられる。質量分析器 IMA 内部では TOF 質量分析のスタート信号を生成するため、非常に薄いカーボンフォイルにイオンを通過させるが、プロトンが通過する際には中性粒子としてカーボンフォイルを出て行くものに加えて正イオンになるもの、負イオンになるものがある。一方、アルファ粒子が通過する際には殆どが中性粒子としてカーボンフォイルを出て行く。イオンが物質表面と衝突する際のプロセスはこれとは少し異なるが、元々正イオンであった粒子の電荷が変化することが知られている [Souda *et al.*, 1995]。太陽風イオンの散乱は、濃い大気、強い固有磁場の無い天体周辺では普遍的に起こる現象であると考えられるが、この普遍的な現象が月周辺で発見されたと言える。

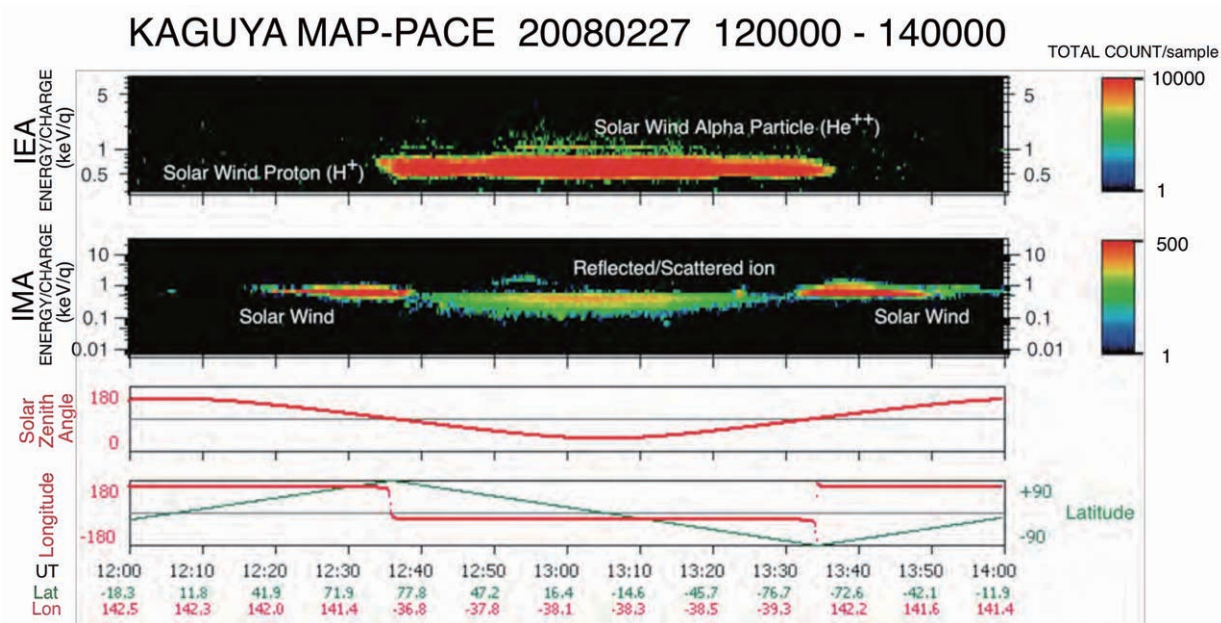


図5 月面における太陽風イオンの散乱を示す IEA 及び IMA の E-t 図

4.3. 月表面磁気異常による太陽風イオンの反射

South Pole Aitken 付近の月面には強い磁気異常の存在することが知られている。「かぐや」が South Pole Aitken 上空を通過する際に月方向から飛来する、太陽風とほぼ同じエネルギーを持ったイオンが観測された。これらのイオンのフラックスは、太陽風の 10 % を超える強度であり、明らかに前節で述べた月面で散乱されたイオンとは異なっている。図 6 にこれらのイオンが観測された際の ESA-S 1, ESA-S 2, IEA, IMA の E-t 図, 「かぐや」搭載磁場観測装置 MAP-LMAG [Shimizu *et al.*, 2008] によって観測された磁場強度, および「かぐや」の高度, 月緯度, 月経度を示す。白い円で囲った部分がこのイオンであるが、これらのイオンが観測された時、磁場の強度も強くなっていることがわかる。

