

# 特集「かぐや」が見た新“月世界” 「かぐや」MAPが明らかにする 月ウェイク領域の現象

西野 真木<sup>1</sup>, 齋藤 義文<sup>1</sup>, 横田 勝一郎<sup>1</sup>, 浅村 和史<sup>1</sup>, 田中 孝明<sup>1,2</sup>,  
綱川 秀夫<sup>3</sup>, 渋谷 秀敏<sup>4</sup>, 松島 政貴<sup>3</sup>, 清水 久芳<sup>5</sup>, 高橋 太<sup>3</sup>  
「かぐや」MAPチーム

(要旨) 月は8割以上の時間を太陽風中で過ごす, その際に夜側にウェイクと呼ばれる真空に近い領域が形成される. 太陽風の電子は一部が夜側の月面に到達できるが, イオンは熱速度が太陽風速度と比較して圧倒的に遅いためウェイク側の月面には到達できないと考えられている. ところが今回, 月周回衛星「かぐや」に搭載されたプラズマ・磁場観測装置(MAP)は, 月の真夜中側100km高度のほぼ中央部分(太陽直下点の反対側付近の低緯度領域)で太陽風起源とみられるイオンを観測した. これらのイオンは一部が夜側の月面から飛来しており, 夜側へと加速された太陽風が月面に衝突して反射したものを観測したと考えられる. また, ウェイク境界で太陽風イオンが夜側へ向かって加速される現場も観測された. これらの現象は何らかの理由でウェイク境界付近の電場が強まった結果として起きたものと考えられる.

## 1. はじめに

月のような大気も固有磁場も持たない天体の表面とプラズマの相互作用は, 普遍的な現象であるにもかかわらず, 観測データが極めて少ないためにほとんど理解されていない. 太陽風の高速なプラズマや磁気圏の高温なプラズマは月表面と相互作用することが知られており[1-4], これらを理解するためには電子・イオン・磁場を同時に計測することが必要である. 過去の月周辺探査では主として電子と磁場の計測が行われてきたが, これらにイオンも加えた総合的な解析は長年の懸案事項であった[2]. 今回我々のグループでは, 月周回衛星「かぐや」(SELENE)にプラズマ・磁場観測装置MAP(プラズマ観測装置PACEおよび月磁場観測装置LMAGから構成される)を搭載し, 月周辺のプラズマ環境の調査を開始したところである[5-7].

MAPの代表的な科学目標としては次のものが挙げられる.

### (1) 太陽風と月面の相互作用の解明

- (2) 月面の磁気異常観測および成因推定
  - (3) スパッタリングイオンの観測に基づく希薄大気の成因推定
  - (4) 磁気圏プラズマと月面の相互作用の解明
- 等である. 今回は, (1)の太陽風と月面の相互作用に関して, 月の夜側で新たに見つかった興味深い現象をご紹介します.

## 2. 観測機器の概要

「かぐや」搭載のプラズマ・磁場観測装置MAPは, プラズマ観測装置PACEおよび月磁場観測装置LMAGから構成されている. プラズマ観測装置PACEは電子計測器(ESA1, ESA2)とイオン計測器(IEA, IMA)から構成されており, それぞれが月面側(ESA1, IMA)と半月面側(ESA2, IEA)に半球状の視野を持つことで立体角 $4\pi$ の観測が可能である. これらのうち, イオ

表1. PACEの各センサーの性能.

計測器	観測対象	視野	測定エネルギー帯
ESA2	電子	反月面側	5eV - 10keV
ESA1	電子	月面側	5eV - 15keV
IEA	イオン	反月面側	5eV/q - 28keV/q
IMA	イオン (質量分析可能)	月面側	5eV/q - 28keV/q

1. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部  
2. 東京大学大学院理学系研究科  
3. 東京工業大学大学院理工学研究科  
4. 熊本大学大学院自然科学研究科  
5. 東京大学地震研究所

