

# 宇宙科学研究所報告

第 124 号

多層膜回折格子の開発  
～水星大気分光観測に向けて～

亀田真吾・佐川英夫・村地哲徳・山崎 敦  
吉川一朗・中村正人

2003年9月

宇宙科学研究所

この報告書は宇宙科学研究所が、研究成果を公表するために発行する  
不定期継続刊行物です。

本報告についてのお問い合わせは下記にご連絡下さい。

宇宙科学研究所 管理部庶務課法規・出版係

多層膜回折格子の開発  
～水星大気分光観測に向けて～

亀田真吾\*・佐川英夫\*・村地哲徳\*・山崎 敦\*\*  
吉川一朗\*・中村正人\*

(2003年7月17日受理)

Development of multilayer gratings  
for spectroscopy of Mercury's atmosphere

By

Shingo Kameda\*, Hideo Sagawa\*, Tetsunori Murachi\*, Atsushi Yamazaki\*\*,  
Ichiro Yoshikawa\*, and Masato Nakamura\*

**Abstract:** An extreme ultraviolet imaging spectrometer (EUIS) for the Mercury mission is under development. The instrument is designed to measure extreme ultraviolet radiations from the atmosphere of Mercury, which could not be identified by the Mariner 10 mission. In this paper, the performance of a Mo/Si multilayer grating, which is newly developed optics to improve the diffraction efficiency in the EUV, is presented. Two types of grating are fabricated, i.e. mechanical ruling and holographic gratings. The results show;

- a) Stray light of the holographic grating is less than that of the mechanical ruling grating.
- b) The efficiency of a Mo/Si multilayer grating is one order higher than that of a gold coated grating.

要 旨

我々は、極端紫外領域にある水星大気の共鳴散乱光を分光する極端紫外分光撮像器 (EUIS:

---

\* 宇宙科学研究所 Institute of Space and Astronautical Science

\*\* 通信総合研究所

Extreme Ultraviolet Imaging Spectrometer) を水星探査計画に向け開発している。本稿では、本観測器開発の鍵となる多層膜回折格子の性能試験について報告する。結論は以下の通りである。

- (a) 機械刻線回折格子とホログラフィック回折格子のどちらが適しているか調査し、その結果迷光の少なさという点からホログラフィック回折格子が優れていると結論した。
- (b) ホログラフィック平面回折格子にMoとSiのペアからなる多層膜コーティングと金コーティングを施し、回折効率を比較した。多層膜回折格子が金単層膜回折格子よりも1桁ほど効率が低いことを確認した。

## 1. はじめに

惑星大気の観測には、原子・分子の輝線スペクトル観測が有効な手法である。水星大気の組成に関しては、Mariner 10号探査機が水星近傍をフライバイした際に、水素、酸素、そしてヘリウムの存在が紫外線分光器で確認され、80年代には地上の望遠鏡がナトリウムとカリウム大気存在を明らかにした [1], [2]。さらに最近、高分散エッセル分光器が可視連続光の中からカルシウム大気の輝線を発見した [3]。不揮発性元素であるカルシウムの存在は水星大気組成の多様性を示唆しており、今後、地上の望遠鏡の整備/改良によりそれが明らかにされるであろう。

一方、地上からでは観測することができない紫外領域の大気観測について言えば、Mariner 10号以来一度も観測は行われていない。特に、極端紫外領域 (30 - 70 nm) には、ナトリウム/カリウムイオンや地球型惑星に普遍に存在する希ガスの輝線が存在する。その為、水星大気の変遷や磁気圏への流出経路の解明を目指す研究者の間ではこれらの光を分光観測する可能性が近年盛んに議論されている。

分解能・感度のより高い紫外領域の分光観測を実現する為、我々はこれまでにBepiColombo計画 MPO衛星 (Mercury Planetary Orbiter) に極端紫外撮像分光器 (EUIS) の搭載を提案してきた [4]。この分光器には多層膜回折格子が用いられ、紫外領域 (30 - 154 nm) の分光と1次元の撮像を同時に行なうことができる。特に極端紫外領域 (30 - 70 nm) で高い効率を持つことが特徴である。

本報告では、この極端紫外分光器 (EUIS) の開発要素である多層膜回折格子について、開発・製造過程と性能評価試験の結果について報告を行なう。

## 2. 回折格子への多層膜の蒸着

金やプラチナ、アルミという紫外領域では汎用的に使われている表面コーティングは極端紫外領域 (30 - 70 nm) では反射率が非常に低いことが知られている。極端紫外領域の反射率の向上をはかる為、今回の水星大気探査ではMo/Si多層膜回折格子の採用を検討している。本章では、ヘリウムイオンの輝線 (30.4 nm) に対する回折効率を向上させる多層膜の膜厚条件、蒸着装置と蒸着方法について述べる。

### 2.1. 多層膜コーティング

多層膜は表面が滑らかな基板の表面に原子番号の大きな元素 (重元素) の層と原子番号の小さな元素 (軽元素) の層を一定の厚みで交互に積層したものである。軽元素の層は透過率が高く反射は起こりにくい。逆に重元素の層は入射した光と相互作用 (Thomson散乱) を起こしやすい。そのため、重元素の層とその下の重元素の層からの回折光との間で干渉し、層の間隔に対応したBragg条件を満たす特定の波長が強めあう。

本研究では、多層膜の蒸着物質としてMoとSiを用いた。Mo/Si多層膜は多層膜反射鏡で極端紫外領域において高い効率を持つ実績があり、また成膜後も安定して存在する。入射光波長 30.4 nm入射角  $31^\circ$  でBragg条件を満

たす様に膜厚を決定した。実際には、MoとSiの膜厚の比は1：3とし、Mo 5nm, Si 15nmの重元素・軽元素からなるペアを10層、積層した。

## 2.2. スパッタ蒸着装置を用いた成膜法

回折格子への蒸着は、通信総合研究所電磁波計測部門宇宙天気システムグループが有するスパッタ蒸着装置を用いて行った。今回の試作に用いたのは、Richardson社製のブレード角 $8.38^\circ$ ・ブレード波長250nmと設計されたブレード型機械刻線平面回折格子と、ブレード角 $7.9^\circ$ ・ブレード波長229nmと設計されたブレード型ホログラフィック平面回折格子である。共に刻線数は1200本/mm、大きさ $15 \times 15 \times 3$ mmである。この回折格子にMo/Si多層膜コーティングを施した。また、Mo/Si多層膜の効果を確認する為、Auコーティングの回折格子も作成した。(以降、特に断らない限りMo/Si多層膜コーティングを施した回折格子を「多層膜回折格子」、Auコーティングを施した回折格子を「単層膜回折格子」と略記する)

