



ISSN 1349-1113
JAXA-RR-06-019

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

超高層大気撮像観測小型衛星 (IMAP) 搭載に向けた
Mg/SiC多層膜反射鏡の開発

村上 豪, 吉岡 和夫, 山崎 敦, 吉川 一郎, 笠羽 康正

2007年3月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

超高層大気撮像観測小型衛星（IMAP）搭載に向けた Mg/SiC 多層膜反射鏡の開発

村上 豪*, 吉岡 和夫*, 山崎 敦**, 吉川 一朗*, 笠羽 康正**

Development of Mg/SiC multilayer mirrors for the IMAP small satellite

By

Go MURAKAMI*, Kazuo YOSHIOKA, Atsushi YAMAZAKI,
Ichiro YOSHIKAWA, and Yasumasa KASABA**

Abstract : A multilayer coating mirror of Mo/Si is usually used for space science in the spectral range of extreme ultraviolet (EUV), especially for He-II (30.4 nm) radiation, because it is highly stable under vacuum and atmosphere. It has the fairly high reflectivity of 15–20%. But the space science community needs the higher reflective coating at 30.4 nm radiation for the future satellite missions, especially for the small satellite to reduce the size of optics. In this work, for developing a new multilayer mirror for Extreme Ultraviolet Imager (EUVI) onboard the Ionosphere–Mesosphere–upper Atmosphere–Plasmasphere mapping Satellite (IMAP), we report the performance of a multilayer consisting of Mg/SiC and the aging in reflectivity under atmosphere and vacuum conditions.

概 要

我々は超高層大気撮像観測小型衛星（Ionosphere–Mesosphere–upper Atmosphere–Plasmasphere mapping Satellite : IMAP 衛星）に極端紫外光撮像装置（Extreme UltraViolet Imager : EUVI）を搭載しプラズマ圏の観測を行う。プラズマ圏を構成する主なイオンのうち He+ と O+ はそれぞれ波長 30.4nm と 83.4nm において共鳴散乱を起こすため、これら両者の波長の光を撮像することでプラズマ圏におけるプラズマ密度分布と電子の総量を見積もることができる。

EUVI は一枚の反射鏡とバンドパスフィルタ、2次元検出器で構成される直焦点反射型望遠鏡である。これまで波長 30.4nm の光を撮像するための光学系には Mo/Si の多層膜反射鏡が主に用いられてきた。しかし、EUVI の小型衛星搭載を実現するためには多層膜鏡の反射率を向上させ、装置全体の小型・軽量化を図る必要がある。そこで今回我々は新たに Mg と SiC の層を組み合わせた多層膜鏡を開発し、波長 30.4nm における反射率を測定した。その結果、入射角 27deg において 34% という従来の多層膜鏡よりもはるかに高い反射率を達成していることを確認した。また、大気中および真空中における Mg/SiC 多層膜反射鏡の安定性を調べ、大気中に保管することで反射率が変化する可能性があることがわかった。

* The University of Tokyo

** Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) / JAXA

1. Introduction

近年、GPS 受信網の展開が進み電離圏における全電子数測定が盛んに行われるようになった。GPS 衛星の遠地点は20,400km にあり、地上受信機を用いた観測手法によって得られる全電子数にはプラズマ圏の寄与が含まれている。電離圏とプラズマ圏の電子密度分布モデルを用いた見積りでは、プラズマ圏の電子が地上で観測される全電子の10%–25%と無視できないほどの割合を占めることが推定されている。それにも関わらず、地上からのプラズマ圏観測が困難であるために定量的な検証は未だ不十分であり、GPS を用いて測定された電子は全て電離圏に存在すると天卜的に解釈されてきた。

