

惑星探査における極端紫外光リモートセンシング技術 —Planet-B/XUVの月面アルベドによる機上校正—

解析研究本部

ADEOS-II 解析研究プロジェクトグループ

塩 見 慶

1. はじめに

我が国初の火星探査機Planet-B（のぞみ）に搭載された極端紫外光撮像器（XUV：eXtreme UltraViolet scanner）は、希薄なプラズマ大気が散乱する微弱な極端紫外光を検出するセンサであり、ロケット観測などで試行されてきた技術を衛星に初めて搭載したものである。従来、プラズマの観測手法は、粒子観測に代表されるように衛星が飛翔している場所における「その場観測」が主であった。ところが、XUVのようにプラズマからの散乱光を利用した「リモートセンシング観測」により、プラズマのグローバルな観測を行うことが可能となった。

XUVは、火星大気に存在するヘリウム原子、ヘリウムイオンの散乱光を撮像観測することで、地球と異なり固有磁場を持たない火星における、大気と太陽風との相互作用を解明することを目的としている。また、これまで未知量となっている、火星大気中のヘリウム量を測定することは大きな意味をもつ。惑星に存在するヘリウムは、惑星内部に存在するウランやトリウムといった放射性元素の壊変によって生成される。しかし、相当量のヘリウムが大気中に放出されるには地球で起こっているような火山活動や水循環のような地殻活動が必要であると考えられる。XUVの観測により、火星における脱ガス機構の解明、火星内部で起こっている地殻活動の可能性について言及されることが期待される¹⁾。

Planet-Bは1998年7月、鹿児島宇宙空間観測所から打ち上げられ、地球と月のスイングバイを利用して火星に向けて巡航しており、2004年初めには火星周回軌道に投入される。XUVの初期成果として、Planet-Bが地球周回にある間、地球プラズマ圏（地球の磁力線が閉じた領域）に存在するヘリウムイオンからの光を観測することに成功し、このプラズマ撮像技術が磁気嵐などを予測する宇宙天気予報に応用できることを証明した²⁾。

また、地球周回では、月が太陽光を反射する極端紫外光アルベドの観測も行った。その観測を利用してセンサの機上校正を行うことに成功した。極端紫外光は、通常物質や光学的に厚い大気には吸収されてしまう性質がある。それゆえに、打ち上げ前における、実験室での校正以後、センサの校正は困難である。打ち上げ後の校正モードを持たないXUVにとって、月の観測が機上校正の絶好の機会となる³⁾。

2. XUVセンサ特性

開発されたXUVは、火星大気に存在するヘリウム原子、ヘリウムイオンの太陽共鳴散乱光（それぞれ58.4nm、30.4nm）を検出するように設計されている⁴⁾。共鳴散乱現象とは、図2に示すように、大気中のヘリウム原子やヘリウムイオンが、太陽極端紫外光の特定波長の光を一度吸収してすぐに同

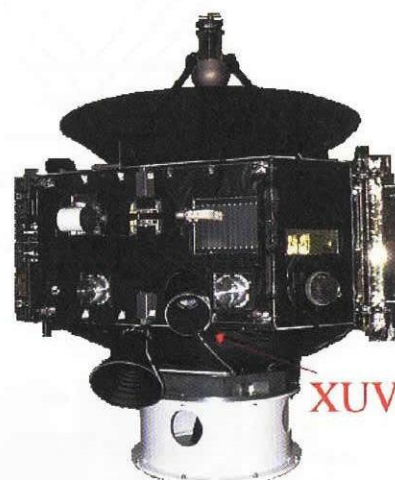


図1 火星探査機Planet-Bと
極端紫外光撮像器（XUV）

じ波長の光を放出する現象である。しかし、この現象確率は低いので散乱光は非常に微弱である。ところが、大気組成を考えると20~100nmの波長域においては、この2波長以外に強い共鳴線は存在しないので、十分に時間積分することによって観測が可能となる。

