

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

超小型探査機搭載の極端紫外光観測装置PHOENIXの開発

Development of Ultra-small Imaging Device, PHOENIX,
for Plasmaspheric EUV Radiation

桑原 正輝, 吉岡 和夫, 疋田 伶奈, 村上 豪, 荒尾 昇吾, 吉川 一郎

Masaki KUWABARA, Kazuo YOSHIOKA, Reina HIKIDA, Go MURAKAMI,
Shogo ARAO and Ichiro YOSHIKAWA

2019年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

1	序論	2
2	Plasmaspheric Helium ion Observation by Enhanced New Imager in eXtreme ultraviolet : PHOENIX	3
2.1.	PHOENIX の構成	3
2.2.	多層膜反射鏡	5
2.3.	金属薄膜フィルタ	7
2.4.	マイクロチャンネルプレート (MCP) およびレジスティブアノードエンコーダー (RAE)	9
2.5.	PHOENIX の検出効率	12
3	まとめ / 結論	15
	参考文献	15

超小型探査機搭載の極端紫外光観測装置 PHOENIX の開発

桑原 正輝^{*1}, 吉岡 和夫^{*2}, 疋田 伶奈^{*3}, 村上 豪^{*1}, 荒尾 昇吾^{*3}, 吉川 一朗^{*2}

Development of Ultra-small Imaging Device, PHOENIX, for Plasmaspheric EUV Radiation

Masaki KUWABARA^{*1}, Kazuo YOSHIOKA^{*2}, Reina HIKIDA^{*3}, Go MURAKAMI^{*1},
Shogo ARAO^{*3} and Ichiro YOSHIKAWA^{*2}

ABSTRACT

EQUULEUS (EQUilibrium Lunar-Earth point 6U Spacecraft), which is a JAXA's ultra-small deep space explorer, will be launched by the prototype of NASA's manned rocket, SLS (Space Launch System), as a piggy-back satellite. By using gravity of the sun and the moon, the explorer aims to navigate efficiently to the Earth-moon Lagrangian point with orbital transformation ability that can be realized even in CubeSat which is strictly limited by resources. We are developing the Extreme Ultra Violet (EUV) imaging device, which is named PHOENIX (Plasmaspheric Helium ion Observation by Enhanced New Imager in eXtreme ultraviolet) and will be installed in EQUULEUS. From the Earth-Moon Lagrangian point, PHOENIX will obtain the distribution of emission from He ions (at a wavelength of 30.4 nm) spreading in the Earth's plasmasphere in one flame. By continuous and long-term imaging, we aim for a comprehensive understanding of dynamic picture of the plasmasphere. PHOENIX has an optical system composed of a multilayer reflecting mirror, a metallic thin filter and a two-dimensional position detector, and each performance affects the possibility of its succeeding in the observation. The size of the spacecraft is 6U (10 × 20 × 30 cm) which is extremely small, so the enveloping area given to the instrument is also very narrow (7 × 10 × 10 cm). The reduction in the light collection efficiency due to the miniaturization of the main mirror would be highly important problem when installing the EUV imager in the ultra-small explorer. Also, since there is no window material that effectively transmits light in the EUV range, the optical system must be reflective. Therefore, in order to reduce the size, disposing a detector on the optical axis is needed and reducing the opening area is inevitable. In this research, we have optimized the optical system of the EUV imaging device which can be mounted in the ultra-small spacecraft based on the design of the optical systems used for the conventional large spacecraft. In particular, we have focused on making highly efficient the multilayer reflecting mirror, which is responsible for convergence of light, in order to solve the above problem. In the conventional large-scale exploration plan, multilayer coating consisting of a combination of Mo and Si has been used for imaging of light at a wavelength of 30.4 nm, and its reflectance is about 18%. In this study, multilayer coating of Mg and SiC which can attain reflectivity about 2 times higher than Mo/Si multilayer coating has been adopted. In addition, the opening area has been expanded by improving the resistive anode encoder (RAE), used for the two-dimensional position detector, from the conventional rectangular shape to the triangular shape. In this research, each performance of the Mg/SiC multilayer reflecting mirror, C/A/C thin filter and two-dimensional position detector has been experimentally evaluated. From the experimental results, we have evaluated the detection efficiency and verified the feasibility of observation by PHOENIX. As a result, we have confirmed that PHOENIX has enough performance to detect the plasmopause with a spatial resolution of 0.1 Re and exposure time of < 1 hour. This value is sufficient to discuss the behavior of plasma in the Earth's plasmasphere.

Keywords: EUV, Plasmasphere, He ion, 30.4 nm

doi: 10.20637/JAXA-RR-18-010/0001

* 平成 30 年 12 月 19 日受付 (Received December 19, 2018)

^{*1} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

^{*2} 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 (Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo)

^{*3} 東京大学大学院 理学系研究科 (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

概要

NASAの有人ロケットSLS (Space Launch System)試作機の相乗り衛星としてJAXAの超小型深宇宙探査機EQUULEUS (EQUilibriUm Lunar-Earth point 6U Spacecraft)の打ち上げが予定されている。この探査機は太陽や月の重力を利用することによりリソース制約の厳しいCubeSatでも実現可能な軌道変換能力で地球一月のラグランジュ点へ効率的に航行することを目指す。我々はこのEQUULEUS探査機に搭載される極端紫外光(EUV)撮像装置PHOENIX(Plasmaspheric Helium ion Observation by Enhanced New Imager in eXtreme ultraviolet)の開発を行っている。PHOENIXは地球プラズマ圏に広がるヘリウムイオンの発光(波長30.4 nm)を地球一月のラグランジュ点から1つのフレームに収める。連続的かつ長期間の撮像を行うことで、プラズマ圏の動的描像の大局的な理解を目指す。PHOENIXは多層膜反射鏡、金属薄膜フィルタおよび2次元位置検出器からなる光学系を有しており、それぞれの性能が観測の成否を左右する。探査機のサイズが6U (10×20×30 cm)と非常に小型であり、それ故観測器に与えられる包絡域も極めて狭小(7×10×10 cm)なものとなる。超小型探査機にEUV撮像器を搭載する際に特に問題となるのが、主鏡の小型化に伴う集光能力の低下である。また、EUV領域の光を透過する窓材は存在しないため光学系は反射型である必要がある。従って、小型化のためには光軸上に検出器を配置しなければならず、開口面積の縮小も避けられない。本研究では、従来の大型探査機に用いられてきた実績のある光学系の設計を基に、超小型探査機に搭載可能なEUV撮像装置の光学系の最適化を図った。特に、上記問題を解決するため、集光能力を担う多層膜反射鏡の高効率化に重点をおいて研究を行った。従来の大型探査計画では、波長30.4 nmの光の撮像のためにMoとSiの組み合わせから成る多層膜コーティングが用いられており、その反射率は18%程度であった。本研究ではMo/Si多層膜コーティングより約2倍高い反射率を達成可能なMgとSiCの多層膜コーティングを搭載品に採用した。さらに、2次元位置検出器に用いられているレジスティブアノードエンコーダー(RAE)を従来の四角形から三角形に改良することで開口面積の拡大を図った。本論文では上記のMg/SiC多層膜反射鏡、C/Al/C薄膜フィルタ及び2次元位置検出器それぞれの性能を実験的に評価した結果を述べる。実験結果からPHOENIXの検出効率を評価し、観測の実現可能性を検証した。その結果、PHOENIXはプラズマ圏界面を空間分解能0.1 Re、1時間以下の露出時間で観測可能な性能を有していることを確認した。これはプラズマ圏の動的描像を議論するに十分な性能である。