IMA で観測されたこれらのイオンは、月面に存在する磁気異常によって太陽風が反射されたものであると考えられる。この場合、イオンは月面と衝突しないためエネルギーを失うことも無い。またこの事は、月表面の強い磁気異常は、太陽風イオンが月面に衝突するのを防ぐことができるということを意味している。これらのイオンが観測された時の ESA-S 1, ESA-S 2 の E-t 図を見ると、電子の加熱が起きている事がわかる。一方、IEA のデータを見ると少し太陽風が減速されていることがわかる。このことは、月面に入射する太陽風は、100 km 高度で既に月表面磁気異常の影響を受けている事を示している。太陽風と月面磁気異常の相互作用の詳細については現在解析が行われているところであり、今後の解明が期待される。

4.4. 反射／散乱イオンの太陽風電場によるピックアップ

図 7 に連続する 2 周回を間の IEA と IMA の E-t 図, 磁場の大きさや方向, および「かぐや」の位置情報を示す。

IMA のデータを見ると、太陽風が月面で散乱された成分の上限エネルギー付近から、「かぐや」衛星の緯度に応じてエネルギーの変化している高いエネルギーのイオンが観測されている。図 7 に示した例では、連続する 2 周回で緯度—エネルギーの関係が逆になっていることがわかる。磁場データを見ると、連続する 2 周回で磁場の方向が変化している。月静止系から見て、太陽風中には $-VXB$ (V は太陽風のバルク速度, B は太陽風中の磁場) で決まる電場が存在する。図 7 に示した例の場合、最初の周回ではこの電場は南向きであり、次の周回ではこの電場が北向きになっている事がわかった。これらのイオンの最高エネルギーを調べたところ、太陽風プロトンのエネルギーの約 6 倍である事がわかった。また、IMA が質量プロファイル取得モードで運用されていた時のデータを調べてみたところ、これらのイオンはプロトンである事が確