蒸着装置は、MoやAuの蒸着に対向型直流マグネトロンスパッタ装置を、Siの蒸着に高周波マグネトロンスパッタ装置を採用した。スパッタリングは以下のような原理で行われる。 $3 \sim 5 \times 10^{-1}$  Pa程度でArガスをグロー放電させる。生成した正イオンを陰極効果電圧で加速して、負の電位を持つターゲット (Mo, Au或いはSi) に衝突させる。これによりターゲット表面から原子をはじき飛ばして、基板へ積層させる。また、どちらの装置もマグネatron方式を採用しており、ターゲットと $Ar^+$ の衝突時に生成される二次電子を磁場で捕獲し、イオン化を促進できる。(図1)

多層膜の成膜には、対向型直流マグネトロンスパッタ装置と高周波マグネトロンスパッタ装置(図2)を交互に使用した。

また、回折格子に蒸着した物質と多層膜の膜厚、蒸着レートおよび蒸着時の真空度は表1の通りである。

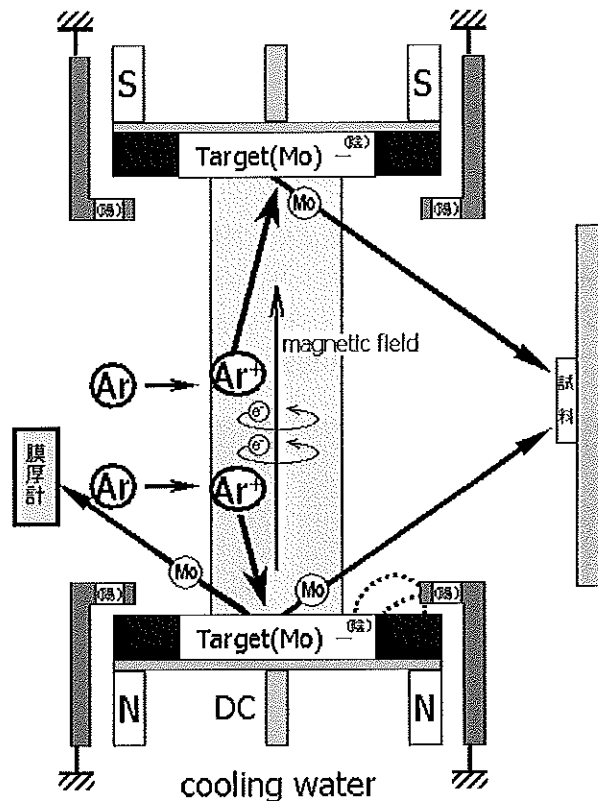


図1 真空蒸着概念図(対向型直流マグネトロンスパッタ)  
上下のターゲットが陰極。ターゲット周りのGNDが陽極。

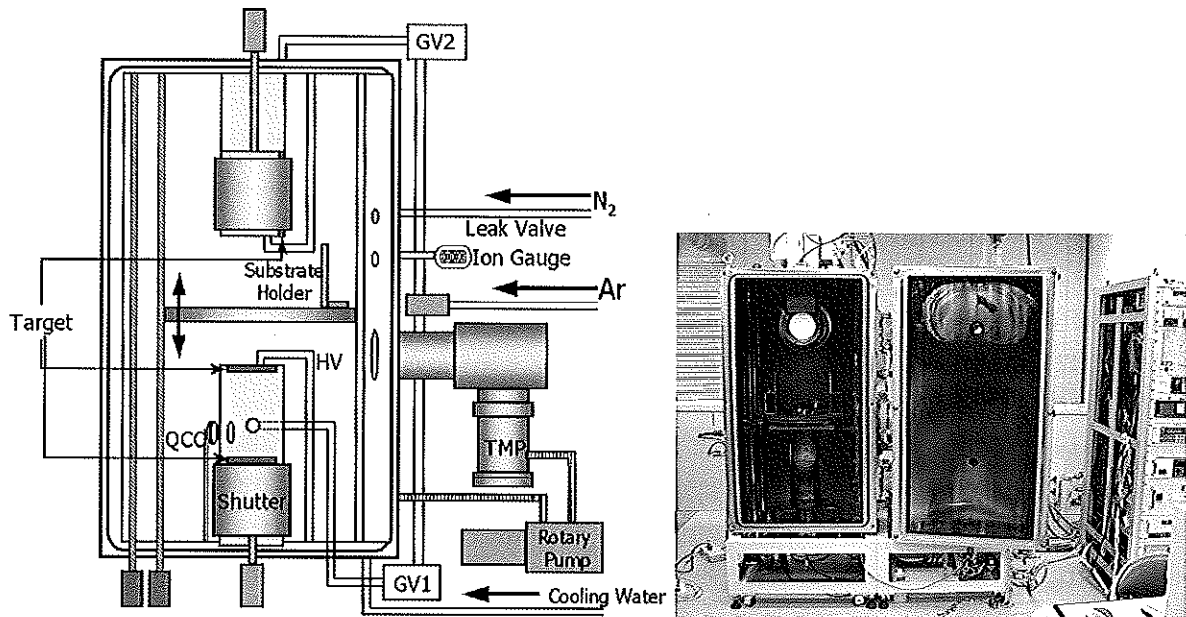


図2 対向型マグネトロンスパッタ装置と高周波マグネトロンスパッタ装置  
装置の上部が高周波マグネトロンスパッタ装置，下部が対向型直流マグネトロンスパッタ装置となっており，Mo蒸着時には下部，Si蒸着時には上部にサンプルを交互に移動させて多層膜を形成させていく。