1. 序論

地球電離圏のさらに上層には、太陽紫外線で電離したプラズマが支配している領域(プラズマ圏)があり、太陽風由来の電磁気的な擾乱により様々な現象が引き起こされる。プラズマ圏は、質量の軽い水素イオンが数密度にして全体の約9割を占め、残りの約1割がヘリウムイオン、微量の酸素イオンからなる。水素イオンは電子を持たないため発光しないが、ヘリウムイオンと酸素イオンは太陽光を受け内部の電子が励起/脱励起されることにより特定の波長の光を発する(太陽共鳴散乱光)。この散乱光を遠隔観測し、プラズマを可視化することにより、時々刻々と変化するプラズマ圏の時間的变化と空間的变化を明確に分離することが可能となる。

このような試みはいくつもの先行研究で行われており、2000年にはNASAのIMAGE衛星の観測により地球プラズマ圏の大局的・局所的な構造や変動の様子が明らかになった¹⁾。日本の衛星ミッションでもプラズマ圏撮像の試みがなされており、1998年にNOZOMI探査機が世界初のプラズマ圏撮像に成功している^{2,3,4)}。2007年にはKAGUYA衛星による月周回軌道からの撮像に成功している^{5,6)}。

地球外気圏の撮像も同様に行われており、近年では2015年に超小型探査機PROCYONの観測により世界で初めて遠方まで広がる水素原子の発光の全体像を深宇宙から捉えることに成功した⁷⁾。PROCYONは世界初の50kg級の深宇宙探査機であり、その成果により超小型探査の有用性が実証された⁸⁾。超小型探査機・衛星による惑星探査は、その低予算・高頻度での実現性により近年注目されている。最近ではNASAが開発している次世代ロケットSLS (Space Launch System)初号機の打ち上げが計画されている。これは将来的に小惑星や火星への有人飛行への利用が検討されている大型ロケットであり、試作機は月フライバイ軌道へ有人宇宙船の試験機を打ち上げる。この余剰重量を有効活用するため13機の6U CubeSat (約10×20×30 cm)が相乗り衛星として打ち上げられ、そのうちの1機のEQUULEUS (EQUilibrium Lunar-Earth point 6U Spacecraft)探査機は地球-月のラグランジュ点への航行を目指す。

我々はEQUULEUSに搭載する極端紫外光(EUV)撮像装置(PHOENIX: Plasmaspheric Helium ion Observation by Enhanced New Imager in Extreme ultraviolet)の開発を手がけている。PHOENIXは、ヘリウム一価イオンが太陽共鳴散乱により発する極端紫外光(波長30.4 nm)を遠方から継続的に撮像することにより、プラズマ圏の動的描像の大局的な理解を目指す。プラズマ圏の中、もしくは近くを回る地球周回軌道のように、限られた観測視野で局所的な情報しか得られない衛星とは異なり、本ミッションは月の近く、すなわちプラズマ圏から十分に遠く離れることで、地球半径の数倍まで分布している地球プラズマ圏を、ひとつのフレームに収めることが出来る極めて貴重な機会である。本論文ではPHOENIXの概要および性能評価の結果について報告する。

2. Plasmaspheric Helium ion Observation by Enhanced New Imager in eXtreme ultraviolet : PHOENIX

2.1. PHOENIX の構成

PHOENIXは主鏡、フィルタ、2次元位置検出器で構成される反射型望遠鏡である。PHOENIXの概略図を図1に示す。主鏡にはMg/SiCの多層膜コーティングを施し、反射率が波長30.4 nmで極大になるよう設計されている。フィルタにはC/Al/C薄膜を用い検出器への長波長の光の混入を防ぐ。2次元位置検出器はマイクロチャンネルプレート(MCP)とレジスティブアノードエンコーダー(RAE)で構成される。主鏡で集光された光はフィルタを通り検出器に入射し電気信号へ変換される。PHOENIXにはKAGUYA/TEXやISS-IMAP/EUVIに搭載されたEUV撮像器と同様の構成を採用している。他にもメカニカルシャッターを備えている。これは打ち上げ前の輸送時や環境試験時およびEQUULEUSが深宇宙を航行中に、検出器やフィルタへの太陽光入射および主鏡や検出器表面の汚染を防ぐためのものであり、別の論文に詳しくまとめられている⁹⁾。

6Uサイズの超小型探査機に搭載されるPHOENIXには1U以下の包絡域(7×10×10 cm)しか与えられていない。そのため、搭載可能な主鏡の受光面積は従来の大型探査機に搭載されたEUV撮像器に比べ1/4以下になる。受光面積の縮小を補うために、PHOENIXには新規に開発したMg/SiC多層膜反射鏡を用いて反射率の向上を試みた。さらに、従来の四角形のRAEを三角形に改良することで検出器保持部の面積を縮小し、開口面積の拡大を図った。

PHOENIXの仕様を表1に示す。本論文では上記各構成要素のフライト品に対する性能評価の結果を述べる。

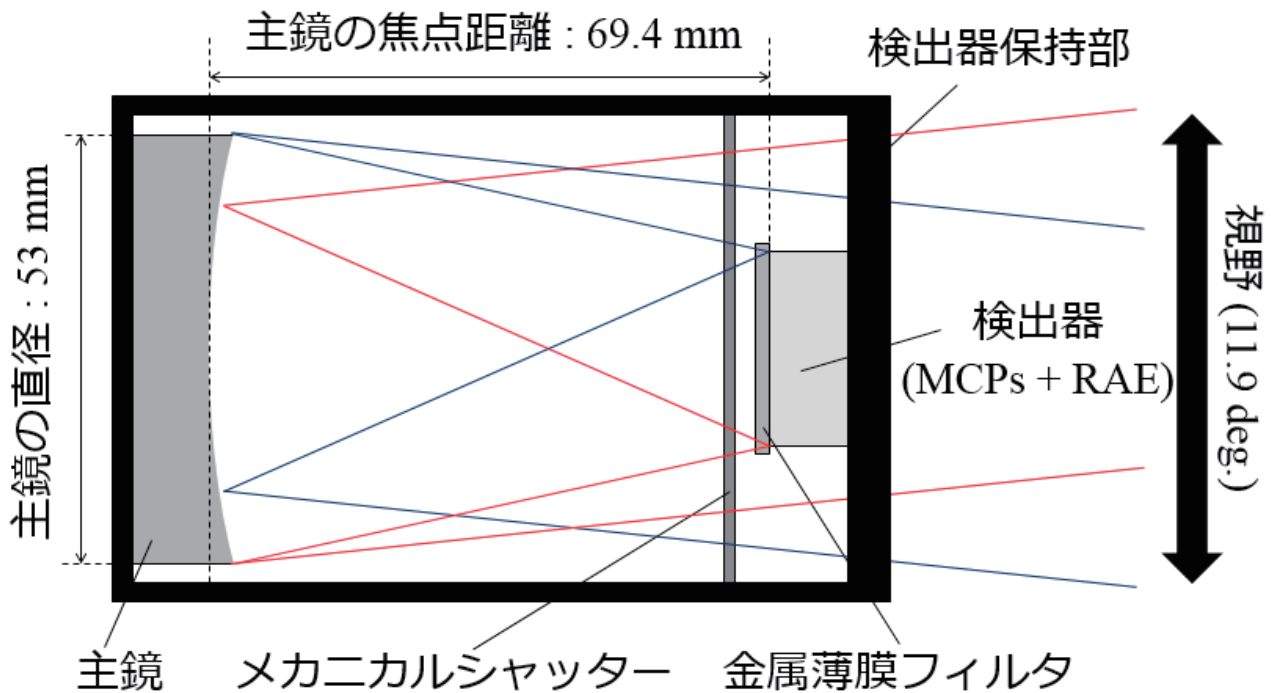
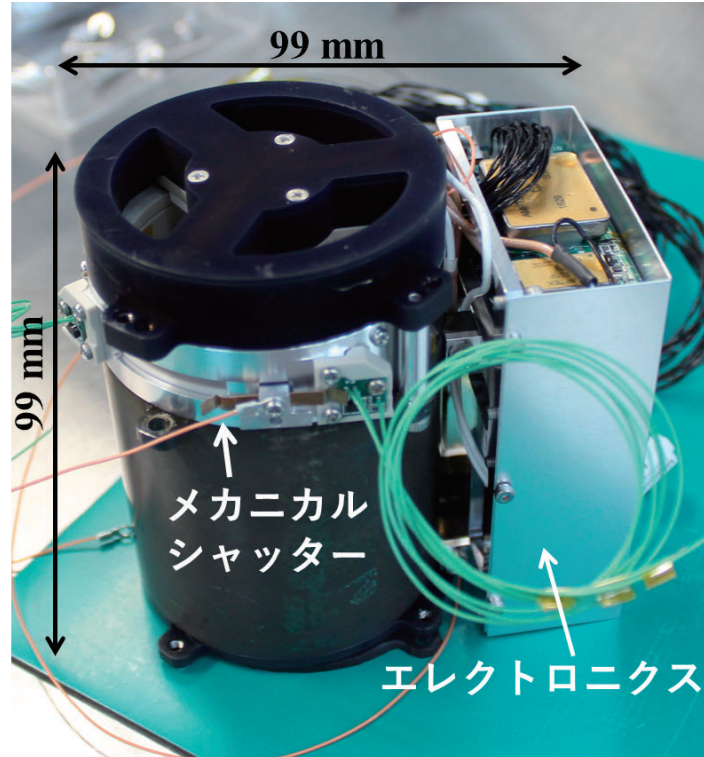