そこで、極端紫外光領域において、観測波長で特別に高い反射率を得るようにチューニングされた多層膜反射鏡という鏡の開発と、観測波長のバンドパスとなる金属薄膜フィルタの開発により、望遠鏡センサ部が400gという小型軽量化が実現した。

多層膜反射鏡とは、非常に薄い周期的なMo/Siのペア20層から構成される鏡である。極端紫外光はエネルギーが高いため鏡の中に潜り込み、重元素Moの表面で起こる反射の重ね合わせで高い反射率を得ることができる(図3)。反射率特性(図4)が示すように、ヘリウムイオンの共鳴散乱光である30.4nmに反射率のピークが来るように設計されている。

金属薄膜フィルタは、アルミニウムの薄膜に半分だけカーボンが蒸着されたフィルタで、検出器の直前に配置されている(図5)。2分割されているのは、2つのチャンネル、狭波長域チャンネル(AI/C)と広波長域チャンネル(AI)に対応し、それらの透過率特性を図6に示す。観測波長より短波長の軟X

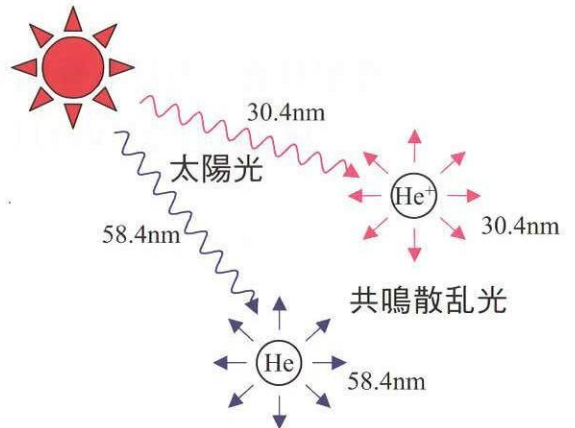


図2 プラズマ大気の共鳴散乱現

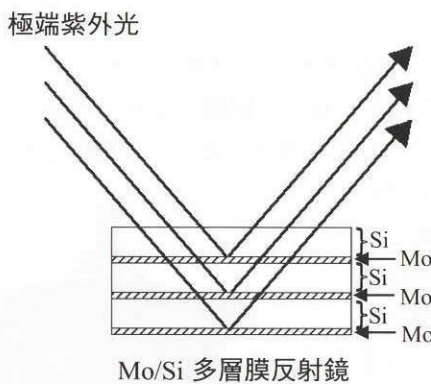


図3 多層膜反射鏡の反射原理

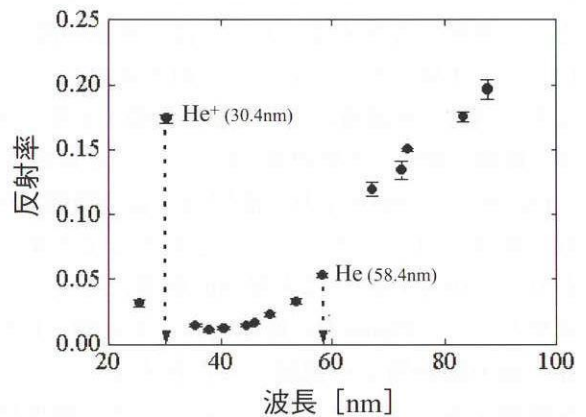


図4 多層膜反射鏡の反射率

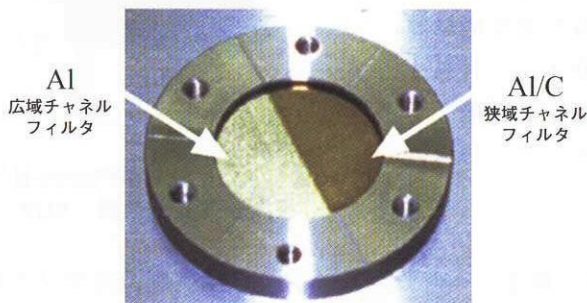


図5 金属薄膜フィルタ

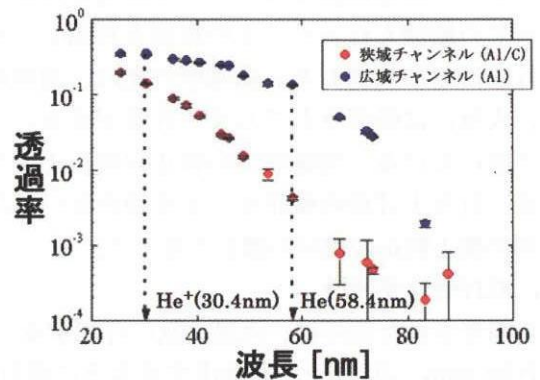


図6 金属膜薄フィルタの透過率

線、長波長の遠紫外線を除去することにより、極端紫外光領域においてバンドパスの働きをする。フィルタの厚みは、火星におけるヘリウムの散乱強度を想定して設計されている。