表1 回折格子の蒸着パラメータ

蒸着物質	膜厚	蒸着レート	真空度 (Pa)
Mo/Si	{Mo(5nm)/Si(15nm)}×10層	Mo:0.3nm/sec Si:0.2nm/sec	$3 \times 10^{-1}$
Au	Au(160nm)×1層	0.08nm/sec	$5 \times 10^{-1}$

多層膜回折格子の性質は，回折格子の溝の刻線数とブレード角とその表面に蒸着した多層膜（膜厚，重元素比）で決まる。多層膜の影響を知るために蒸着を行う際にシリコンウェハ基盤を回折格子の隣に置き（図3），回折格子への成膜と同時にシリコンウェハ上に多層膜ミラー（リファレンスミラー）を製造する。このリファレンスミラーの特性を調べることで，回折格子に蒸着された多層膜の性質を知ることができる。

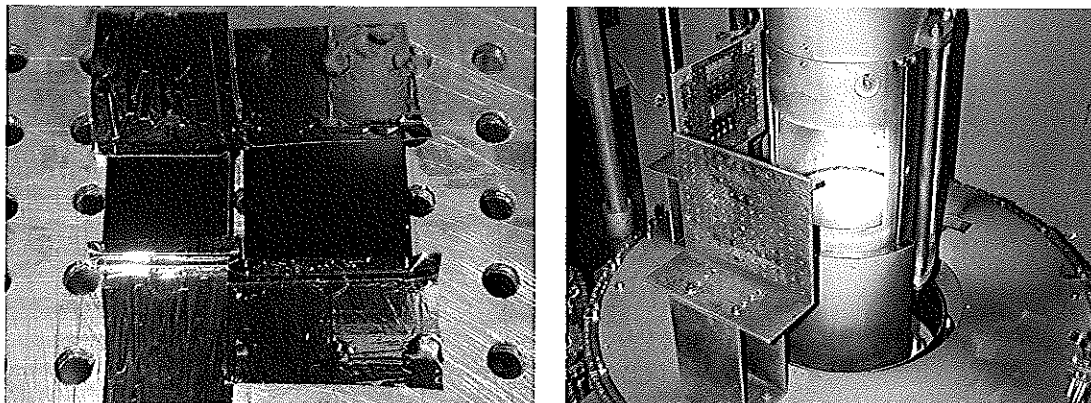


図3 蒸着後の回折格子とリファレンスミラー（左）  
スパッタ装置のサンプル台に取り付けられている様子（右）。

### 3. 回折格子の形状と迷光

機械刻線回折格子とホログラフィック回折格子の蒸着前後の溝形状を宇宙科学研究所廣瀬研所有の原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope：AFM）を用いて測定した。また、強め合う条件を満たす回折光と回折光の間に分散された迷光の強度を計測することによりS/N比を求めた。これらの測定から、

- (1) 蒸着の前後で回折格子の溝形状はほとんど変化しない。
- (2) ホログラフィック回折格子は機械刻線回折格子より溝面の面精度が高い為、迷光が少ない。

という結果が得られた。

#### 3.1. 回折格子の溝形状

機械刻線回折格子とホログラフィック回折格子の溝形状をAFMを用いて測定した（図4、図5）。図4と図5を比較すると、ホログラフィック回折格子は機械刻線回折格子に比べ、溝の表面粗さが著しく小さいことが分かる。