図1. PHOENIXの概観(上)と概略図(下)

PHOENIXの光学系は多層膜コーティングした主鏡，金属薄膜フィルタと2次元位置検出器(MCP+RAE)から成る．PHOENIXに入射した光は多層膜反射鏡で集光されフィルタを通過し検出器表面に到達する．

表1. PHOENIXの諸元

観測波長	30.4 nm (He II)
角度分解能	長軸: 0.148 deg, 短軸: 0.085deg.
時間分解能	< 1 hour
視野	ϕ 11.9 deg.
データ形式	256 × 256 pix
重量	532.5 g
包絡域	66 × 99 × 99 mm
開口面積	11.66 cm ²

2.2. 多層膜反射鏡

ガラス材の EUV 領域における透過率は非常に低いため、観測するためには反射型の光学系を用いなければならない。その上、一般に EUV は物質に対し非常に反射しにくいいため、EUV を観測する際には従来より多層膜反射鏡が用いられてきた。多層膜反射鏡は基板上に重元素と軽元素を一定の厚みで交互に積層したもので、その EUV に対する反射率は反射光の干渉により格段に高くなる。多層膜反射鏡が実用化されたことにより、波長 30.4 nm における反射率は従来の鏡より一桁以上高くなった。この技術を用いて 1990 年代後半に EUV 撮像技術が確立された。米国の IMAGE 衛星や日本の NOZOMI 探査機や KAGUYA 衛星に搭載された EUV 観測装置には Mo/Si 多層膜反射鏡が用いられた^{1, 2, 3, 4, 10)}。Mo と Si の組み合わせからなる多層膜は非常に安定であり波長 30.4 nm に対する反射率が約 20% と高いため、これまで数多くの EUV 観測装置に採用されてきた。しかし、EQUULEUS のような超小型探査機に EUV 観測装置を搭載する上で特に問題となるのが、サイズの制約からくる主鏡の小型化に伴う有効面積の縮小である。実際、PHOENIX に許された包絡域は 1U (7×10×10 cm) 程度であり、その制約下で反射型光学系を成立させるためには主鏡のサイズを ϕ 50 mm 程度に抑えなければならなかった。この場合、開口面積は IMAGE 衛星や KAGUYA 衛星に搭載された観測器の 1/4 以下になる。本研究では上記問題を克服する目的で Mg と SiC の組み合わせから成る多層膜反射鏡を新規に開発し PHOENIX の主鏡に用いた。先行研究によると Mg/SiC 多層膜反射鏡は波長 30.4 nm の光に対し、Mo/Si 多層膜反射鏡よりも高い反射率を有することが報告されている¹¹⁾。Mg/SiC 多層膜反射鏡のフライト品の外観および仕様を図 2 および表 2 に示す。

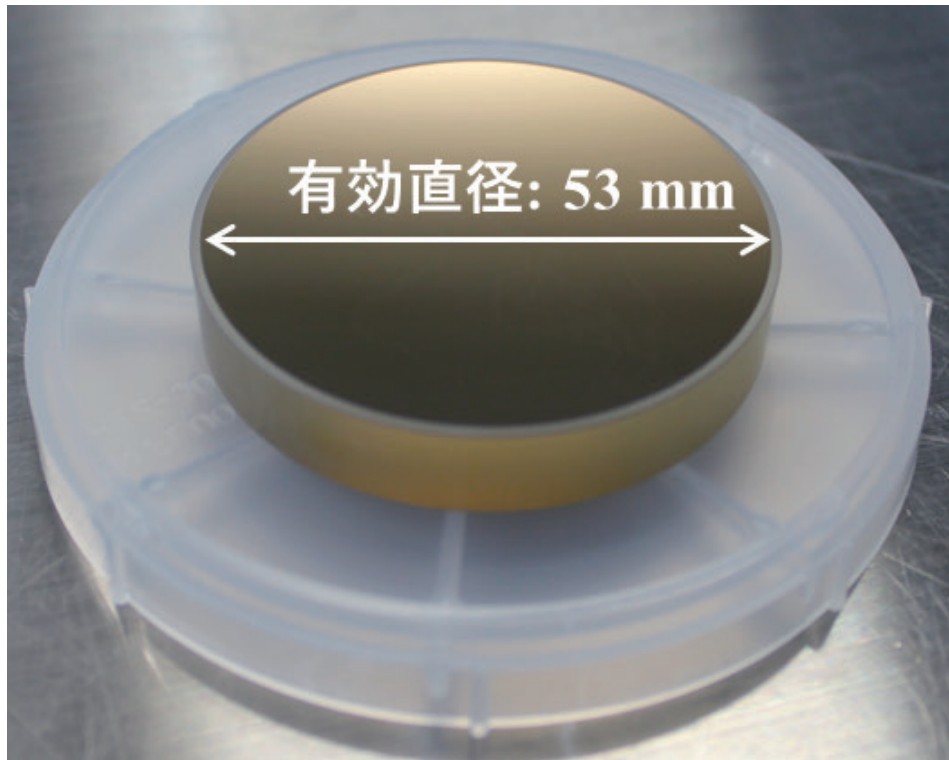


図2. Mg/SiC多層膜反射鏡の概観

表2. Mg/SiC多層膜反射鏡の諸元

基板	
材質	CLEARCERAM-Z
有効面積	φ 53 mm
曲率半径	R 141.6 mm
中心厚	7 mm
多層膜コーティング	
材質	Mg/SiC
積層数, N	30
周期, d	15.85 nm
膜厚比, Γ (SiC/Mg)	0.3