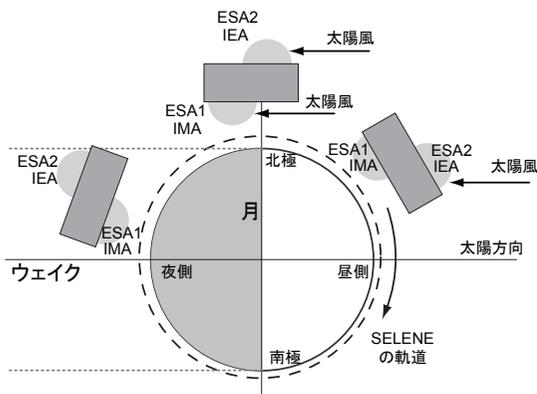


図1: 「かぐや」軌道の模式図およびPACE各センサーの視野の関係。右側が太陽方向であり, 太陽風の向きは赤い矢印で示してある。

ン観測器は静電型エネルギー分析器であり, 月面側に視野を持つIMAは質量分析を実施するモードも備えている。観測可能なエネルギー帯は, ESA1で $5\text{eV} - 10\text{keV}$ , ESA2で $5\text{eV} - 15\text{keV}$ , IEAとIMAで $5\text{eV}/q - 28\text{keV}/q$ であり, 月周辺の典型的な熱的プラズマを観測できる(PACE各センサーの性能は表1にまとめた)。また, 磁場計測器LMAGは $32\text{Hz}$ という高い時間分解能で磁場3成分を測定することができ, 衛星本体の電流が作る磁場の影響を避けるために長さ $12\text{m}$ のマストの先端部分に取り付けられている。

本稿で用いるデータを取得したとき(2008年4月4日)には「かぐや」は月面からの高度約 $100\text{km}$ の極軌道を約2時間周期で飛行しており, 軌道面は真昼と真夜中を結ぶ子午面にほぼ一致していた。なお, イオン計測器の視野が広いので, 北極と南極付近ではIEAとIMAの双方で太陽風を観測することができる(図1)。

## 3. 観測

### 3.1 太陽風とウエイク

地球付近の宇宙空間は太陽から吹き出た高速プラズマ流である太陽風に満たされているが, 月も8割以上の時間帯は地球磁気圏の外側にあり, この太陽風に晒される。太陽風は毎秒約 $400\text{km}$ という高速で流れているため, 月の夜側には太陽風が流れ込むことが出来ず, ほぼ真空の領域(これをウエイクと呼ぶ)が形成されることが知られてきた[8-9]。より正確には, 月の夜側へ

は電子のほうが侵入しやすい。その理由は, 太陽風のイオンと電子の温度は同程度(数 $\text{eV}$ 程度)であるが熱速度が異なるためである。つまり

電子の熱速度 $>$ 太陽風の流速 $>$ イオンの熱速度という関係があり, 質量の軽い電子はイオンに比べて高速であるために月の夜側へ侵入しやすい。「かぐや」搭載MAPが観測した多くのデータも, ウエイクに太陽風起源の電子が磁場に沿って侵入していることを示しており, ウエイク環境は過去の観測[4]で知られている通りであると思われた。

### 3.2 ウエイクでのイオン・電子観測

ところが, 2008年4月4日に, MAPはウエイクのほぼ中央部分(緯度 $10$ 度以内の低緯度領域)でイオンを観測した。図2に $16:00$ (時刻はすべて世界時)から $20:00$ のMAP観測データを示す。この4時間の間に「かぐや」は月を2周し, 2度にわたって夜側に滞在した。ウエイクの観測期間は,  $16:30$ 頃から $17:15$ 頃, および,  $18:30$ 頃から $19:15$ 頃までの期間である。図2のIMA(月面側の半球を視野とする)のパネル(上から4番目)を見ると,  $16:50$ 頃と $18:45$ 頃にイオンを検出していることが分かる。この時のイオンの速度分布関数を解析し, イオンを検出したセンサーの視野方向を調べた結果, このイオンが確かに月面側から飛来していることが分かった。このとき, 同時に電子も観測されているが(図2参照), センサーの視野を調べるとこれらの電子は磁力線に沿う成分が多いことが分かった。したがって, これらの電子は通常のウエイクの場合と同様に磁力線に沿って太陽風から供給されたものと考えられる(電子とイオンは飛来方向が異なっている)。

この観測は, 本来はイオンが存在しないはずのウエイクに向かって月面からイオンが飛来したことを示している。さらに驚くべきことに, このイオンには太陽風の2倍程度の運動エネルギーを持つ成分があることも分かった(図2の $16:50$ 頃のデータで顕著である)。これらの観測事実を説明するために, 我々は次のような仮説を立てた。すなわち,

- (1) ウエイク境界面付近の強い電場によって太陽風イオンが加速されながら夜側へ回り込む。
  - (2) 回り込んだイオンが月面に衝突し, 月面で反射したイオンを「かぐや」が観測する
- という考えである。特に太陽風とウエイクの境界付近