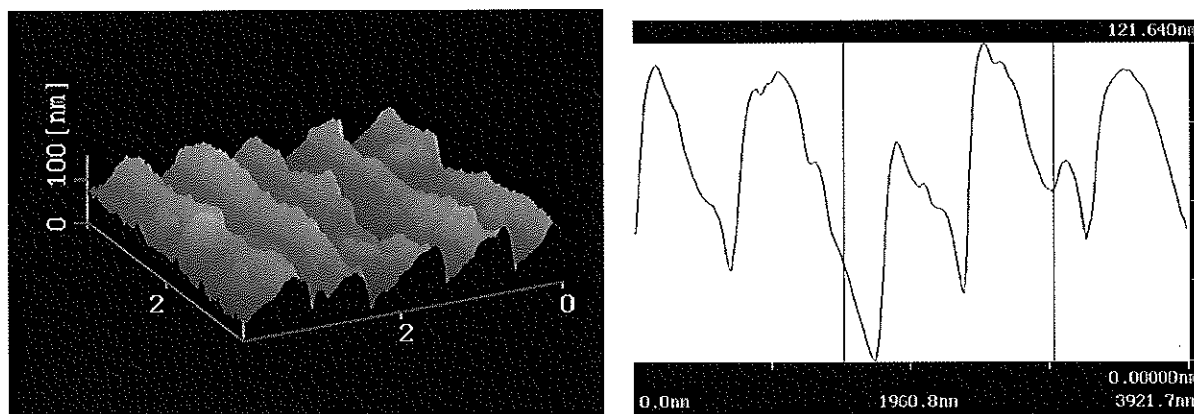


図4 機械刻線回折格子の形状（左）と断面図（右）

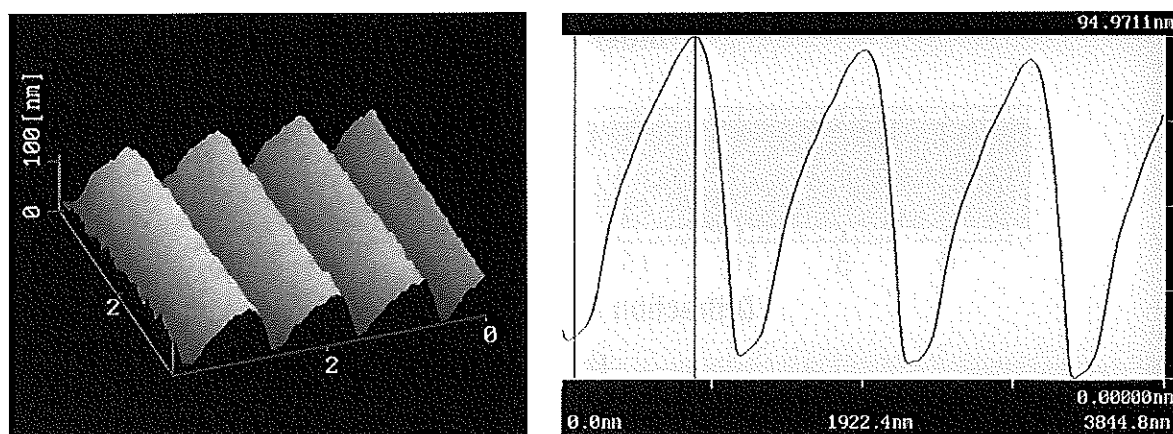


図5 ホログラフィック回折格子の形状（左）と断面図（右）

#### 3.2. 蒸着による溝形状の変化

蒸着後の回折格子の溝形状をAFMを用いて測定した（図6）。

AFMでは、蒸着前後で同一の溝を計測することが不可能である為、溝の形状が具体的にどのように変化したかを追うことはできない。しかし、図6の結果から、両回折格子は蒸着によって溝形状が大きく変化することは無く、総膜厚160～200 nmのMo/Siの多層膜やAu単層膜を蒸着しても、溝形状に大きな変化をもたらさないこと

が分かる。

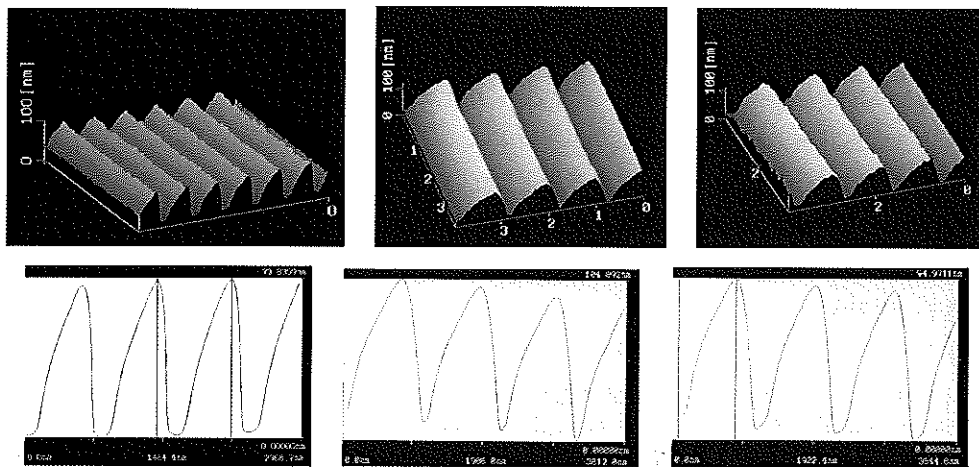


図6 ホログラフィック回折格子の蒸着前後の形状と断面図

(上左) 蒸着前の形状 (上中) Mo/Si多層膜蒸着後の形状 (上右) Au蒸着後の形状  
(下左) 蒸着前の断面 (下中) Mo/Si多層膜蒸着後の断面 (下右) Au蒸着後の断面

### 3.3. 機械刻線回折格子とホログラフィック回折格子の比較

機械刻線回折格子とホログラフィック回折格子の回折光を測定した。入射光する波長は30.4 nmとした。AFMによる測定からはグレーティングのプレーズ角は5.9°前後であると結論できるので、5次光の回折効率がピークを持つ様に入射角を33°とした(補遺②項参照)。本測定は岡崎国立共同研究機構分子科学研究所内UVSOR施設で行った。

図7は、測定から得られた回折光分布である。機械刻線回折格子では8次光、ホログラフィック回折格子では6次光の回折効率が最も高くなった(6次光が強くなる理由については補遺②項参照)。また、機械刻線回折格子

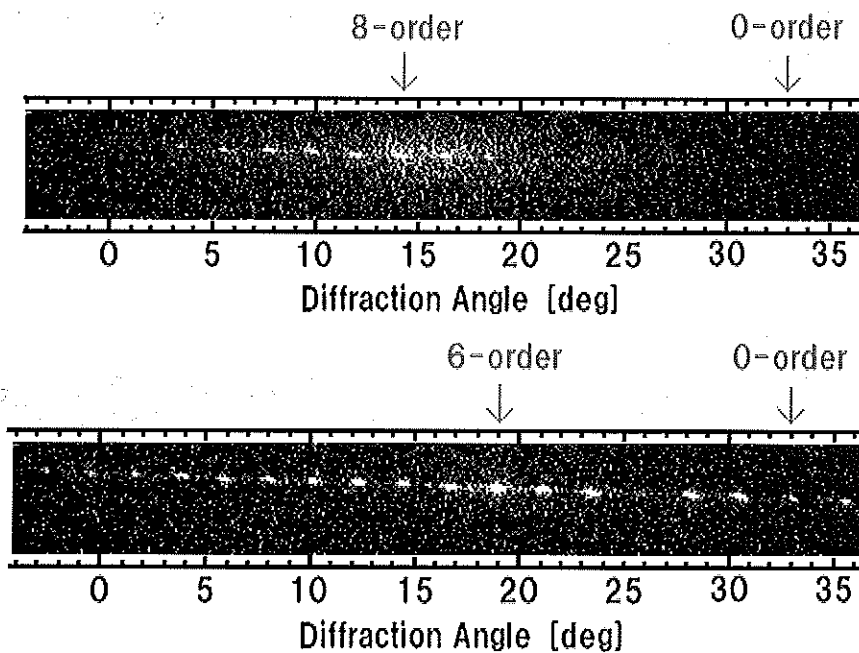


図7 各次数の分散スポット (上段：機械刻線 下段：ホログラフィック)  
横軸は分散角，入射光波長30.4nm，入射角33°



では表面粗さに起因する迷光によって回折光が埋もれているのに対し、ホログラフィック回折格子では機械刻線回折格子に比べ迷光が少なく、回折光がより明瞭に見える。

分光を行う際には、隣り合う回折光間に到達する迷光が少なければ少ない程、S/N比の高い分光測定が可能になる。この為、機械刻線回折格子とホログラフィック回折格子のS/N比を比較する目的で回折光の反射角依存性を測定した(図8)。