プラズマ圏を構成する主なイオンのうち He+ と O+ はそれぞれ波長30.4nm と83.4nm において共鳴散乱を起こすため、衛星からこの光を撮像しプラズマ圏の大局的な構造を理解しようという技術が1990年代後半から急速に発展した [1]。1998年に日本ののぞみ衛星が地球を周回した際に初めて He+ 共鳴散乱光 (30.4nm) によるプラズマ圏の撮像に成功し、プラズマ圏撮像技術が確立した [2], [3]。また2000年に NASA が打ち上げた IMAGE 衛星 EUV 撮像器からの観測により、プラズマ圏の様々な大局的・局所的構造や変動の様子などが明らかになった [4]。さらには今後のプラズマ圏観測として、2007年に日本が打ち上げる月周回衛星 SELENE からの撮像が計画されている [1]。

我々は超高層大気撮像観測小型衛星 (Ionosphere–Mesosphere–upper Atmosphere–Plasmasphere mapping Satellite : IMAP 衛星) に極端紫外撮像装置 (Extreme UltraViolet Imager : EUVI) を搭載しプラズマ圏の観測を計画している。IMAP 衛星は広視野・多波長の光学撮像観測によって、中間圏、熱圏、電離圏、プラズマ圏の4つの領域からなる地球超高層領域の3次元構造を測定することを目的としている。EUVI 撮像器による観測が実現すれば、これまで誤差として扱われてきたプラズマ圏におけるプラズマ密度分布と電子の総量を明らかにでき、GPS を用いた電離圏における全電子数測定への寄与を検証することができる。

EUVI の小型衛星搭載を実現するために最も大きな問題となるのは観測器の大きさである。EUVI の場合、主に多層膜反射鏡の口径によって観測器全体の大きさが決まり、小型化を図るには反射率を向上させる必要がある。そこで今回我々は新たに Mg と SiC の組み合わせを用いた多層膜鏡を開発し、波長30.4nm における反射率を測定した。また、大気中および真空中における Mg/SiC 多層膜反射鏡の安定性を調べた。本論文ではそれらの測定結果について報告する。

2. 極端紫外光撮像装置 (EUVI)

2.1. EUVI の構成

EUVI は一枚の反射鏡とバンドパスフィルタ、2次元検出器で構成される直焦点反射型望遠鏡である。EUVI の概要図を図1に示す。反射鏡には多層膜コーティングを施し、波長30.4nm における反射率を高める。バンドパスフィルタには Al/C 薄膜フィルタを用い、波長30.4nm の光を選択する。検出器はレジスティブ・アノード付き MCP を用いる。視野角 15° 、角度分解能は 0.1° である。

2.2. 多層膜反射鏡

極端紫外光は物質に対し非常に反射しにくいいため、明るい直入射光学系を建造することは困難であった。こうした問題を解決したのが多層膜反射鏡である。多層膜反射鏡は基板の上に重元素と軽元素を一定の厚みで交互に積層し、干渉を利用して反射率を向上させることができる。図2は多層膜反射鏡の原理を表している。多層膜鏡が実用化されたことで波長30.4nm における反射率が従来の反射鏡より一桁以上も向上し、これが突破口となって1990年代後半に極端紫外光撮像技術が確立した。