Mg/SiC多層膜反射鏡のフライト品の各波長における反射率を測定した。測定には東京大学にある極端紫外光較正設備を用いた。ガスフローランプを用いて波長30.4 nm (He II), 58.4 nm (He I)と83.4 nm (O II), 重水素ランプを用いて121.6 nm (H Lyman-alpha)の光を真空チャンバーに導入した。入射光は分光器の出射スリットおよびチャンバー入り口に設置されたピンホールによってコリメートした。検出器にはMCPとRAEを使用した。今回の測定では、PHOENIXに対し入射角0度の光をMg/SiC多層膜反射鏡の中心から18 mmの位置に入射し反射率を測定した。ミラーの曲率を考慮すると、このときのミラー表面に対する入射角は7.3度である。図3に反射率測定の結果を示す。計算値は材質

の複素屈折率から求めた¹²⁾。製作したMg/SiC多層膜反射鏡の反射率が波長30.4 nmに最適化されていることが確認できる。しかし、30.4 nmにおける反射率の測定値は計算値の30%程度と低い結果になった。この原因として製造時の公差の影響や、計算過程において界面粗さ、各層厚の測定誤差が考慮されていないことなどが考えられるが、同様の物理的影響があると考えられる従来のMo/Si多層膜反射鏡に関して計算値と測定値には数%以下の差しかないという事実がある。今後は、物質の相互拡散など科学的要因を考慮した詳細なMg/SiC多層膜の要素試験が必要である。

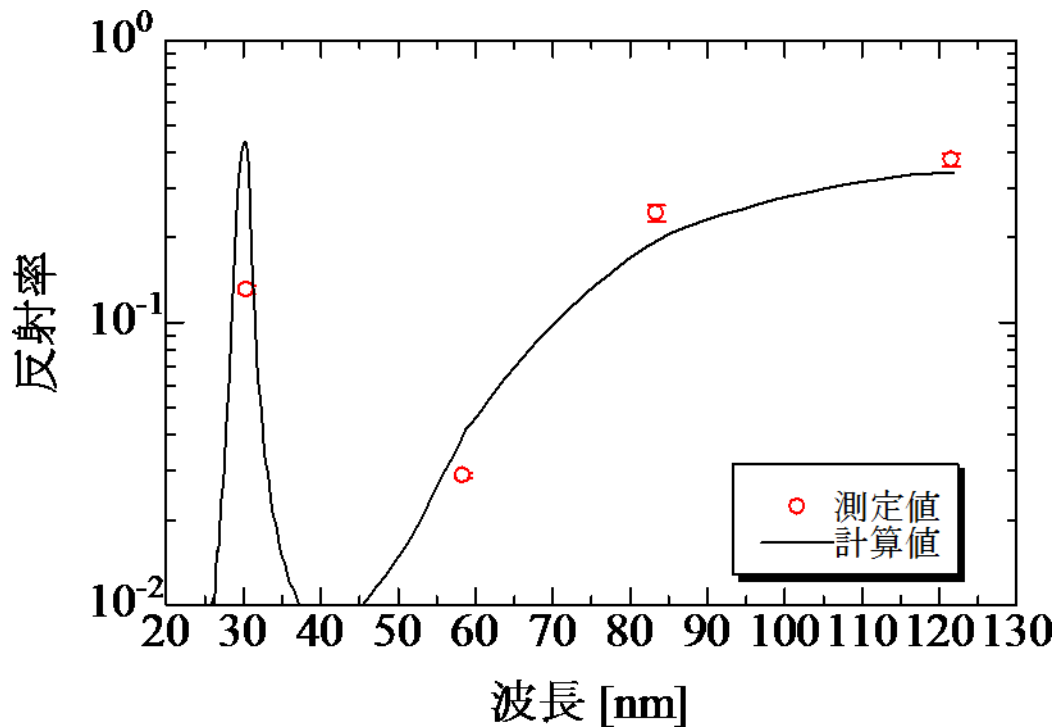


図3. Mg/SiC多層膜反射鏡の反射率

横軸は波長，縦軸は反射率を表している。図中の赤丸が測定値，黒線が計算値である。計算値は入射角7度のものをプロットしている。

2.3. 金属薄膜フィルタ

PHOENIXの観測対象は地球プラズマ圏のヘリウムイオンの発光である。プラズマ圏にはヘリウムイオン以外にも主にヘリウム原子，酸素原子・イオン，水素原子が太陽光を共鳴散乱しEUVを発する。特に水素原子はヘリウムイオンより数桁明るく発光し高高度まで広がっている。これらの目的波長以外の光は観測データの汚染源になり得るため，減光することが必要になる。PHOENIXではAlとCの薄膜から成るフィルタを用いて上記の光を減光する。図4にPHOENIXに用いるC/Al/Cフィルタの概観を示す。Alの酸化を防ぐ目的で入射面及び出射面をCでコーティングしたサンドウィッチ型のフィルタを採用した。有効面積は ϕ 20.5 mmで，それぞれの膜厚は15 nm，165.2 nm，15 nmである。これらの仕様を表3にまとめる。