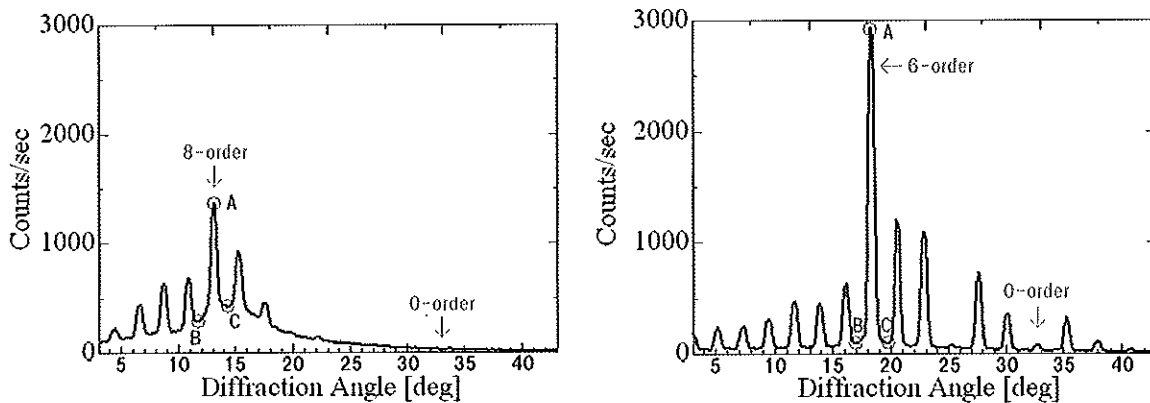


図8 機械刻線回折格子(左)とホログラフィック回折格子(右)の反射角スキャン  
 横軸: 回折角 縦軸: ストレージリングの電子ビームカレントで規格化したカウント数  
 入射光波長: 30.4nm 入射角: 33°

今回測定した2種類の回折格子はブレイズ角が異なるにも関わらず同じ入射角度で測定した。従って回折光の強度だけを比較して回折格子の優劣を議論することはできない。そこで、ここでは回折光に対する迷光の割合を比較することで、優劣を決めてみた。

最も高い回折光強度(図8のA)を表2に示した。さらに、その両隣の次数との間の強度を迷光の強度として、表2に平均値(B区間の最小値とC区間の最小値の平均値)を示した。表2の結果から、回折光に対する迷光の割合は、機械刻線回折格子ではホログラフィック回折格子に比べて8倍程多いことがわかり、ホログラフィック回折格子の方が優れていると結論できる。

表2 機械刻線回折格子とホログラフィック回折格子のS/N

回折格子の製造方法	回折光強度 (A)	迷光強度 ((B+C)/2)	回折光に対する迷光の割合
機械刻線	1330 [cts]	343 [cts]	26%
ホログラフィック	2935 [cts]	93 [cts]	3.2%
機械刻線:ホログラフィック	1:2.2	3.7:1	8:1

以上の結果から、微弱な光の分光測定には、機械刻線回折格子よりもホログラフィック回折格子の方が、回折効率と迷光の少なさという点で優れていると言える。

#### 4. 多層膜回折格子

本章ではMo/Si多層膜コーティング、Auコーティングを施したホログラフィック回折格子の回折効率の測定結果について述べる。Mo/Si多層膜コーティングの蒸着パラメータは入射光波長30.4nm、入射角29～33°で反

射率が高められるように設計しており、実際に入射光波長 30.4 nm, 入射角 22 ~ 49° では多層膜回折格子の方が単層膜回折格子より数倍高い回折効率を持つという結果を得た。

#### 4.1. 多層膜反射鏡

光学系の反射率を極端紫外領域で稼ぐため、多層膜コーティングの成膜技術が近年急激に発展してきた [4]。図9はMo/Si多層膜反射鏡, Au単層膜反射鏡, Pt単層膜反射鏡の波長に対する反射率の理論曲線である。各反射鏡は

Au, Pt単層膜反射鏡 Au, Ptを 160 nm

Mo/Si多層膜反射鏡 [Mo 5 nm/Si 15 nm] × 10 層

(波長 30.4 nm, 入射角 29 ~ 33° で反射率がピークを持つように設計)

として計算を行った。紫外領域では反射率が高いと言われる元素 (AuやPt) に対し, Mo/Si多層膜は2倍以上の反射率を持つということが分かる。

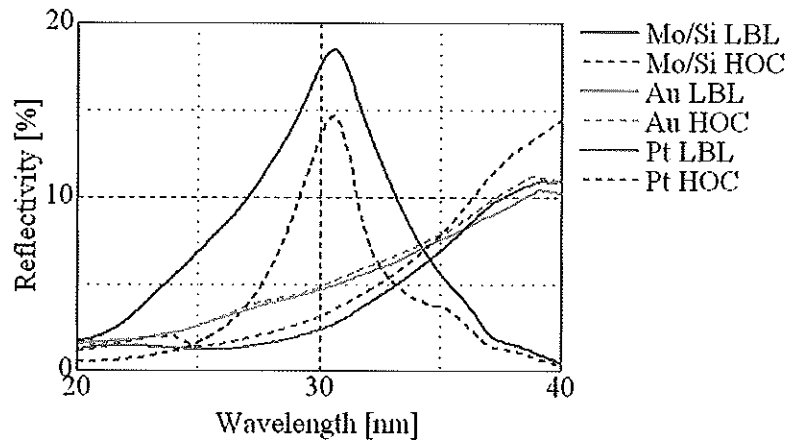


図9 Mo/Si多層膜反射鏡, Au単層膜反射鏡, Pt単層膜反射鏡の反射率の理論曲線

横軸：波長 縦軸：反射率 入射角：31°

実線は光学定数としてLawrence Barkley National Laboratoryの値, 破線はHandbook of Optical Constantの値を使った計算値である。

回折格子への成膜と同時に制作したりファレンスミラーの較正結果を図10に示す。本測定は宇宙科学研究所 EUV施設にて行った。入射光の波長を一定 (30.4 nm) にし, 入射角依存性を調べた。反射率はMo/Si多層膜反