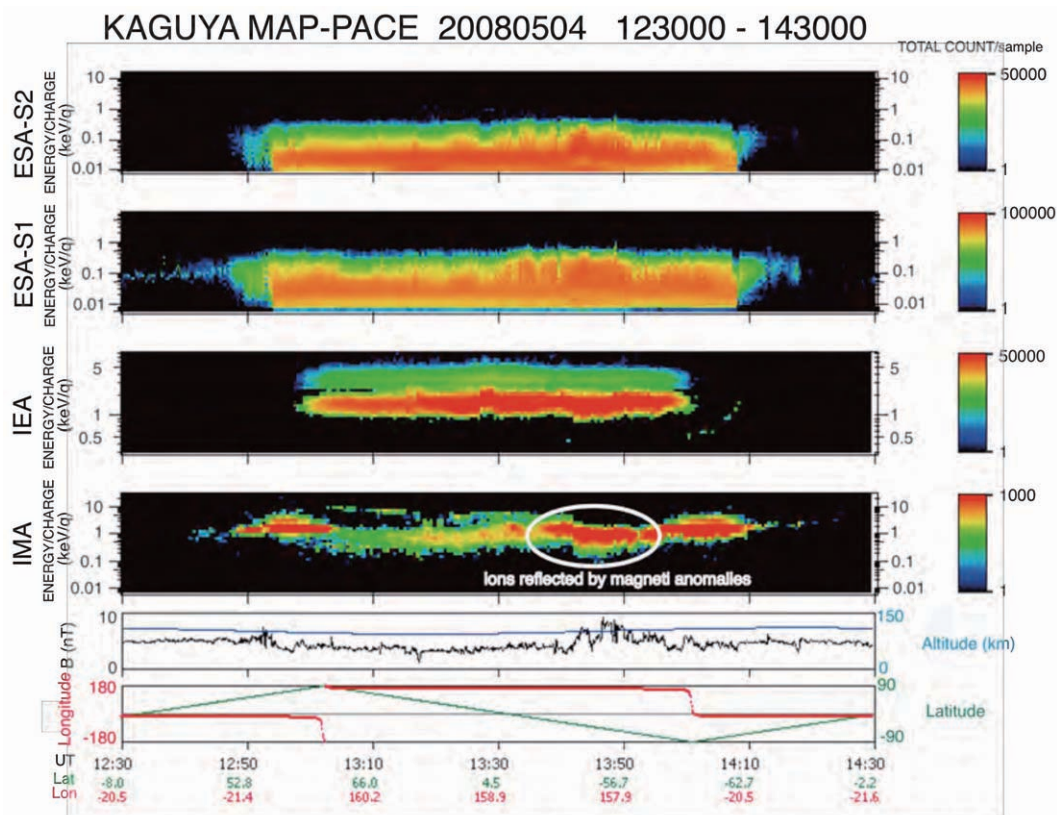


図 6 月面磁気異常による太陽風イオンの反射を示す PACE の E-t 図

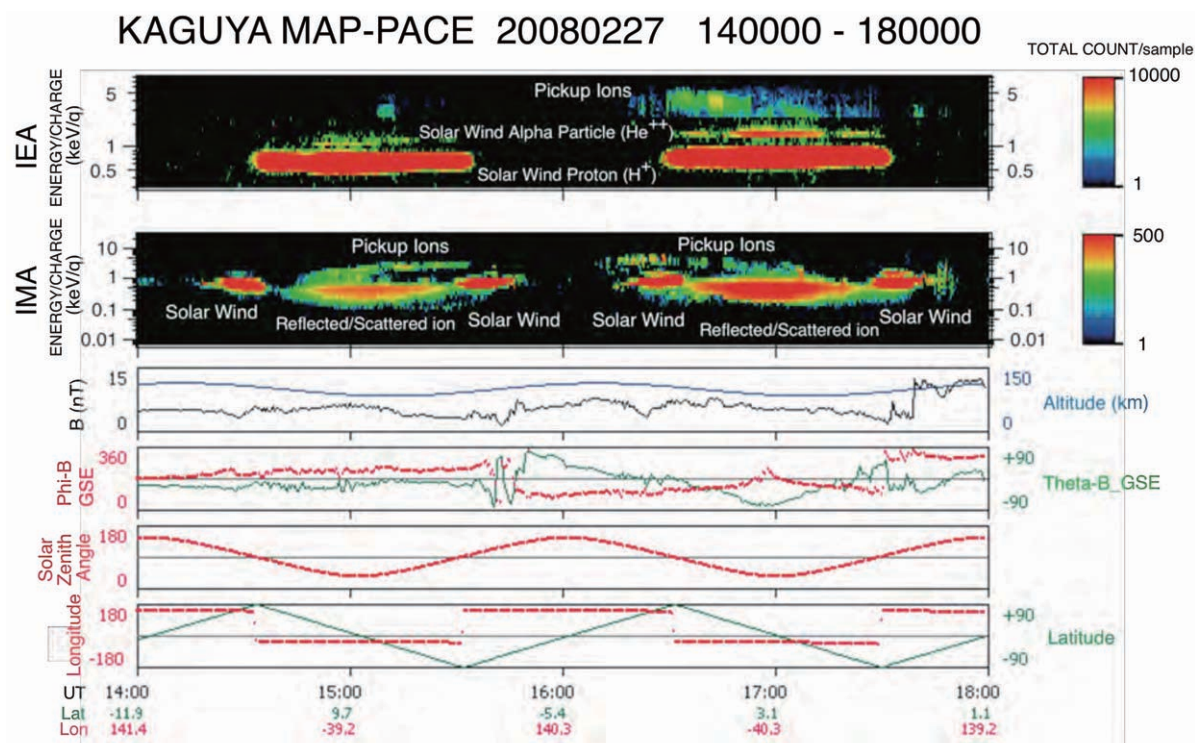


図7 反射／散乱イオンのピックアップを示す IEA 及び IMA の E-t 図

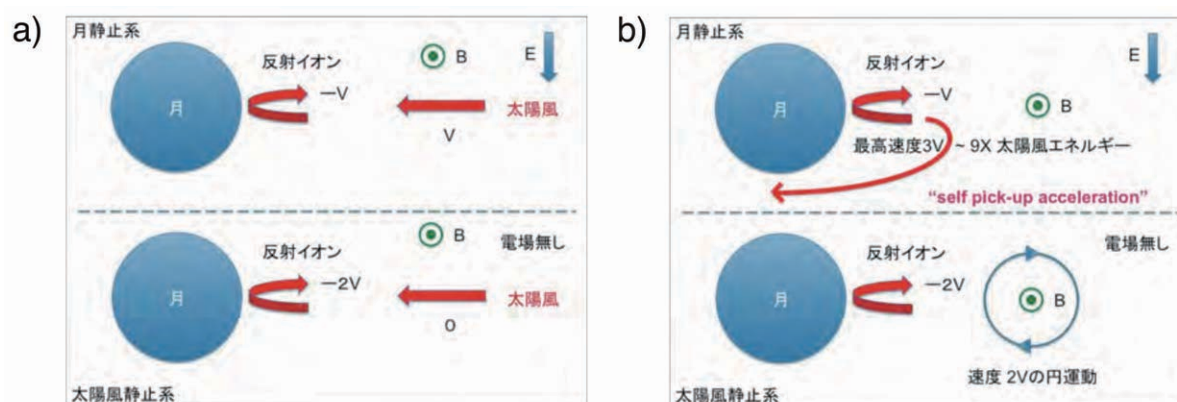


図8 self pick-up ion の生成メカニズム

認できた。図8にこれらのイオンの生成メカニズムを示す。図8(a)に示すように、月静止系から見ると月表面に衝突した太陽風イオンは月面で散乱され、反月面方向に戻される。この時の最大速度は太陽風の速さで、方向が逆向きである。これを太陽風静止系で観測すると、太陽風の2倍の速さで月面からイオンが飛来する。太陽風静止系では電場は存在しないため、月面で反射／散乱されたイオンは太陽風中の磁場の周りを最大で太陽風速度の2倍でジャイロ運動することになる。この運動を月静止系で観測すると、太陽風の速度が加算されるため、最大で太陽風の3倍の速さで運動することになる。従ってエネルギーにすると、最大で太陽風の9倍のエネルギーとなる。実際に観測されたエネルギーの最大値は太陽風プロトンのエネルギーの約6倍であり説明可能な範囲である。彗星の周辺では、彗星起源の中性粒子が太陽光によって電離され、太陽風中の電場でピックアップ加速されるという現象が観測されている [Mukai *et al.*, 1986; Coates, 2004]。これらのイオンの最大の加速速度は太陽風速度の2倍であることが知られている。今回月周辺で観測された加速イオンの場合には、月面で太陽風プロトンが反射／散乱された時点で初速度をもっていることから、彗星の周りで観測されるピックアップイオンよりも高い速度まで加速されることになる。もともとは太陽風イオンであったものが、月面での反射／散乱という付加的なプロセスを経て太陽風にピックアップされて加速されるという意味でこの新たに観測されたイオンの加速現象を self pick-up acceleration と名付けることにした [Saito *et al.*, 2008 b]。