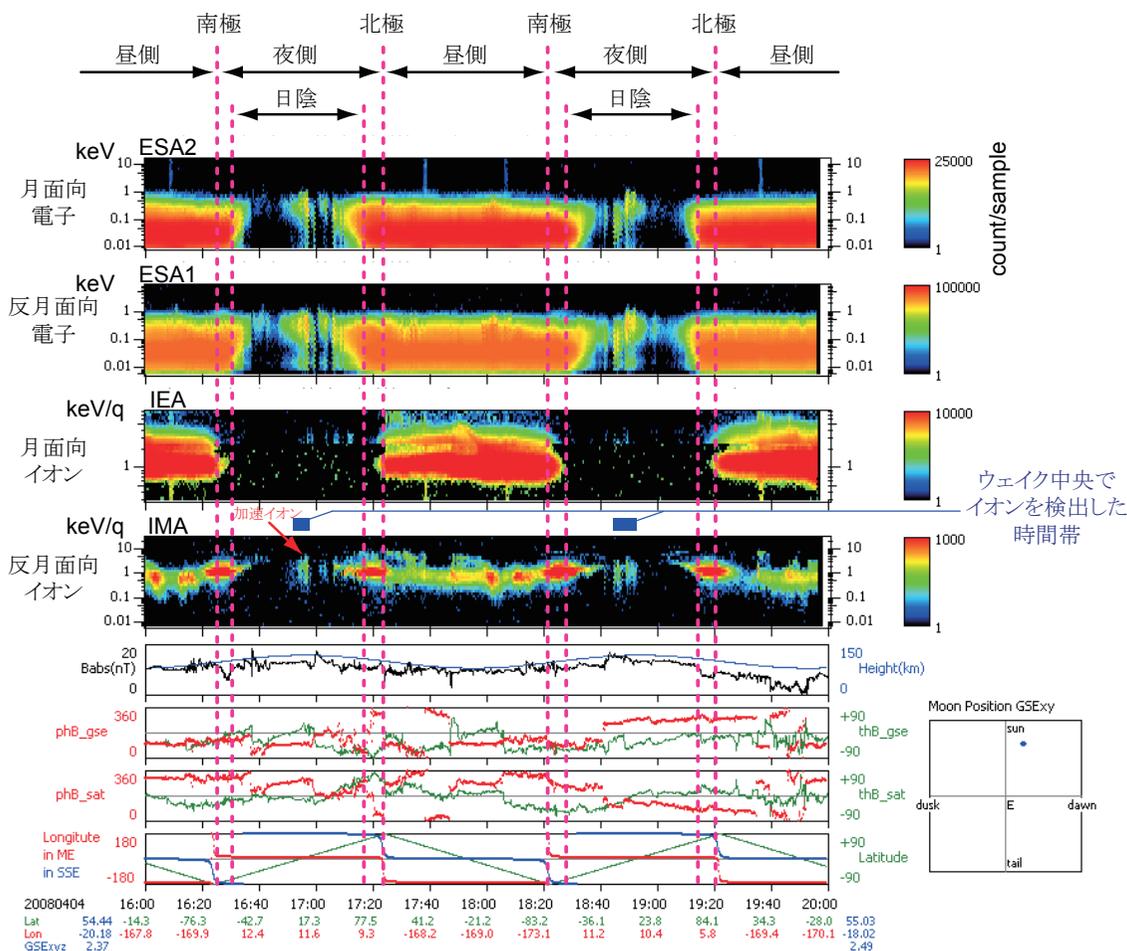


図2：2008年4月4日16:00(世界時)から20(世界時)までのMAP観測データ。上から順に、ESA2(電子)、ESA1(電子)、IEA(イオン)、IMA(イオン)の各エネルギー・時刻ダイアグラム、磁場絶対値と衛星高度、極座標系での磁場(GSE系および衛星座標系)、衛星の位置(MEおよびSSE座標系)を示している。右下のパネルは北から見た月の位置を示している。月は地球から見てほぼ太陽方向に位置していた。