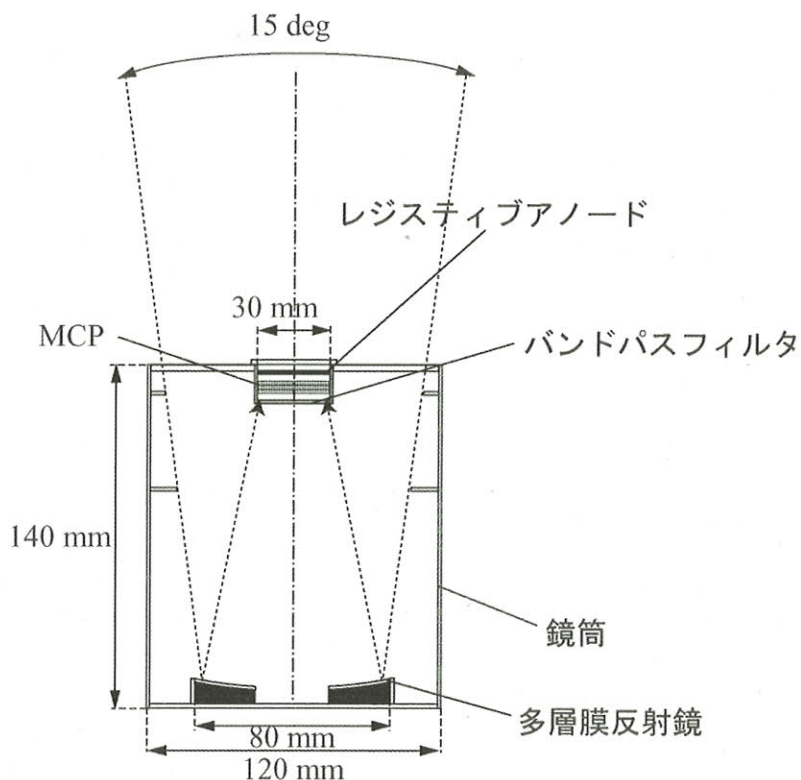


図1. EUVIの概要図。一枚の反射鏡とバンドパスフィルタ、2次元検出器からなる直焦点反射型光学系をもつ。

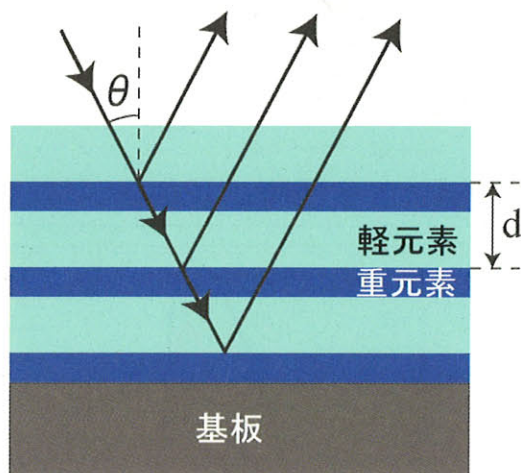


図2. 多層膜反射鏡の原理。基板上に重元素と軽元素を交互に積層し、干渉を利用して特定の波長における反射率を高めることができる。

国内外を問わず、波長30.4nmの光を対象とした多層膜反射鏡にはMoとSiの組み合わせが一般的に用いられてきた(例えばのぞみ衛星やSELENE衛星)。Mo/Siは極端紫外領域において高い反射率を達成できる上に、劣化が少なく安定性が非常に高いためである。図3にMo/Si多層膜鏡およびAu単層膜鏡の反射率を示す。Auは単層でも極端紫外領域における反射率が比較的高い物質であるが、それでも波長30.4nmにおいて5%程度の反射率しか得られない。それに対し、Mo/Si多層膜鏡はその4倍近いおよそ20%の反射率を達成している。