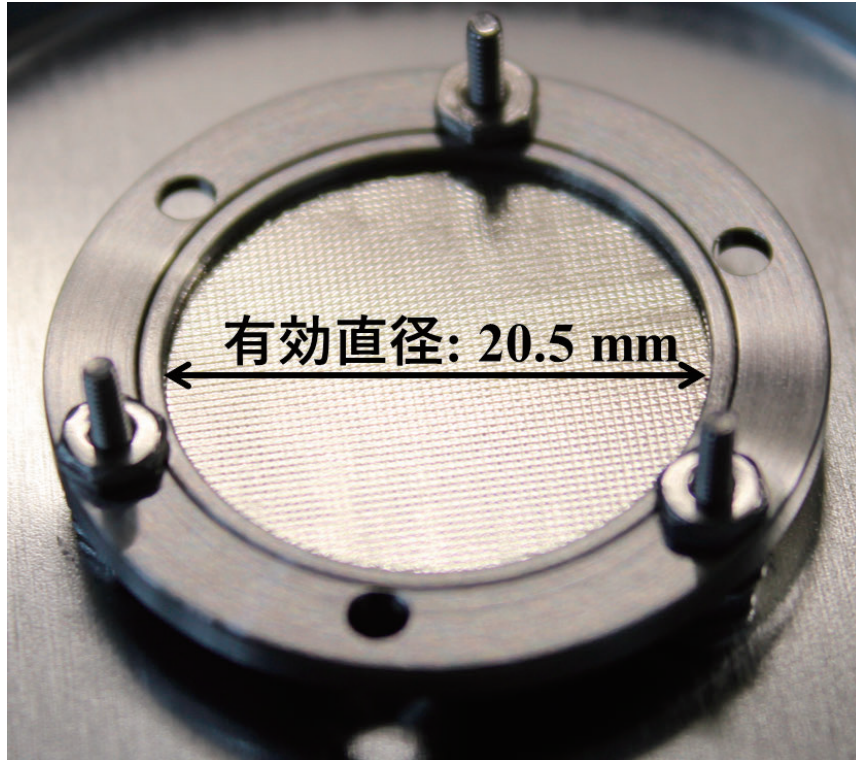


図4. C/Al/C金属薄膜フィルタの概観

表3. C/Al/C金属薄膜フィルタの諸元

材質	C/Al/C
有効面積	φ 20.5 mm
厚み	15 nm/165.2 nm/15 nm

C/Al/Cフィルタの透過率測定の結果を図5に示す。ガスフローランプを用いて波長30.4 nm (He II), 58.4 nm (He I), 73.4 nm (Ne I)と83.4 nm (O II), 重水素ランプを用いて121.6 nm (H Lyman-alpha)の光を真空チャンバーに導入し透過率を測定した。計算値は多層膜反射鏡の反射率と同様に材質の複素屈折率から計算できる¹²⁾。測定結果から今回製作したC/Al/Cフィルタは長波長の光の透過率を十分削減できていることが確認できる。波長83.4 nmと121.6 nmに対する測定も行ったが、検出器のノイズレベル($\sim 10^{-4}$)を下回ったため透過率の定量的な評価は行うことができていない。しかし、測定結果は計算値とほぼ一致しているため、膜厚は設計値通りの性能を有していると判断できる。そのため、波長73.4 nm以上の光に対する透過率は計算値を用いて評価できると考えると、特に明るい水素原子の発光(121.6 nm)の透過率を 10^{-8} 以下に抑えられていると期待できる。

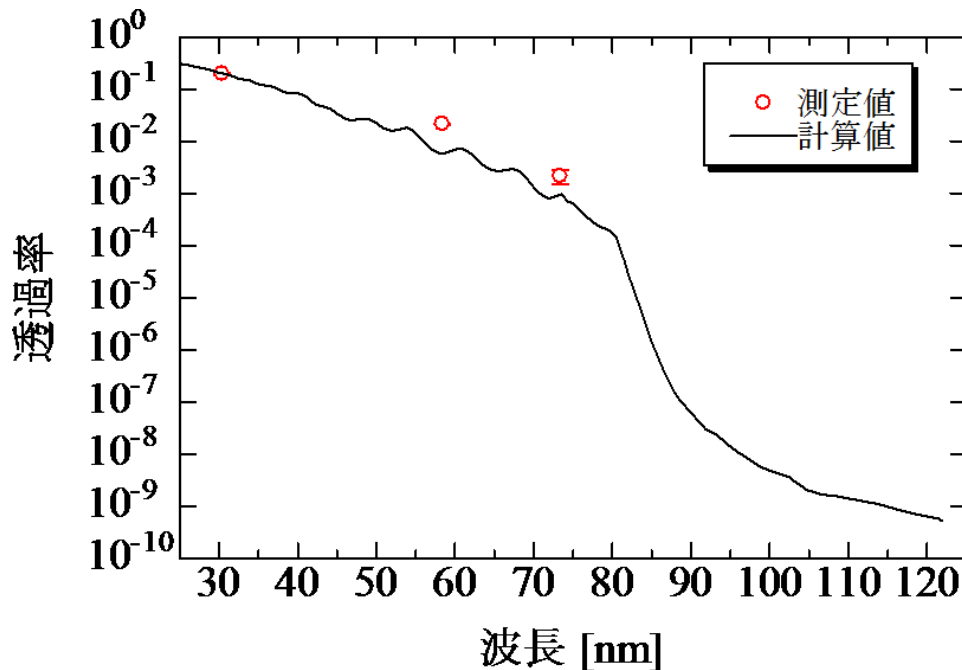


図5. C/Al/C金属薄膜フィルタの透過率

横軸は波長，縦軸は透過率を表している．赤丸は測定値，黒線は計算値である．波長83.4 nmおよび121.6 nmの光に対する透過率測定も行ったが，透過光が検出器のノイズレベルを下回ったため実測はできていない．

2.4. マイクロチャンネルプレート(MCP)およびレジスティブアノードエンコーダー(RAE)

従来からEUV観測器の検出器にはマイクロチャンネルプレート(MCP)が用いられてきた．MCPは直径10 μm 程度の鉛ガラスのチャンネルを束ねた構造となっている．それぞれのチャンネルが独立した電子増倍管として働くことで全体で2次元の像を取得できる．MCPに高電圧を印加するとチャンネルに沿った電位勾配が生成され，各チャンネルに入射した光子が内壁に衝突して光電子を放出する．生成された光電子は加速され再び内壁に衝突し，複数の二次電子を生成する．この二次電子放出がチャンネル内で繰り返されることにより電子数が増幅し1枚のMCPで約 10^3 の利得を得る．複数のMCPを重ねることにより利得を増やすことも可能である．MCPは入射面に仕事関数の低い光電物質を蒸着することにより量子効率を向上できることが知られている¹³⁾．蒸着する光電物質の中で代表的なものがヨウ化セシウムであるが，潮解性を有しており大気に暴露されると劣化することが知られている．そのため，PHOENIXには無蒸着のMCPを用いる．位置検出部にはレジスティブアノードエンコーダー(RAE)を用いる．MCPで増幅された電子はRAE上で3隅の電極へ分割され電気信号として検出される．RAEは面上の一様な抵抗体であるため分割された電荷の比から電子が入射した位置を演算することができる．PHOENIXの検出器には3段のMCPアッセンブリを採用しており，Mg/SiC多層膜反射鏡の焦点面に設置されている．従来の観測器では四角型のRAEが用いられてきたが^{14,15)}，PHOENIXには新規開発した三角形のRAEを用いる．これにより検出器保持部の面積を縮小することができ，開口面積の拡大に繋がる．さらに，従来のRAEでは4チャンネルに分配された電荷比から位置を検出していたが，PHOENIXの位置検出は3チャンネルで行う．これにより，RAE後段のアンプ部を1チャンネル分削減しエレクトロニクス全体の体積を縮小することで，与えられた包絡域の中で光学系に割り振る体積の最大化を図った．フライト品の概観および仕様を図6および表4に示す．



図6. 2次元位置検出器の概観

表4. MCPの諸元

段数	3段
有効面積	ϕ 14.5 mm
ポア径	ϕ 12 μ m
バイアス角	8 deg.
L/D	40
抵抗値	\sim 1 MOhm
印加電圧	観測時: -2.8 kV
ゲイン	$> 10^7$

PHOENIXに用いるMCPの量子効率を評価するための実験を行った。波長30.4 nm (He II), 58.4 nm (He I), 83.4 nm (O II)と121.6 nm (H Lyman-alpha)の光をMCPに入射し、量子効率が既知の較正用MCPとの計数率の比から量子効率を求めた。量子効率測定の結果を図7に示す。波長30.4 nmに対する量子効率は0.2を達成しており、波長が長くなるにつれて減少しているのが確認できる。特に明るい水素原子の発光(121.6 nm)に対する量子効率は30.4 nmのものに対して1/10以下を達成している。