でのイオン加速は「かぐや」MAPによって観測可能なはずであり、そのようなデータを探してみることにした。すると、16:50頃に月面から飛来するイオンを観測する直前に、「かぐや」はイオン加速の現場を観測することに成功していた(図3)。16:30頃から16:40頃にかけて、IMA(図3の上から4番目のパネル)で観測された太陽風起源のイオン(陽子)のエネルギーが徐々に高くなっている。イオン速度分布関数の解析から、太陽風中で1.1keV程度だったイオンは月の夜側へ向かうにつれて4keV程度にまで加速されていることが分かった。このことは、ウェイク境界の強い電場によって太陽風イオンが月の夜側へ向かって加速されることを示しており、加速されたイオンが夜側の月面に衝突

した後に「かぐや」によって捉えられたとすれば一連の観測を説明することができる。なお、観測された反射イオンのフラックスは太陽風フラックスの約1%程度であり、月面衝突によるロスを考慮すれば妥当な値であろう。

また、ウェイク境界付近の電子のデータも太陽風からの電子侵入を示している。すなわち、図3で16:30から16:36頃にかけて、太陽風領域から夜側へ入るにつれて低エネルギー電子が減少している。これは、エネルギーの比較的高い電子(100eVから1keV程度)は速度が大きいため夜側まで容易に侵入するが、エネルギーの低い電子(100eV以下)は「かぐや」高度では夜側へ侵入しにくいことを示している。逆に言えば、こ

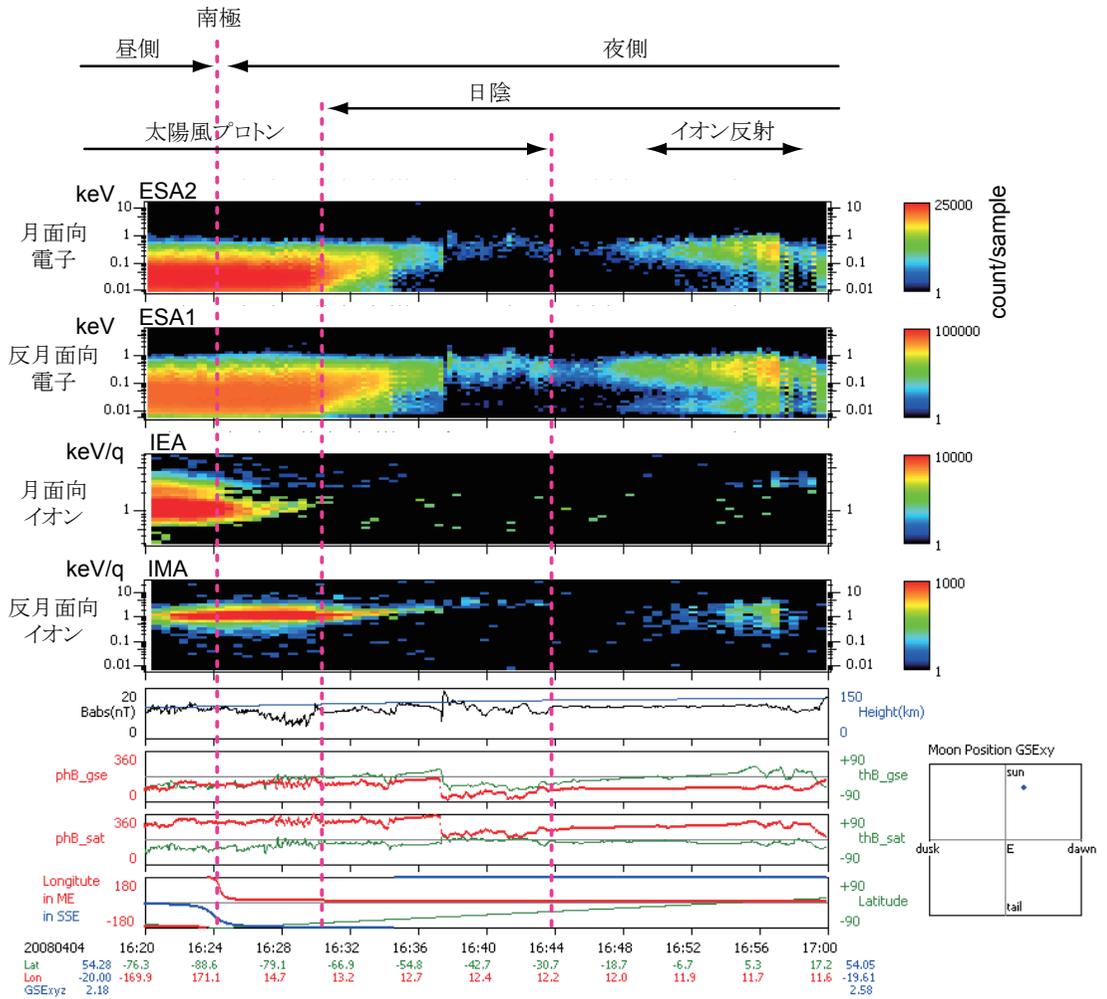


図3：2008年4月4日16:20(世界時)から17:40(世界時)までのMAP観測データ。16:30から16:40頃にかけて、太陽風から夜側へ向かって加速されるイオンをIMAが観測した。