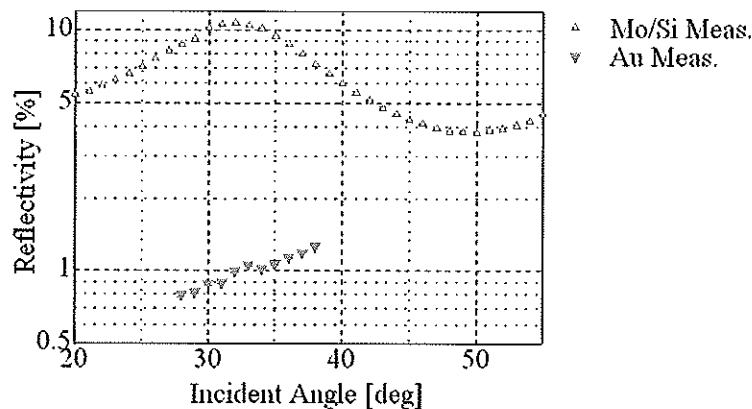


図10 リファレンスミラー (Mo/Si 10層) の反射率

横軸：入射角 縦軸：反射率 入射光波長：30.4nm

射鏡がAuの反射鏡を上回っており、入射角  $31^\circ$  ではMo/Si多層膜反射鏡の反射率がAuの反射鏡の10倍程度になっていることが確認できた。

#### 4.2. 多層膜回折格子と単層膜回折格子の比較

今回の試作研究に採用したホログラフィック回折格子は入射光波長  $30.4\text{ nm}$ 、入射角  $33^\circ$  で使用した場合には6次光の回折光が最も強くなる（第3章3.3項図8右参照）。そこで、入射角  $33^\circ$  付近で6次光の強度を測定し、多層膜回折格子と単層膜回折格子を比較してみた。本測定も宇宙科学研究所EUV施設にて行った。入射光波長は  $30.4\text{ nm}$ とし、入射角を  $20^\circ$  から  $50^\circ$  まで  $1^\circ$  ずつ変化させ、6次光の回折効率を計測した結果を図11に示す。入射角  $22 \sim 49^\circ$  における6次光の回折効率は、多層膜回折格子の方が単層膜回折格子より高く、入射角  $37 \sim 40^\circ$  では5倍以上になることを示している。

リファレンスマirrorが反射率のピークを持つ入射角は  $32^\circ$  であり（図10参照）、多層膜回折格子の回折効率がピークを持つ入射角とは異なる。これは、回折格子の溝の斜面がブレイズ角の分だけ傾いている為であり、近似的には以下の式が成り立つ。

$$\{\text{ミラーの反射率ピークの入射角}\} + \{\text{ブレイズ角}\} = \{\text{回折効率ピークの入射角}\}$$

以上の結果から、適切な膜厚で成膜されたMo/Si多層膜回折格子は、特定の波長（ $30.4\text{ nm}$ ）で高い回折効率をもつことが確認できた。

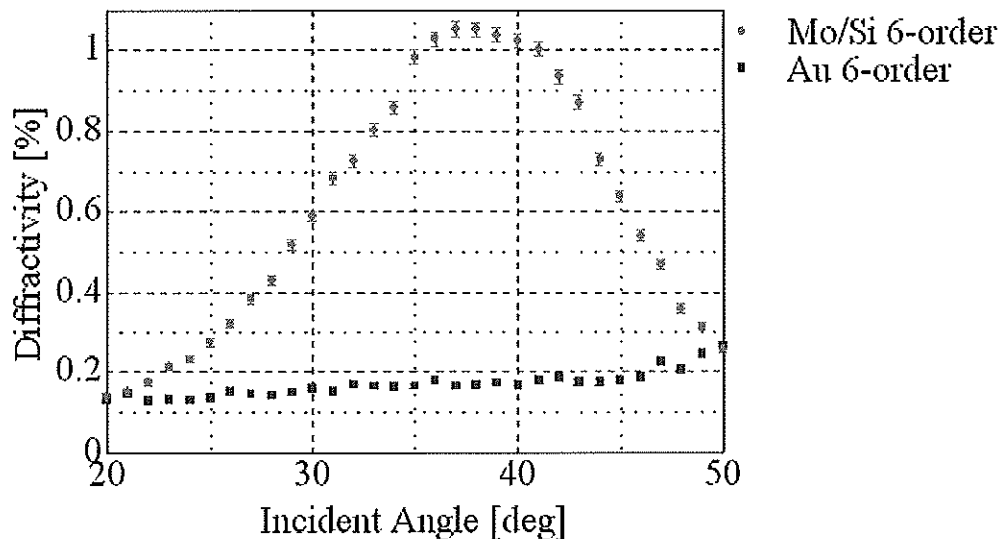


図11 6次光の回折効率 多層膜回折格子（赤）と単層膜回折格子（青）  
入射光波長 $30.4\text{ nm}$

## 5. ま と め

我々は、水星大気分光撮像を行なう極端紫外分光器（EUIS）の開発をしている。本稿では開発の鍵となる多層膜回折格子について開発の現状を報告した。

まず、機械刻線回折格子とホログラフィック回折格子の回折光の強度と迷光の強度を調査した。機械刻線回折格子はホログラフィック回折格子に比べ、約8倍迷光が多いことが分かり、このことは機械刻線回折格子には特有の尖りがあることから理解できる。水星探査計画ではどれだけ暗い光までを検出できるかが観測の成否を決めるために、ホログラフィック回折格子を採用することが望ましいことがわかった。

次に、Mo/Si多層膜とAu単層膜を成膜した回折格子の回折光を測定した。この測定から極端紫外領域においては、Mo/Si多層膜回折格子の効率の方が約10倍高くなることがわかり、多層膜回折格子の有効性を確認した。