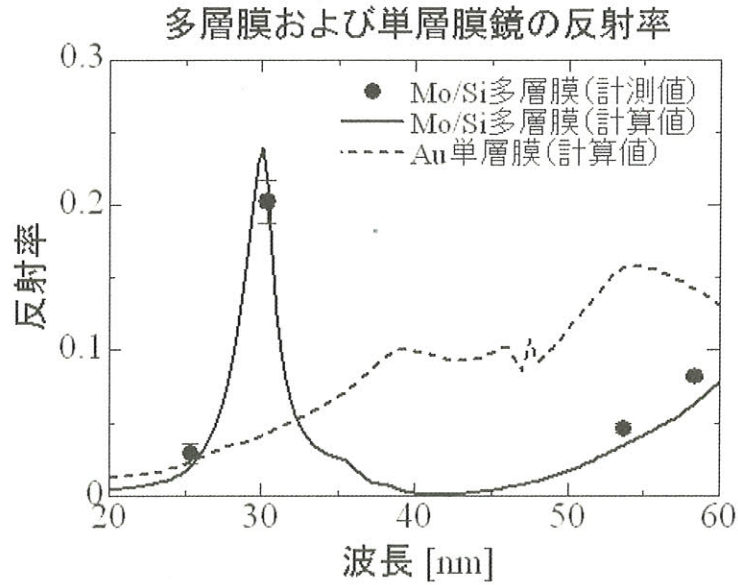


図3. Mo/Si 多層膜および Au 単層膜鏡の反射率. 波長30.4nm において Mo/Si 多層膜鏡の反射率がおよそ20%であるのに対し, Au 単層膜鏡はせいぜい5%程度の反射率しか得られない.

3. Mg/SiC 多層膜反射鏡

EUVI を小型衛星に搭載するためには, 従来の Mo/Si よりもさらに高い反射率をもつ多層膜鏡を開発し小型・軽量化を図る必要がある. そこで我々はまず様々な元素の組み合わせで構成される多層膜鏡の波長30.4nm における反射率を計算し, より高い反射率を達成し得る多層膜の組み合わせを探した (図4). 図4から明らかなように Mg と SiC の組み合わせによる多層膜鏡の反射率 (黒線) が最も高く, 波長30.4nm においておよそ60%の反射率を達成できる. この反射率は従来の Mo/Si 多層膜鏡の反射率 (図4の緑線) と比較して, 2倍以上に相当する. すなわちこの鏡を実現できれば, 口径を Mo/Si 多層膜反射鏡の $1/\sqrt{2}$ に小さくできるはずである.

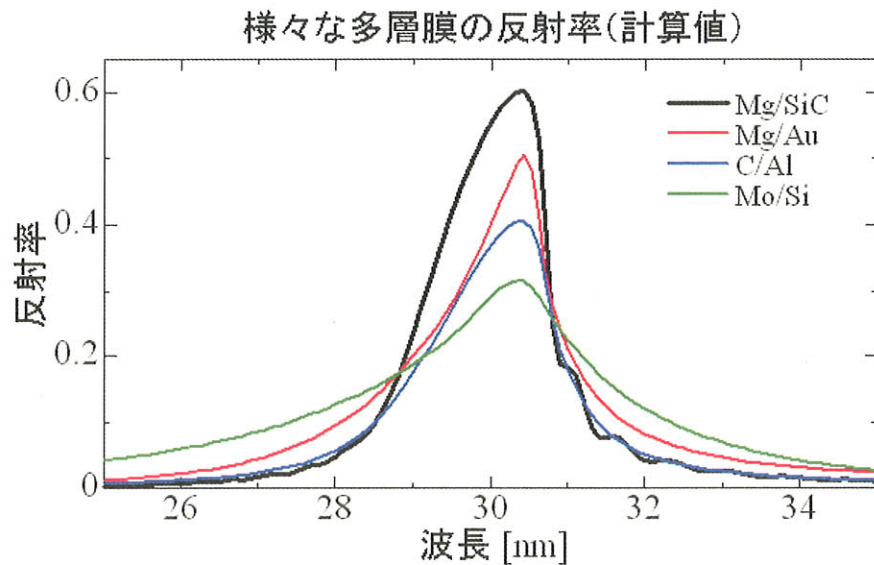


図4. 様々な元素の組み合わせで構成される多層膜鏡の反射率の計算結果. Mg と SiC の組み合わせ (黒線) が波長30.4nm において最も高い反射率 (60%) を達成でき, これは従来用いられてきた Mo/Si 多層膜反射鏡 (緑線) に比べて2倍以上高い反射率である.