のときにはエネルギーの高い電子が「かぐや」高度でウエイク境界を横切って夜側に侵入していたということであり、この電子によってウエイク境界の電場が強められた可能性がある。

上記の観測で得られた知見を図4に模式的に示した。すなわち、(a)通常のウエイクでは熱速度の速い電子が夜側に侵入しやすい。ウエイク境界付近に電場は形成されるものの、その電場によって太陽風イオンが月の夜側に届くほど軌道が曲げられることはない。(b)特に電場が強い状況下では太陽風イオンが月の夜側に向かって加速され、月面に衝突するに至る。

この電場形成は月の夜側への電子供給量と関連して

いるものと考えられるため、太陽風磁場の向きや太陽風電子のエネルギー分布などを今後詳細に調べる予定である。

#### 4. まとめ

太陽風中で月の夜側に形成されるウエイクは、通常はイオンが入り込むことはできないため電子が過剰な状態になりやすく、そのためウエイク境界付近で電場が生じる。この電場が特に強い場合には加速されたイオンも夜側に侵入することができ、夜側の月面に衝突し反射する成分も存在する。このような荷電粒子の加

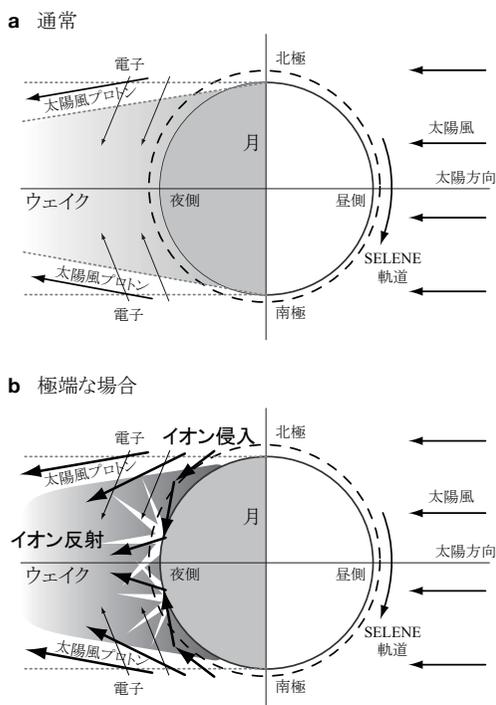


図4：(a)通常のウェイク領域と(b)イオン侵入が起きたウェイク領域の模式図。太陽風は右から左へと流れている。

速や衝突は、固有磁場も厚い大気も持たない天体と恒星風(我々の太陽系であれば太陽風)との間では普遍的に起きている現象であると考えられる。我々は「かぐや」の観測データをさらに詳しく調べ、夜側のイオンも含めて月プラズマ環境の全容に迫るとともに、普遍的な宇宙プラズマ現象としても捉えていきたいと考えている。

### 参考文献

[1] Criswell D. R. (1973) *The Moon* 7, 202-238.  
 [2] Lin R. P. et al. (1998) *Science* 281, 1480-1484.  
 [3] Halekas J. S. et al. (2001) *Geophys. Res. Lett.* 29, 1435, 10.1029/2001GL014428.  
 [4] Halekas J. S. et al. (2005) *Geophys. Res. Lett.* 32, L09102, doi:10.1029/2005GL022627.  
 [5] Saito Y. et al. (2008) *Earth Planets Space* 60, 375-385.  
 [6] Shimizu H. et al. (2008) *Earth Planets Space* 60, 353-363.

[7] 「かぐや」ホームページ [http://www.selene.jaxa.jp/index\\_j.htm](http://www.selene.jaxa.jp/index_j.htm)  
 [8] Bosqued J. M. et al. (1996) *Geophys. Res. Lett.* 23, 1259-1262.  
 [9] Ogilvie K. W. et al. (1996) *Geophys. Res. Lett.* 23, 1255-1258.