3. 月面極端紫外光アルベド観測による機上較正

1998年9月7日～8日にかけてXUVが月面アルベドの観測を行った。観測時の衛星一月間の距離は地球半径の約80倍であり、月は空間分解能よりも十分に小さかった。図7に観測の時系列を色表示で示す。サンプル軸はスキャン方向に、時間軸は衛星の移動方向に対応する。矢印で示されたサンプルに月からの極端紫外光を検出している。

観測時の、衛星の位置と姿勢情報からXUVの視野を計算し、視野内を月がどのように通過していったかを示したのが図8である。XUVの視野は長円形をしており、図中の赤色で示されたサンプル8を月が通過していったことになる。これは、図7の観測結果と一致している。しかし、衛星の位置と姿勢から計算される観測時間は9/7 14:15～9/8 10:00となるが、実際の観測ではそれよりも若干早い時刻から月が視野に入っていることが図7から解る。この観測において、月の視直径はXUVの視野の約1/10であり点光源として扱うことができる。つまり、観測時間から、視野の大きさが較正されると同時に、カウントの大きさから、センサ全体の検出効率を較正することが可能である。

月からの光は非常に微弱なため、観測データを400スピン平均(41.2sec積算)して較正を行った。サンプル8のカウント時系列を図9に示す。図中の計算値は、衛星の位置、姿勢情報、打ち上げ前の性能較正值、そして月面のアルベドを0.2% (スペクトロメータによる過去の観測値⁵⁾)として算出された。計算値と観測値とは時間にずれがある。これは、視野方向がずれていることに起因し、衛星構体へのセンサの取り付け精度の問題であると推察される。そこで、仰角方向に 0.7° 視野をずらしたときの較正值を図9に示す。これにより較正されるこ



図7 月面極端紫外光アルベドの観測 (98/9/7～8)