しかし、直入射鏡の性能を評価するのは容易ではない。なぜならば、真空チェンバー内の配置を考えた場合、測定に用いる検出器が大きさを持つため、鏡への入射光を遮ってしまうからである。そこで多層膜鏡で起こる干渉の原理 ($\sin \theta \propto \lambda$) から、波長 (λ) を掃引せずとも、入射角 (θ) を変えることで実効的に波長毎の反射率を計測できる原理を用い開発を進めた。今回製作した Mg/SiC 多層膜反射鏡の各パラメータを表 1 に示す。また Mg/SiC 多層膜鏡の波長 30.4nm における反射率の計算値を層厚ごとに示したグラフを図 5 に示す。

表 1 製作した Mg/SiC 多層膜反射鏡のサンプルに関するパラメータ

積層数(N)	最上層	層厚(2d)	SiC/2d	反射率が最大となる入射角(計算値)	反射率(計算値)
40	SiC	18.08nm	0.3	28.5deg	36.5%

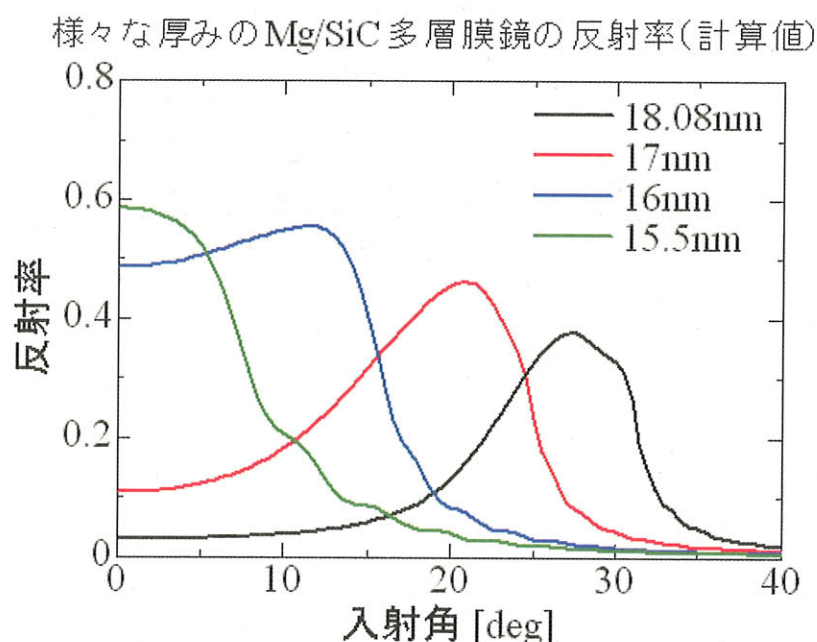


図 5. 各層厚における Mg/SiC 多層膜鏡の波長 30.4nm での反射率(計算値)。今回製作したサンプル(層厚 18.08nm)の反射率特性は黒線で示されており、入射角 28.5deg で反射率が最大となり 36.5% が得られる。

4. 反射率測定

Mg/SiC 多層膜鏡のサンプルを用いて波長 30.4nm における反射率を測定した。測定には宇宙科学研究本部にある極端紫外光校正設備を用いた。ガスフローランプを用いて He ガスを発光させ回折格子分光器で波長を選択し、波長 30.4nm の光を真空チェンバーに導入した。また入射光は分光器の出射スリットおよびチェ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。検出器にはマイクロチャンネルプレート (MCP) を使用し、検出器と Mg/SiC 多層膜鏡のサンプルをそれぞれ独立に回転させることで反射率の入射角依存性を調べた。図 6 に実際の反射率測定の実験構成を示す。

さらに、Mg/SiC 多層膜鏡の大気中および真空中における反射率の変化を調べた。Mg/SiC 多層膜鏡のサンプルを大気中および真空中に交互にそれぞれ数週間ずつ保管し、反射率の測定を繰り返した。ここでは、真空中に保管する際は真空度を 1×10^{-4} Pa 以下とした。表 2 に各測定の日付と測定までのサンプルの保管環境を示す。