4.5. 月表面／月大気起源イオン

月周辺には希薄なアルカリ大気が存在する事が、地上からの光学観測で知られている [Potter and Morgan 1988; Tyler *et al.*, 1988]. これらのアルカリ大気の生成に関して、太陽風のスパッタリングあるいは太陽光による光脱離、微小隕石の衝突によるなどいくつかのメカニズムが提唱されて来た。生成された中性粒子は、太陽光によって電離されイオンとなる他、太陽風のスパッタリングや太陽光による光脱離などではイオンも直接放出される。生成／放出されたイオンは、太陽風中の電場によって加速されて IMA で観測されるはずである。「かぐや」による低エネルギーイオンの観測データが得られる前まではこれらはただの推測に過ぎなかったが、IMA は月表面／月大気起源のイオンの直接観測に初めて成功した。図 9 に IMA が観測した月表面／月大気起源のイオンの例を示す。「かぐや」が北極から南極へと移動するに従い、北半球で極から赤道に移動するにつれてエネルギーが増加する、低いエネルギーのイオンが観測された。これらのイオンは南半球では観測されていない。また、この低エネルギーイオンが観測された時の磁場データを見ると、太陽風中の電場が北向きであった事がわかる。図 10 にこれらのイオンの質量プロファイルを示す。図 10(a) は縦軸がエネルギー／電荷、横軸がイオンの飛行時間であり、このイオンの飛行時間がイオンの質量に対応する。図 10(b) は各飛行時間におけるカウントをプロットしたものであり、飛行時間とイオン種との対応も併せて示した。これらのイオンの質量プロファイルを見ると、 C^+ 、 O^+ や Na^+/Mg^+ 、 K^+/Ar^+ などの重いイオンが含まれている。図 11 にこれらのイオンが観測される様子を模式的に示す。月表面／月大気起源のイオンは北向きの太陽風中の電場によって加速されるが、極から赤道に近づくにしたがって加速される距離が増えるためエネルギーが高くなる。一方、南半球では電場の向きが月面方向であるため生成されたイオンは「かぐや」まで到達しない。今後、IMA が検出したイオン種と、イオンが生成された月面位置との関係を詳細に調べる事で月面組成についての情報が得られるものと期待できる。