以上から、水星大気観測には、ホログラフィック製法により作られた回折格子を採用し、Mo/Si多層膜を適切な膜厚で真空蒸着することがのぞましいという結論を得た。

## 補 遺

Mo/Si多層膜回折格子の回折効率を決める主なパラメータとして、

- ① 多層膜の周期長
- ② ブレース角
- ③ 溝本数

の3つが挙げられる。

そこで、今回測定したホログラフィックMo/Si多層膜回折格子について、これら3つの条件を詳細に調べ直し、回折効率の理論値を再計算した。

### ① 多層膜の周期長

Mo/Si多層膜回折格子の蒸着の際に作成したリファレンスミラーの反射率測定結果を図12に示す。

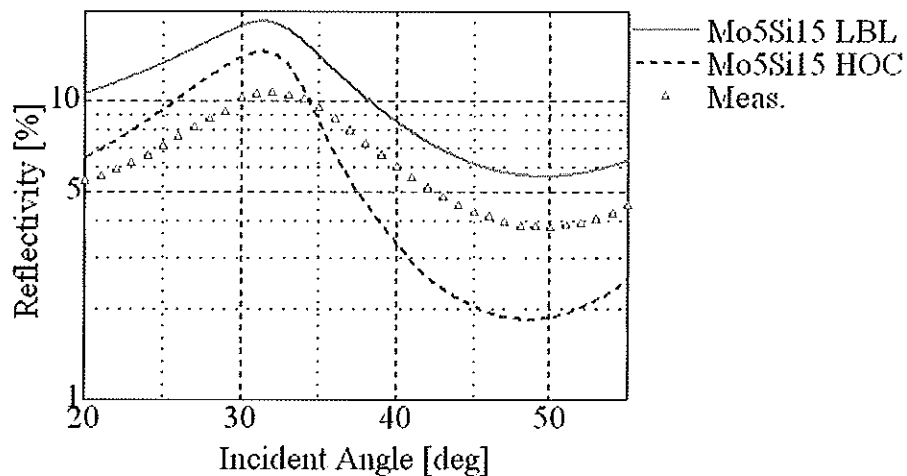


図12 Mo/Siリファレンスミラーの反射率(△)と[Mo5nm/Si15nm]×10層の多層膜反射鏡の反射率の理論値  
入射光波長は30.4nmで、測定誤差は△の範囲内。実線は光学定数としてLawrence Barkley National Laboratoryの  
値、破線はHandbook of Optical Constantの値を使った計算値である。

測定結果のプロファイルは、Handbook of Optical Constantによる光学定数を使った計算値よりも、Lawrence Barkley National Laboratory (以降LBL) による光学定数を採用した計算値の方に近いので、以後LBLの光学定数を採用することにする。

測定結果が理論値の60%程度しか達成できていない理由は、(I) 蒸着した物質の密度が一般に知られている値とは異なる (II) 表面の粗さ (III) 10ペアを蒸着した際の膜厚制御の誤差の3つが考えられる。例えば、仮に表面粗さが3nm r.m.s. であるとするこの差は説明できる。

理論曲線の反射率のピークと、測定された反射率のピーク的位置が一致するようなMo/Siの層厚を調べると[Mo 5.06 nm/Si 15.18 nm] × 10層であると分かる(図13)。したがって、多層膜回折格子にも同様に[Mo 5.06 nm/Si 15.18 nm] × 10層の多層膜が蒸着されていると仮定して以降の計算を行った。

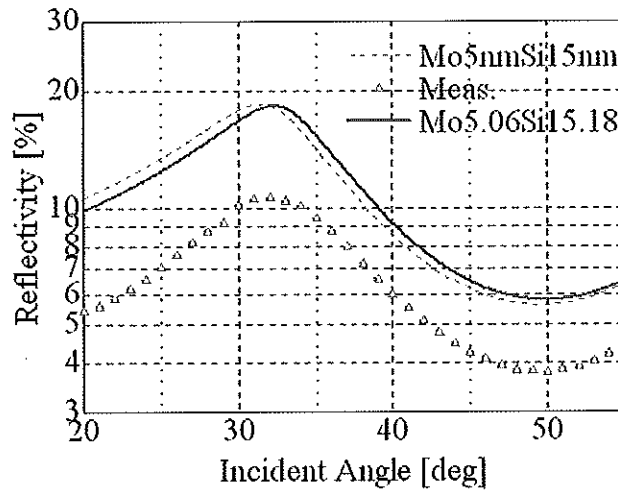


図13 リファレンスミラー反射率測定結果と理論曲線

入射光波長30.4nm 計算にはLBLの光学定数を使用した. 実線は [Mo5.06nm/Si15.18nm] ×10層, 破線は [Mo5nm/Si15nm] ×10層, △は測定結果

② ブレーズ角

今回使用したホログラフィック回折格子のブレーズ角のカタログ値は7.9°である. しかし, AFMの測定結果からブレーズ斜面は直線では無ことが分かった (図14左). そこで, 図14の右図に示すように (1) 5.9°図の赤線で描いた斜面の角度, (2) 6.9°青線で描いた斜面の角度をブレーズ角として再計算をした.

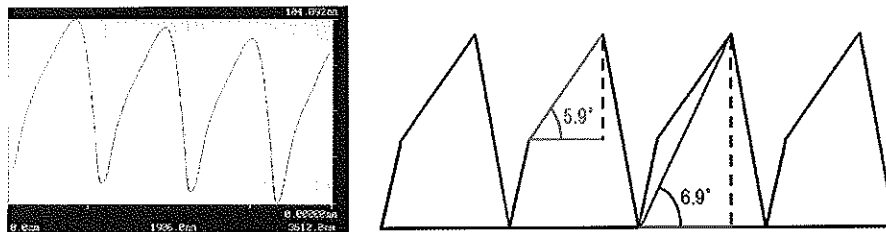


図14 ホログラフィック回折格子のブレーズ角  
(左) AFMによる測定結果 (右) 溝形状と仮定したブレーズ角

ブレーズ角のカタログ値7.9°での各次数の回折効率曲線, ブレーズ角を5.9°と6.9°と仮定した場合の回折効率曲線 (共に計算値) を図15に示す (入射波長はこれ以降30.4nmとする). また, 回折効率が最も高くなる入射角と, 回折光の次数を表3にまとめた. 傾き5.9°の斜面 (図14右図の赤斜面) が実際に光の当たる面積としては広い為, 光の回折に最も影響を与えようと考え, この研究では入射角を33°として較正実験をしてきた. しかし6次光の回折効率が最も高かったことを考慮に入れると, この回折格子のブレーズ角は5.9°, 7.9°であるとするよりは, その平均的な形状である6.9°であるとする方が妥当であると考えられる.