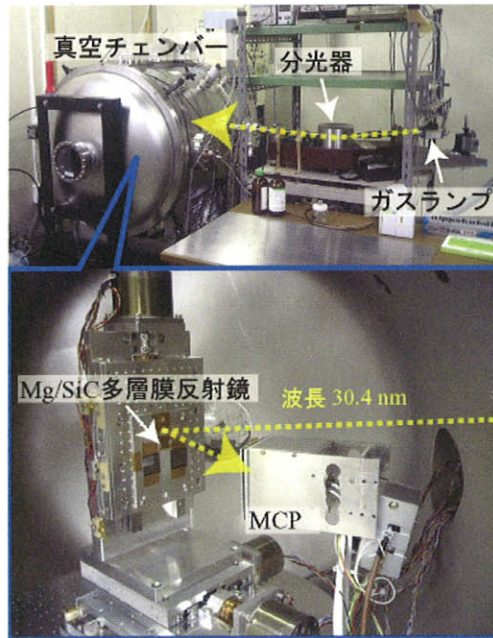


図 6. 反射率測定の実験構成. 測定は宇宙科学研究本部にある極端紫外光較正施設で行った. ガスフローランプに He ガスを流し, 回折格子分光器を用いて波長30.4nm の光を真空チェンバーに導入する. 検出器には MCP を使い, 反射鏡と検出器をそれぞれ独立に回転させることで反射率の入射角依存性を測定できる.

表 2 反射率測定の日付と測定までの保管環境

測定を行った日付	測定までの保管環境	保管期間
1 回目：2005年12月17日	大気中	17日間
2 回目：2006年01月04日	真空中	
3 回目：2006年03月22日	大気中	48日間
4 回目：2006年04月13日	真空中	21日間

5. 測定結果

各反射率測定の結果を図 7 および表 3 に示す. これらの測定結果から, 今回作成した Mg/SiC 多層膜鏡は波長 30.4nm の光に対し34%の反射率を得られることを確認できた. この反射率は計算値とほぼ一致しており, 図 5 のように直入射用の Mg/SiC 多層膜鏡ならば反射率およそ60%を達成可能であることを示唆している.

また, 図 7 から明らかなように, 真空中に保管した場合は反射率にほとんど変化は見られない (1 回目→2 回目, 3 回目→4 回目). この結果は Mg/SiC 多層膜反射鏡が真空中においては安定であることを示している. しかし大気中に保管した場合, サンプルの反射率が大きく変化しているのがわかる. サンプルの製作後から 1 回目の測定まで大気中に保管していたため, 1 回目の測定ではサンプルの反射率は計算値に比べてはるかに低下している. しかし一方で, 2 回目と 3 回目の測定結果を比較すると, 大気中に保管したことによりサンプルの反射率は向上している. こうした反射率の変化を引き起こす原因の一つの可能性としては Mg と SiC の層間における相互拡散が考えられる [5]. しかし大気中と真空中での振舞いの違いは説明できず, 今後さらに追試を行い検証する必要がある.