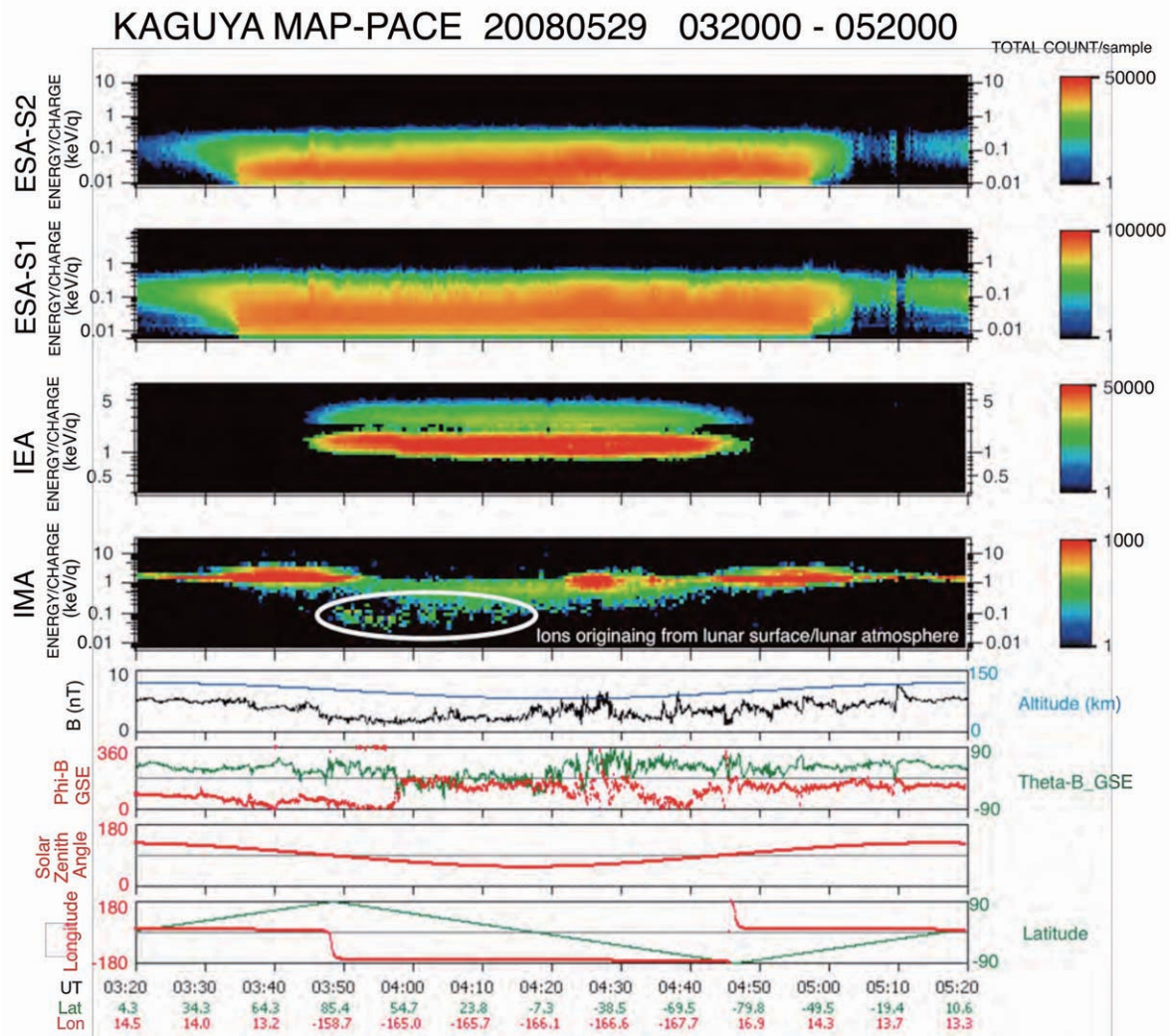


図9 月表面／月大気起源のイオンが観測された時の PACE の E-t 図

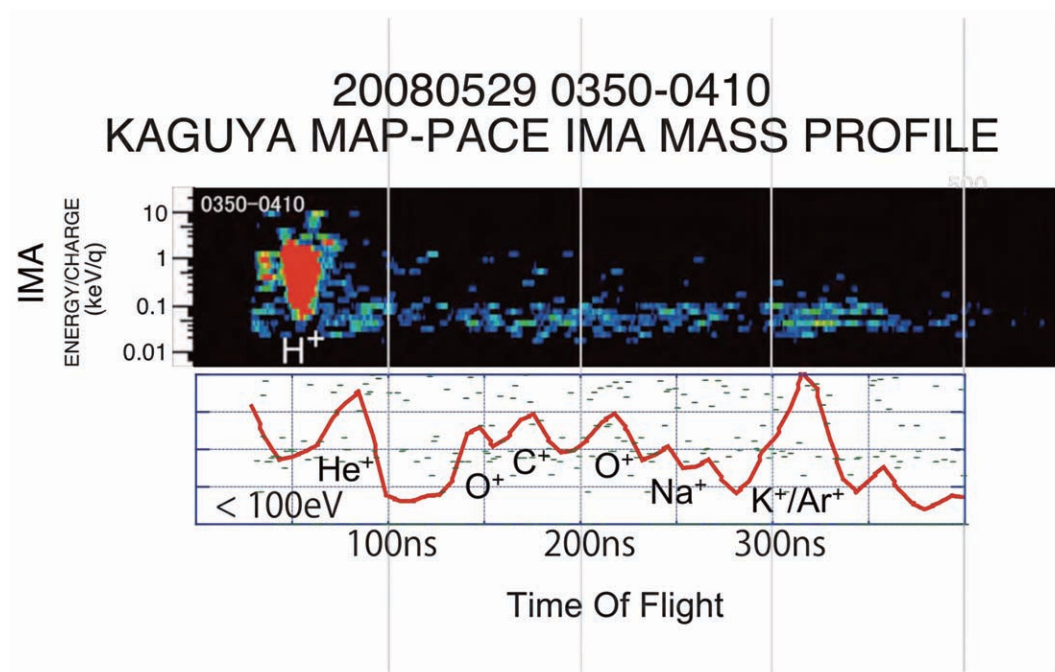


図10 月表面／月大気起源イオンの質量プロファイル

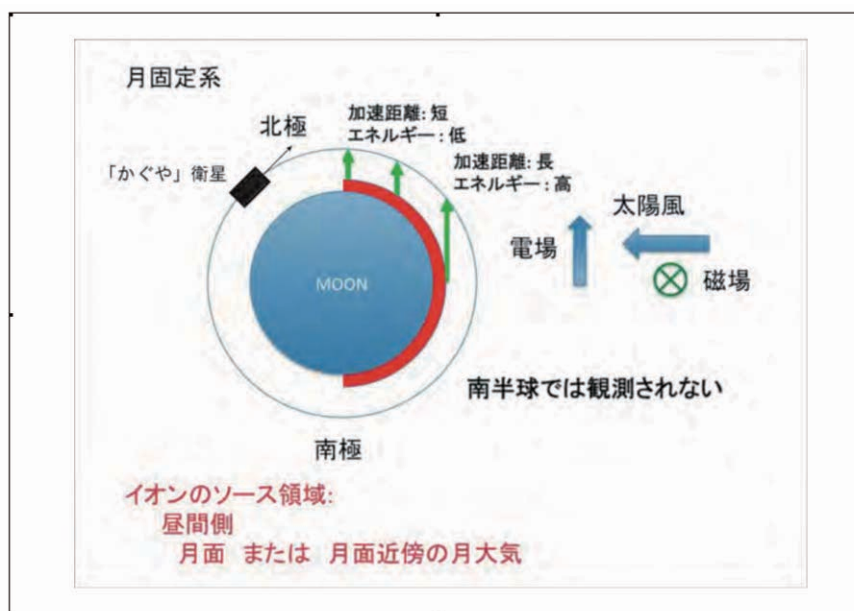


図11 月表面／月大気起源のイオンの加速

5. ま と め

「かぐや」衛星搭載 MAP-PACE が高度 100 km の月周回軌道で低エネルギーイオンの連続観測を開始して以来 1 年が経過したがこの間、MAP-PACE-IEA, IMA の観測で月周辺低エネルギーイオンの分布が初めて明らかとなった。特に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 100 km の月周回軌道でこれまで観測された事の無かったイオンの質量分析を行った。その結果、太陽風を別にして、低エネルギーイオンの分布は次の 4 種類の特徴的な分布に大別できることがわかった。1) 月表面で反射／散乱された太陽風プロトン 2) 月面磁気異常によって反射された太陽風イオン 3) 月面で反射／散乱されたイオンが太陽風中の電場によってピックアップされ、加速されたもの 4) 月面／月面近傍の月大気を起源とするイオン。今後「かぐや」は 50 km に高度を下げてミッション終了まで観測を行うが、100 km 高度よりも磁気異常に近づくため、磁気異常と太陽風の相互作用の解明を進めるのに有用なデータが取得できるものと期