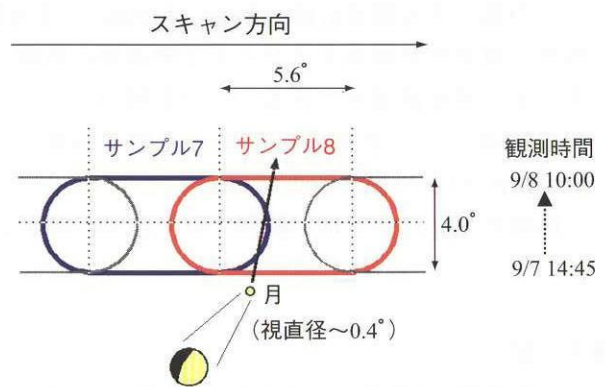


図8 衛星の位置と姿勢情報から計算される観測イメージ

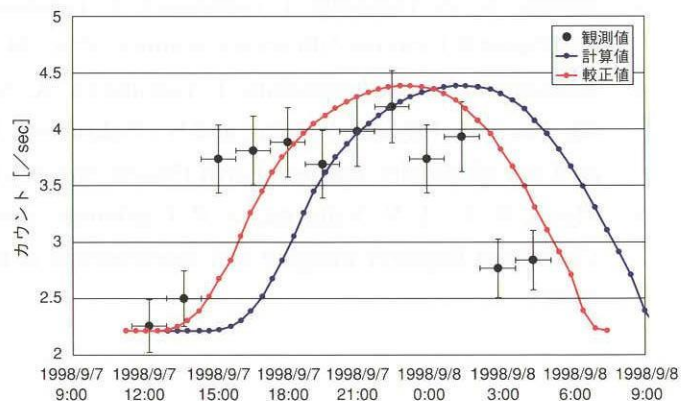


図9 月面アルベド観測による較正結果

とが解る。また、カウントの大きさは非常に良く一致しており、打ち上げ後の検出効率の劣化はないことが解った。

本結果から、極端紫外光センサにおいて、月面アルベドによる較正が可能であり有効であることが証明された。今後、同様なセンサの機上較正にも応用する予定である。

4. 極端紫外光リモートセンシングの展望

Planet-Bは2004年初めに火星に到着し、搭載された13個の科学センサが火星大気の観測を開始する。粒子計測器（中性粒子、イオン）の「その場観測」は近火点における観測で、極端紫外光による「リモートセンシング観測」は遠火点における観測で効力を発揮し、それぞれの長所を生かしての現象解明が期待される。

月周回衛星SELENEにはプラズマイメジャー（UPI）を搭載し、月から地球を観測する。2005年打ち上げ後には、月をプラットフォームとして、地球磁気圏に存在するプラズマのリモートセンシング観測が始まろうとしている。搭載するセンサは、Planet-B/XUVを拡張したもので、口径は2倍で位置検出機能を有する。Planet-Bでは成し得なかった、時間分解能と空間分解能の分離が可能となり、宇宙天気予報へとつながる観測データが得られると期待される。また、較正モードにおいては月面を観測して、明暗境界線やアルベドの観測をすることによって、打ち上げ後の性能評価が可能であると考えられる。

その他、水星探査計画（BepiColombo）、金星探査計画（Planet-C）にも、波長分解能を持ち極端紫外光～遠紫外光領域をカバーする望遠鏡の搭載を計画中である。これまでは、ヘリウムに限定されてきたが、波長領域を広げることで多種のプラズマを観測することができ、ヘリウム以外の惑星起源大気の観測から、惑星内部で起こる地殻活動を知る手掛かりを多角的に得ることができる。また、Planet-B/XUVの機上較正に利用した月のように、大気を持たない天体の観測により、これまでなかった極端紫外光による地形観測にまで観測の幅が広がることが、今後期待される。

参考文献

1. 塩見慶, 山崎敦, 中村正人, 阿部豊, 佐々木晶, 吉川一朗, Helium on Mars, 平成10年度磁気圏・電離圏シンポジウム, 1998.
2. Nakamura, M., I. Yoshikawa, A. Yamazaki, K. Shiomi, Y. Takizawa, M. Hirahara, K. Yamashita, Y. Saito, and W. Miyake, Terrestrial Plasmaspheric Imaging by an Extreme Ultraviolet Scanner on Planet-B, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 141-144, 2000.
3. Shiomi, K., A. Yamazaki, I. Yoshikawa, Y. Takizawa, and M. Nakamura, Post-launch Calibration of the Planet-B Extreme Ultraviolet Scanner, *Proc. 34th Lunar Planet. Sci. Conf.*, no. 1207, 2003.
4. Nakamura, M., K. Yamashita, I. Yoshikawa, K. Shiomi, A. Yamazaki, S. Sasaki, Y. Takizawa, M. Hirahara, W. Miyake, Y. Saito, and S. Chakrabarti, Helium observation in the Martian ionosphere by an X-ray ultraviolet scanner, *Earth Planets Space*, 51, 61-70, 1999.
5. Flynn, B. C., J. V. Vallergha, G. R. Gladstone, and J. Edelman, Lunar reflectivity from Extreme Ultraviolet Explorer imaging and spectroscopy of the full Moon, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3253-3256, 1998.