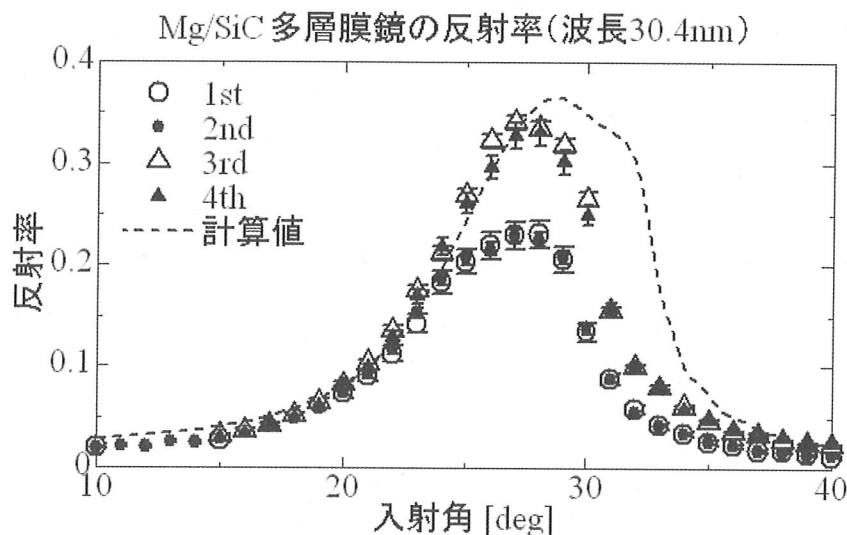


図7. Mg/SiC 多層膜鏡の波長30.4nm における反射率. 各測定前のサンプルの保管環境は表2に示されている. 1回目→2回目および3回目→4回目の測定結果から真空中では反射率はほとんど変化していないことがわかる.

表3 Mg/SiC 多層膜鏡の波長30.4nm における反射率の計算値および測定値

		入射角 [deg.]	反射率 [%]
計算値		28.5	36.5
測定値	1回目: 2005年12月17日	28	23.1
	2回目: 2006年01月04日	27	22.9
	3回目: 2006年03月22日	27	34.0
	4回目: 2006年04月13日	28	33.1

6. まとめ

我々は計算から Mg と SiC の組み合わせを用いた多層膜鏡ならば波長30.4nm において従来の Mo/Si 多層膜鏡に対して2倍以上高い反射率を得られることを導いた. 計算結果に基づいて Mg/SiC 多層膜鏡のサンプルを製作し, 波長30.4nm における反射率を測定した. そして測定結果から今回製作した斜入射用のサンプルは入射角27 deg において反射率34%を達成していることを確認することができた. この結果は直入射用の Mg/SiC 多層膜鏡ならば波長30.4nm においておよそ60%の反射率を達成でき, 口径を $1/\sqrt{2}$ に小型化可能であることを示唆している. また今回の測定から, 真空中では Mg/SiC 多層膜反射鏡はほとんど変化しないことがわかった. 今後は, 大気中における Mg/SiC 多層膜鏡の反射率の変化についてより深く調べる必要がある.

References

- [1] Williams, D. J., E. C. Roelof, and D. G. Mitchell, "Global magnetospheric imaging", *Rev. Geophys.*, 30, 183, 1992.
- [2] Yoshikawa, I., M. Nakamura, M. Hirahara, Y. Takizawa, K. Yamashita, H. Kunieda, T. Yamazaki, K. Misaki, and A. Yamaguchi, "Observation of He II emission from the plasmasphere by a newly developed EUV telescope on board sounding rocket S-520-19", *Journal of Geophysical Research*, 102(A9), 19,897, 1997.

- [3] Yoshikawa, I., A. Yamazaki, K. Shiomi, et al., “Development of a compact EUV photometer for imaging the planetary magnetosphere”, *Journal of Geophysical Research*, 106, pp. 26057–26074, 2001.
- [4] Sandel, B. R., A. L. Broadfoot, C. C. Curtis, R. A. King, T. C. Stone, R. H. Hill, J. Chen, O. H. W. Siegmund, R. Raffanti, D. D. Allred, R. S. Turley, and D. L. Gallagher , “The Extreme Ultraviolet Imager investigation for the IMAGE mission”, *Space Sci. Rev.*, 91, 197, 2000.
- [5] Keski-Kuha, R. A. M., “Layered synthetic microstructure technology considerations for the extreme ultraviolet”, *Applied Optics*, 23, pp.3534–3537, 1984.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-06-019

発行日 平成19年3月30日
編集・発行 宇宙航空研究開発機構
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL : <http://www.jaxa.jp/>
印刷・製本 藤原印刷株式会社

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。
宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター
〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1
TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

©2007 宇宙航空研究開発機構

※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。