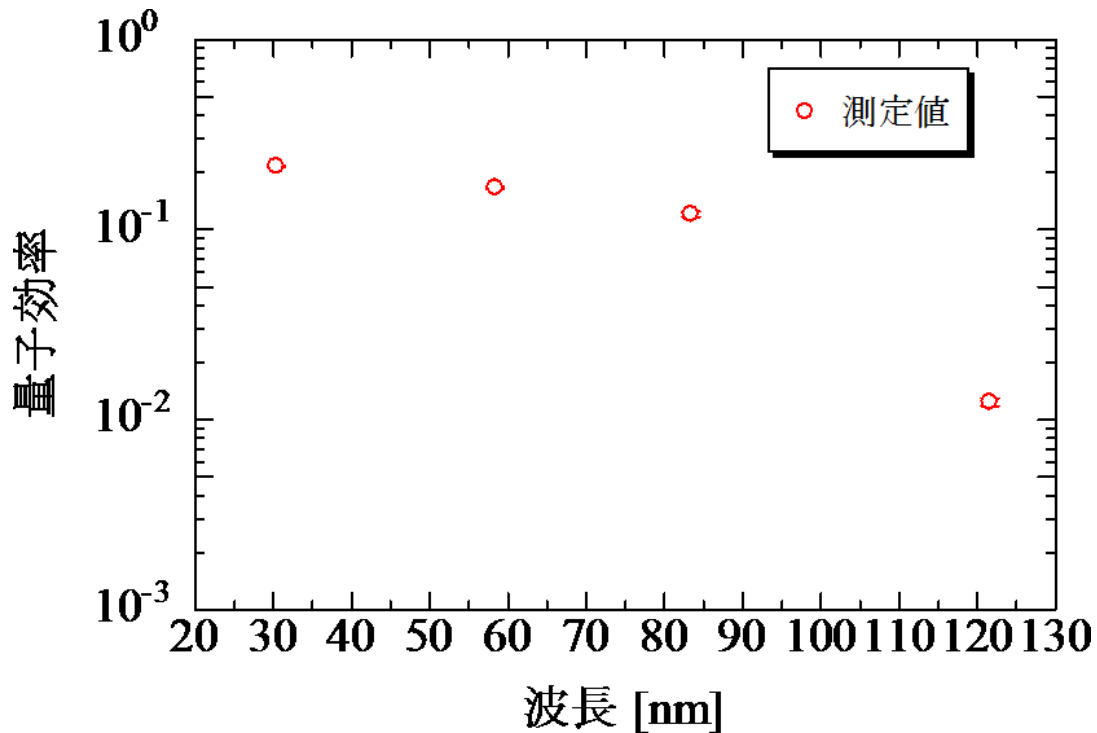


図7. MCPの量子効率

横軸は波長，縦軸は量子効率を表している．赤丸は測定値を示している．

PHOENIXには三角形のRAEを用いるため，斜交座標系で位置を検出する．図8にRAEのフライト品の概観および斜交座標系の概念図を示す．RAEの各チャンネルに分配された電荷(Q_A , Q_B , Q_C)の比から以下の式を用いて位置座標に変換する．データ形式は 256×256 pixであるが，図8右のように全領域の半分以下しか使用しない．斜交座標系を用いるため，ピクセルサイズは短軸 0.085 deg，長軸 0.148 degの菱形になる．

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{Q_A}{Q_A + Q_B + Q_C} \\
 Y &= \frac{Q_B}{Q_A + Q_B + Q_C}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

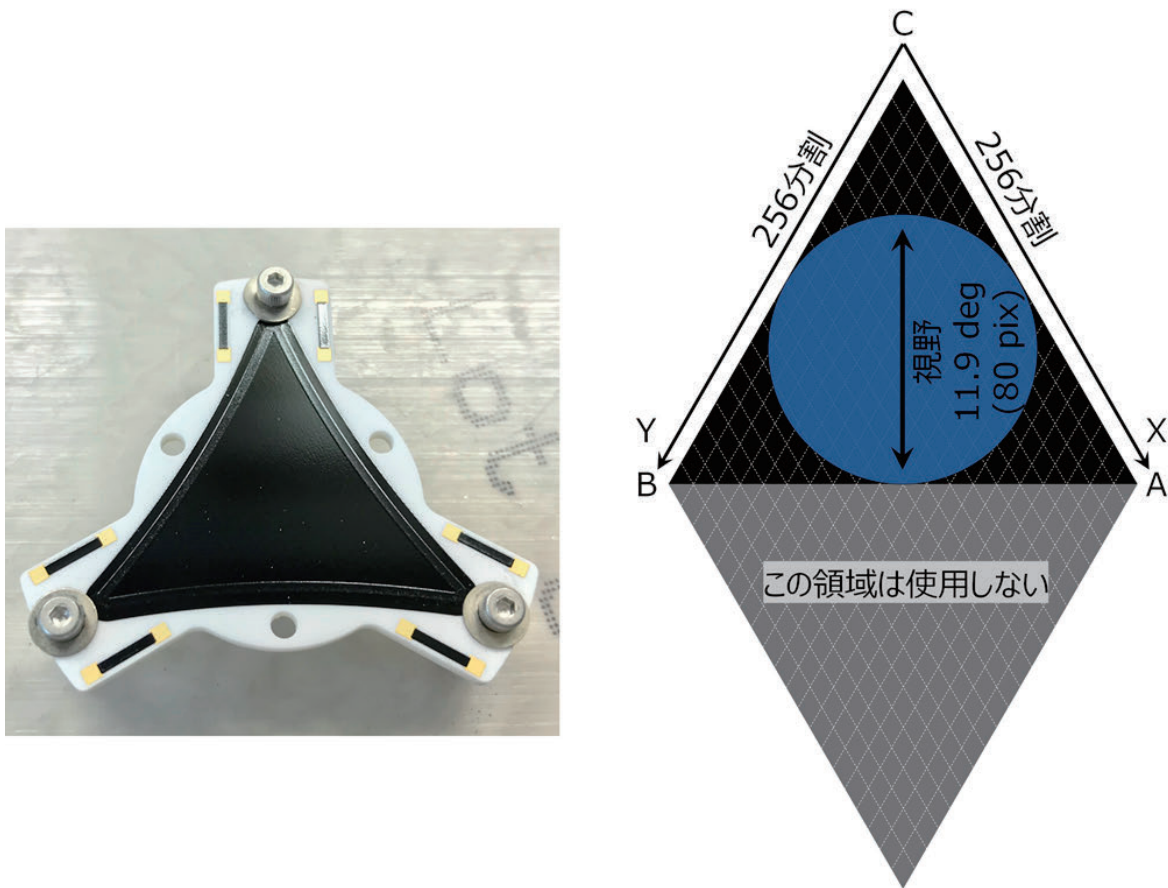


図8. 三角形RAEの概観(左)と斜交座標系の概念図(右)

2.5. PHOENIX の検出効率

多層膜反射鏡，金属薄膜フィルタとMCPに対する性能評価の結果からPHOENIXの検出効率を評価した．図9は各波長に対する主鏡の反射率，フィルタの透過率，MCPの量子効率を掛け合わせたものを示している．波長83.4 nm以上に対するフィルタの透過率には実測値ではなく計算値を用いている．