待している。

References

- [1] Anderson, K.A., L. M. Chase, R. P. Lin, J. E. McCoy, and R. E. McGuire, Solar-wind and interplanetary electron measurements on the Apollo 15 subsatellite, *J. Geophys. Res.*, 77, 4611, 1972.
- [2] Clay, D.R., B. E. Goldstein, M. Neugebauer, and C. W. Snyder, Solar-wind spectrometer experiment, Apollo 15 Preliminary Science Report, *NASA Spec. Publ.*, 289, 10–1, 1972.
- [3] Coates, A. J., Ion pickup at comets, *Adv. Space Res.*, 33, 1977, 2004.
- [4] Colburn, D. S., R. G. Currie, J. D. Mihalov, and C. P. Sonett, Diamagnetic solar-wind cavity discovered behind Moon, *Science*, 158, 1040, 1967.
- [5] Hills, H. K., J. C. Meister, R. R. Vondrak, and J. W. Freeman, Jr, Suprathermal ion detector experiment, Apollo 15 Preliminary Science Report, *NASA Spec. Publ.*, 289, 12–1, 1972.
- [6] Halekas, J.S., S.D. Bale, D.L. Mitchell, and R.P. Lin, Electrons and magnetic fields in the lunar plasma wake, *J. Geophys. Res.*, 110, A 07222, doi: 10.1029/2004 JA 010991, 2005.
- [7] Halekas, J.S., G.T. Delory, D.A. Brain, R.P. Lin, M.O. Fillingim, C.O. Lee, R.A. Mewaldt, T.J. Stubbs, W.M. Farrell, and M.K. Hudson, Extreme lunar surface charging during solar energetic particle events, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L 02111, doi: 10.1029/2006 GL 028517, 2007.
- [8] Halekas, J.S., G.T. Delory, R.P. Lin, T.J. Stubbs, and W.M. Farrell, Lunar Prospector observations of the electrostatic potential of the lunar surface and its response to incident currents, *J. Geophys. Res.*, 113, A 09102, doi: 10.1029/2008 JA 013194, 2008.
- [9] Halekas, J.S., G.T. Delory, R.P. Lin, T.J. Stubbs, and W.M. Farrell, Lunar Prospector measurements of secondary electron emission from lunar regolith, *Planet. Space. Sci.*, 57, 78–82, doi: 10.1016/j.pss.2008.11.2009, 2009.
- [10] Howe, H.C., R. P. Lin, R. E. McGuire, and K. A. Anderson, Energetic Electron Scattering from the Lunar Remanent Magnetic Field, *Geophys. Res. Lett.*, 1, 101, 1974.
- [11] Lin, R.P., D. L. Mitchell, D. W. Curtis, K. A. Anderson, C. W. Carlson, J. McFadden, M. H. Acuna, L. L. Hood, and A. Binder, Lunar surface remnant magnetic fields detected by the electron reflection method, *Science* 281, 1480, 1998.
- [12] Lyon, E.F., H. S. Bridge, and J. H. Binsack, Explorer 35 plasma measurements in the vicinity of the Moon, *J. Geophys. Res.*, 72, 6113, 1967.
- [13] Mukai, T., W. Miyake, T. Terasawa, M. Kitayama, and K. Hirao, Plasma observation by Suisei of solar wind interaction with comet Halley, *Nature*, 321, 299, 1986.
- [14] Neugebauer, M., C. W. Snyder, D. R. Clay, and B. E. Goldstein, Solar wind observations on the lunar surface with the Apollo-12 ALSEP, *Planet. Space Sci.*, 20, 1577, 1972.
- [15] Potter, A. E. and T. H. Morgan, Variation of lunar sodium emission intensity with phase angle, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2263, 1994.
- [16] Saito Y., S. Yokota, K. Asamura, T. Tanaka, R. Akiba, M. Fujimoto, H. Hasegawa, H. Hayakawa, M. Hirahara, M. Hoshino, S. Machida, T. Mukai, T. Nagai, T. Nagatsuma, M. Nakamura, K. Oyama, E. Sagawa, S. Sasaki, K. Seki, T. Terasawa, Low energy charged particle measurement by MAP-PACE onboard SELENE, *Earth Planets and Space*, 60, 4, 375–386, 2008 a.
- [17] Saito Y., S. Yokota, T. Tanaka, K. Asamura, M. N. Nishino, M. Fujimoto, H. Tsunakawa, H. Shibuya, M. Matsushima, H. Shimizu, F. Takahashi, T. Mukai, and T. Terasawa, Solar wind proton reflection at the lunar surface: Low energy ion measurement by MAP-PACE onboard SELENE (KAGUYA), *Geophys. Res. Lett.*, 35, L 24205, doi: 10.1029/2008 GL 036077, 2008 b.
- [18] Souda R., Yamamoto K., Hayami W., Aizawa T. and Ishizawa Y., Low-energy H^+ , He^+ , N^+ , O^+ , and Ne^+ scattering from metal and ionic-compound surfaces: Neutralization and electronic excitation, *Phys. Rev. B*, 51, 4463, 1995.
- [19] Shimizu, H., F. Takahashi, N. Horii, A. Matsuoka, M. Matsushima, H. Shibuya, H. Tsunakawa, Ground calibration of the high-sensitivity SELENE lunar magnetometer LMAG, *Earth Planets Space*, 60, 353, 2008.
- [20] Tyler, A. L., W. H. Kozlowski, and D. M. Hunten, Observations of sodium in the tenuous lunar atmosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 15, 1141, 1988.
- [21] Yokota S., Y. Saito, K. Asamura, and T. Mukai, Development of an ion energy mass spectrometer for application on board three-axis stabilized spacecraft, *Rev. Sci. Instrum.*, 76, 014501-1-014501-8, 2005.