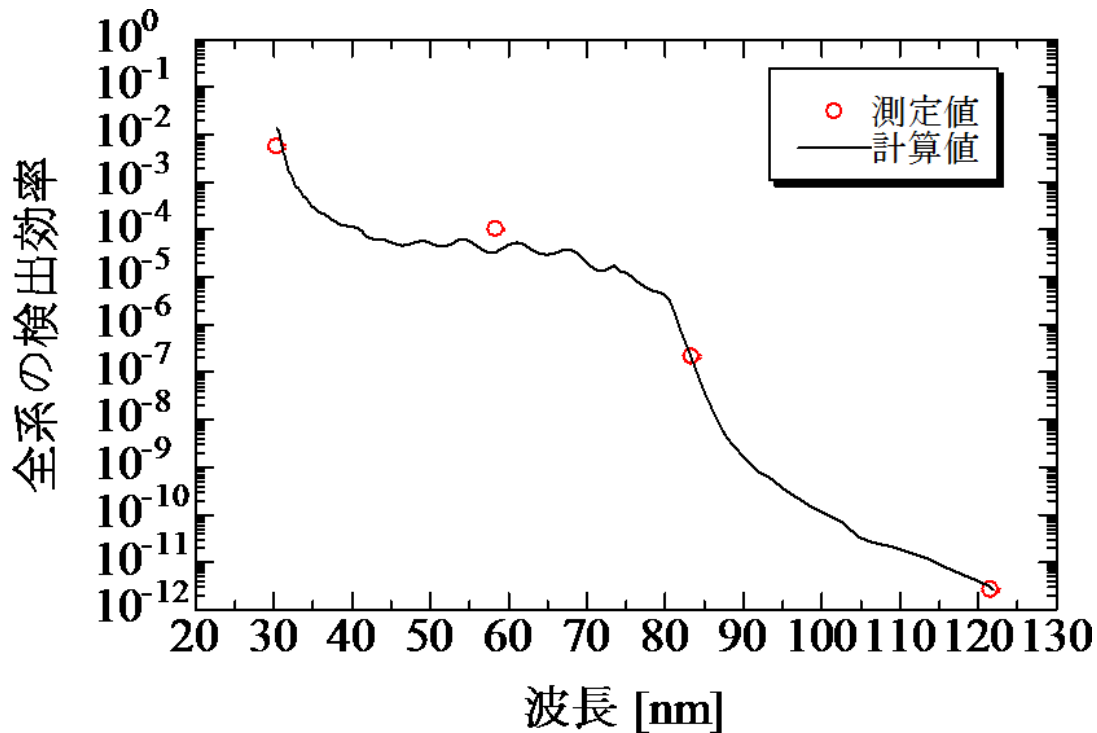


図9. 各構成要素の効率を掛け合わせた効率
多層膜反射鏡の反射率，MCPの量子効率は実測値を使用した．金属薄膜フィルタの透過率は30.4 nmと58.4 nmに対するものは実測値を，83.4 nmと121.6 nmに対するものは計算値を使用した．

PHOENIX光学系全体の計数を見積もる．PHOENIXの開口面積は11.66 cm²，1ピクセルが見込む立体角は1.92×10⁻⁶ strである．このとき1ピクセルあたりの計数率(N)は以下のように表せる．

$$N = \frac{10^6}{4\pi} \times B \times S \times \Omega \times R_{Mirror} \times T_{Filter} \times QE_{MCP} \quad (2)$$

ここで，B [Rayleigh]は発光強度，S [cm²]は開口面積，Ω [str]は1ピクセルが見込む立体角，R_{Mirror}は多層膜反射鏡の反射率，T_{Filter}は金属薄膜フィルタの透過率，QE_{MCP}はMCPの量子効率である．光学系全体の検出効率は，波長30.4 nm (He II)に対して9.8×10⁻³ cps/Rayleigh/pixである．各構成要素の効率および全系の検出効率を表5にまとめる．

表5. 波長30.4nmに対する各構成要素の効率および全系の検出効率

主鏡の反射率	13.1%
フィルタの透過率	19.6%
MCPの量子効率	21.5%
全系の検出効率	9.8×10 ⁻³ cps/Rayleigh/pix

観測対象であるプラズマ圏のヘリウムイオンの発光(30.4 nm)の強度は先行研究により中心付近で5 Rayleigh程度¹⁶⁾、プラズマ圏界面で0.1-0.5 Rayleigh²⁾と報告されている。一方、観測時のノイズの主な要因として他波長の混入光およびMCPの暗電流が挙げられる。特にヘリウム原子の発光(58.4 nm)は、検出効率の差が大きくないため主な混入光として考慮する必要がある。先行研究の結果からプラズマ圏中央部では最大100 Rayleigh¹⁷⁾、惑星間空間では7.5 Rayleighと報告されている¹⁸⁾。MCPの暗電流は先行研究の結果から10.4 cps/cm² (=9.7×10⁻⁴ cps/pix)と仮定した^{2, 18)}。観測対象による計数をN_{Signal}、混入光と暗電流による計数をまとめてN_{Background}とすると、Signal-to-Noise Ratio (S/N比)は以下のように表せる。

$$\begin{aligned}
 N_{\text{Signal}} &= N_{\text{Total}} - N_{\text{Background}} \\
 \sigma_{\text{Signal}} &= \sqrt{\sigma_{\text{Total}}^2 + \sigma_{\text{Background}}^2} \approx \sqrt{\sigma_{\text{Signal}}^2 + 2\sigma_{\text{Background}}^2} \\
 &\approx \sqrt{N_{\text{Signal}} + 2N_{\text{Background}}} \\
 \text{SNR} &= \frac{N_{\text{Signal}}}{\sigma_{\text{Signal}}} = \frac{N_{\text{Signal}}}{\sqrt{N_{\text{Signal}} + 2N_{\text{Background}}}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

上式からS/N比を計算した結果を図10に示す。この結果から、PHOENIXはプラズマ圏界面をS/N比>3で計測するためには、1時間の露出時間で観測可能であり、これはプラズマ圏の動的描像を理解するために十分な性能である。

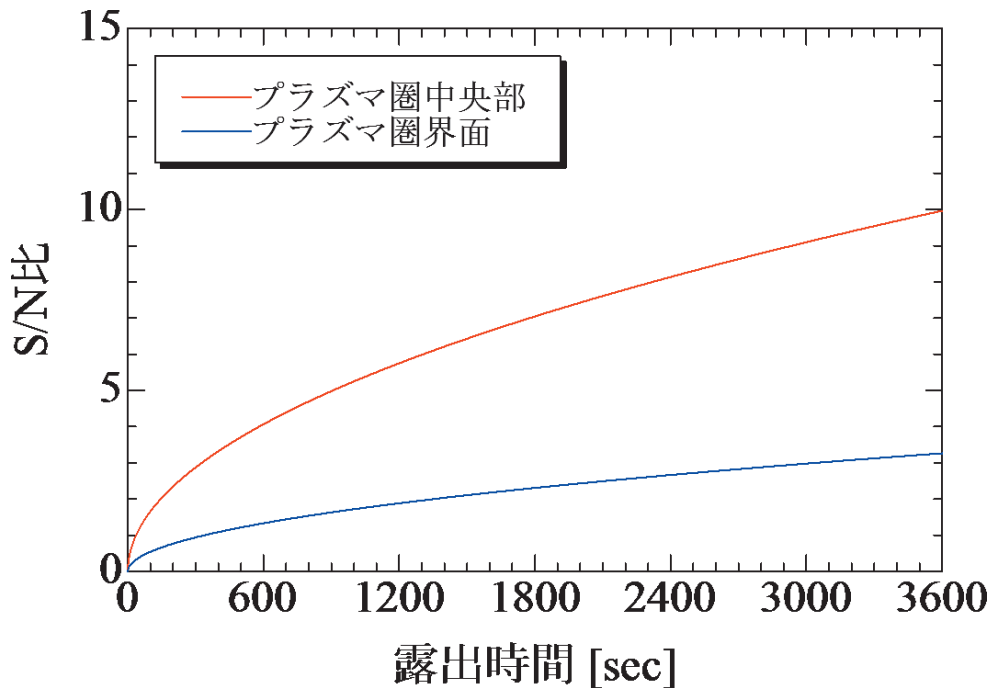


図10. S/N比の計算結果

横軸は露出時間、縦軸はS/N比を表している。赤線がプラズマ圏中央部、青線がプラズマ圏界面を観測する際のS/N比を表している。

3. まとめ/結論

我々はNASAの有人ロケットSLS試作機の相乗り衛星として打ち上げられる超小型探査機EQUULEUSに搭載されるEUV観測装置PHOENIXの開発を行った。PHOENIXの光学系は多層膜反射鏡、金属薄膜フィルタ、2次元位置検出器から成る。超小型探査機にEUV撮像器を搭載する際には主鏡の小型化に伴う集光能力の低下が問題となる。本研究ではこの問題を克服するため、新たにMg/SiC多層膜反射鏡及び三角形RAEを開発し搭載品に採用した。搭載品の効率の波長依存性を実験を通して評価し、その結果PHOENIXはヘリウムイオンの太陽共鳴散乱光(He II: 30.4 nm)に対し 9.8×10^{-3} cps/Rayleigh/pixの検出効率を有していることを確認した。観測対象であるプラズマ圏に広がるヘリウムイオンの発光(He II: 30.4 nm)および背景光となるヘリウム原子の発光(He I: 58.4 nm)の強度を先行研究の結果を用いて仮定し観測の実現可能性を評価した。その結果、プラズマ圏全体を1時間以下の露出時間で撮像できることを確認した。これはプラズマ圏の動的描像を把握するために十分な性能である。Mg/SiC多層膜反射鏡に関するより詳細な要素試験は今後の課題である。

参考文献

- 1) Sandel, B. R., Broadfoot, A. L., Curtis, C. C., King, R. A., Stone, T. C., Hill, R. H., Chen, J., Siegmund, O. H. W., Raffanti, R., Allred, D. D., Turley, R. S., and Gallagher, D. L., The extreme ultraviolet imager investigation for the IMAGE mission, In *The IMAGE Mission* (pp. 197-242), 2000.
- 2) Yoshikawa, I., Yamazaki, A., Shiomi, K., Yamashita, K., Takizawa, Y., and Nakamura, M., Evolution of the outer plasmasphere during low geomagnetic activity observed by the EUV scanner onboard Planet - B, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105(A12), 27777-27789, 2000a.
- 3) Yoshikawa, I., Yamazaki, A., Shiomi, K., Yamashita, K., Takizawa, Y., and Nakamura, M., Photometric measurement of cold helium ions in the magnetotail by an EUV scanner onboard Planet - B: Evidence of the existence of cold plasmas in the near - Earth plasma sheet, *Geophysical research letters*, 27(21), 3567-3570, 2000b.
- 4) Yoshikawa, I., Yamazaki, A., Shiomi, K., Yamashita, K., Takizawa, Y., and Nakamura, M., Interpretation of the He II (304 Å) EUV image of the inner magnetosphere by using empirical models, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A11), 25745-25758, 2001.
- 5) Yoshikawa, I., Murakami, G., Ogawa, G., Yoshioka, K., Obana, Y., Taguchi, M., Yamazaki, A., Kameda, S., Nakamura, M., Kikuchi, M., Kagitani, M., Okano, S., and Miyake, W., Plasmaspheric EUV images seen from lunar orbit: Initial results of the extreme ultraviolet telescope on board the Kaguya spacecraft, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A4), 2010.
- 6) Murakami, G., Sakai, K., Homma, T., Yoshioka, K., Yoshikawa, I., Ichimaru, S., and Takenaka, H., Performance of Y2O3/Al multilayer coatings for the He-II radiation at 30.4 nm, *Review of Scientific Instruments*, 82(3), 033106, 2011.
- 7) Kameda, S., Ikezawa, S., Sato, M., Kuwabara, M., Osada, N., Murakami, G., Yoshioka, K., Yoshikawa, I., Taguchi, M., Funase, R., Sugita, S., Miyoshi, Y., and Fujimoto, M., Ecliptic North - South Symmetry of Hydrogen Geocorona, *Geophysical Research Letters*, 44(23), 11,706-11,712, 2017.
- 8) Funase, R., Inamori, T., Ikari, S., Ozaki, N., and Koizumi, H., Initial operation results of a 50kg-class deep space exploration micro-spacecraft PROCYON, *29th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, SSC15-V-5, Logan, UT, 2015.

- 9) 吉岡和夫, 桑原正輝, 疋田伶奈, 荒尾昇吾, 吉川一朗, 超小型探査機搭載に向けたコンタミ防止用蓋開閉システムの開発, *宇宙航空研究開発機構研究開発報告*, in press.
- 10) Murakami, G., Yoshikawa, I., Obana, Y., Yoshioka, K., Obawa, G., Yamazaki, A., Kagitani, M., Taguchi, M., Kikuchi, M., Kameda, S., and Nakamura, M., First sequential images of the plasmasphere from the meridian perspective observed by KAGUYA, *Earth, Planets and Space*, 62(4), e9-e12, 2010.
- 11) Yoshikawa, I., Murachi, T., Takenaka, H., and Ichimaru, S., Multilayer coating for 30.4 nm, *Review of Scientific Instruments*, 76(6), 066109, 2005.
- 12) 谷田貝豊彦, 光学, 朝倉書店, 1(2017), 131-135.
- 13) 桑原正輝, 吉岡和夫, 村上豪, 鈴木文晴, 疋田伶奈, 吉川一朗, ヨウ化セシウムを蒸着したマイクロチャンネルプレートの感度の安定性に関する研究, *宇宙航空研究開発機構研究開発報告*, JAXA-RR-16-011, 1-10, 2017.
- 14) Yoshikawa, I., Yoshioka, K., Murakami, G., Yamazaki, A., Tsuchiya, F., Kagitani, M., Sakanoi, T., Terada, N., Kimura, T., Kuawbara, M., Fujiwara, K., Hamaguchi, T., and Tadokoro, H., Extreme Ultraviolet Radiation Measurement for Planetary Atmospheres/Magnetospheres from the Earth-Orbiting Spacecraft (Extreme Ultraviolet Spectroscope for Exospheric Dynamics: EXCEED), *Space Science Reviews*, 184(1-4), 237-258, 2014.
- 15) Yoshioka, K., Murakami, G., Yamazaki, A., Tsuchiya, F., Kagitani, M., Sakanoi, T., Kimura, T., Uemizu, K., Uji, K., and Yoshikawa, I., The extreme ultraviolet spectroscope for planetary science, EXCEED, *Planetary and Space Science*, 85, 250-260, 2013.
- 16) Nakamura, M., Yoshikawa, I., Yamazaki, A., Shiomi, K., Takizawa, Y., Hirahara, M., Yamashita, K., Saito, Y., and Miyake, W., Terrestrial plasmaspheric imaging by an extreme ultraviolet scanner on Planet - B. *Geophysical research letters*, 27(2), 141-144, 2000.
- 17) Meier, R. R., and Weller, C. S., EUV resonance radiation from helium atoms and ions in the geocorona, *Journal of Geophysical Research*, 77(7), 1190-1204, 1972.
- 18) Yamazaki, A., Yoshikawa, I., Shiomi, K., Takizawa, Y., Miyake, W., and Nakamura, M., Latitudinal variation of the solar He I 58.4 nm irradiance from the optical observation of the interplanetary He I emission. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A6), 2006.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-18-010
JAXA Research and Development Report

超小型探査機搭載の極端紫外光観測装置PHOENIXの開発
Development of Ultra-small Imaging Device, PHOENIX, for Plasmaspheric EUV Radiation

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 平成31年3月8日
電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