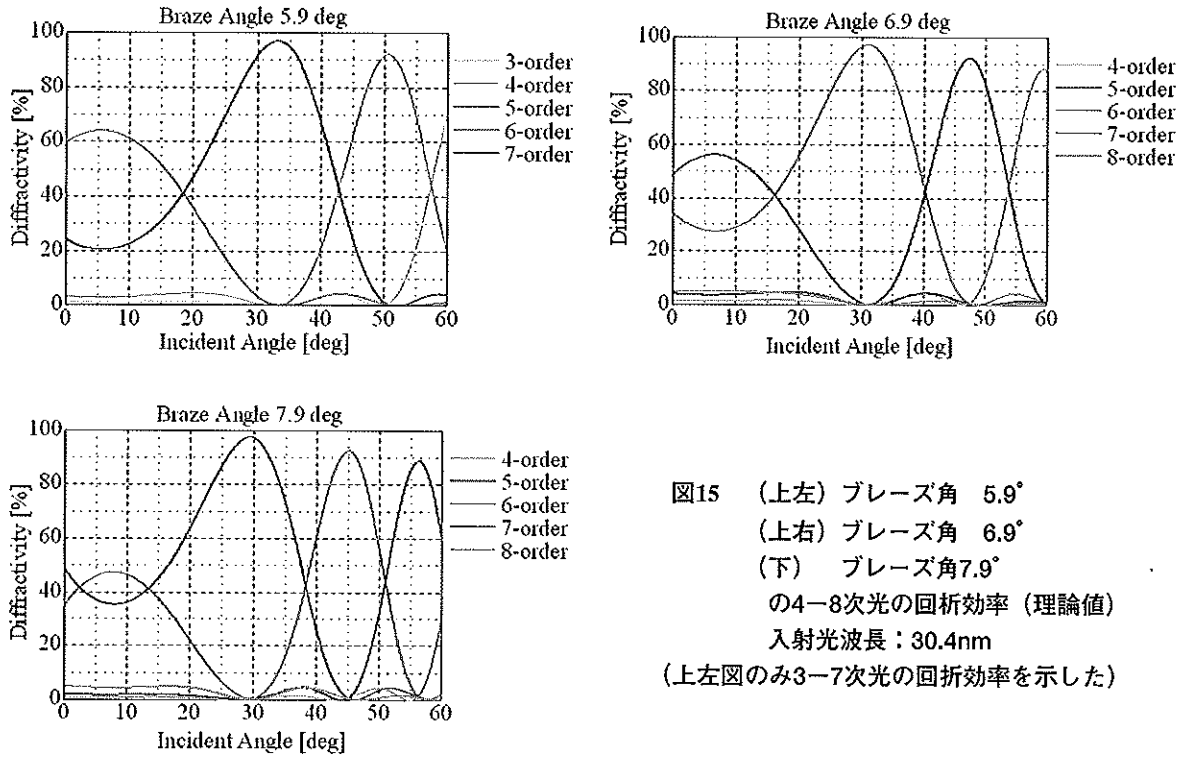


図15 (上左) ブレーズ角 5.9°  
 (上右) ブレーズ角 6.9°  
 (下) ブレーズ角 7.9°  
 の4-8次光の回折効率 (理論値)  
 入射光波長: 30.4nm  
 (上左図のみ3-7次光の回折効率を示した)

表3 ブレーズ角と回折効率がピークを持つ入射角と回折光の次数

ブレーズ角 [deg]	入射角 [deg]	次数
5.9	33	5
6.9	31	6
7.9	29	7

③ 溝本数

回折角を詳細に調べることにより、溝の本数を求めることができる。表4は、入射角を31°とした際の6次光の回折角の計算値と測定値である。今回は回折角の測定精度が十分ではなかったが、溝本数は1150 ± 50 本/mm程度であることがわかる。本研究ではカタログ値が1200 本/mmであることも考慮して、溝本数を1200 本/mmとして回折効率の計算を行なった。

表4 溝本数と6次光の回折角

測定値	1000 本/mm	1200 本/mm	1400 本/mm
17.7 ± 0.5°	19.4°	17.2°	15.1°

以上から、

- ① 多層膜のパラメータ {Mo 5.06 nm/Si 15.18 nm} × 10 層
- ② ブレーズ角 6.9°
- ③ 溝本数 1200 本/mm

を、今回測定した多層膜回折格子のパラメータとして、回折効率を計算すると図16になる。理論値に比べ測定値が小さいのは、成膜した多層膜に表面粗さが大きいためだと考えられる。この図では、測定値と理論値の各次数の回折効率のピークの位置がおおよそ一致しており、特に5次光と6次光の効率曲線はかなりかなり良く一致している。

今回は、AFMというナノテクノロジーを導入することによって、回折効率の計算値の精度を向上させることができた。さらに、回折溝の表面粗さ (r.m.s.) を測定し、それを計算に含めることができれば、回折効率の絶対値の議論も進めることが期待できる。

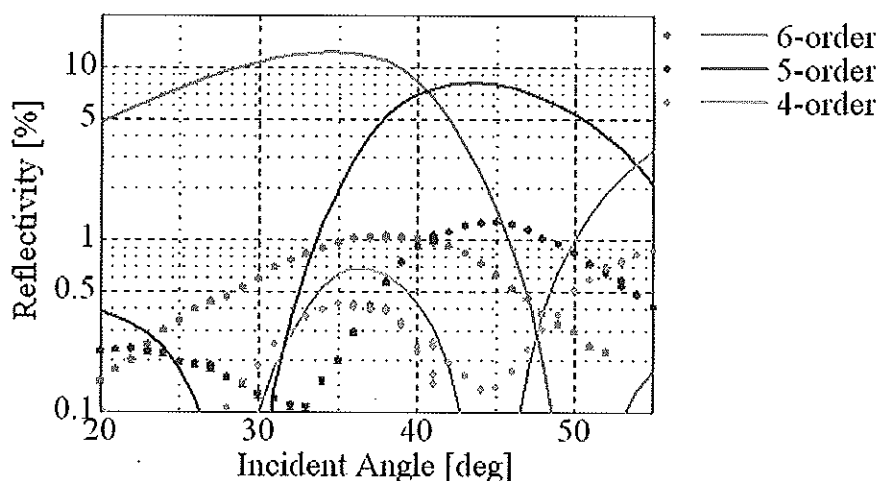


図16 多層膜回折格子の4-6次光の回折効率の測定値(点)とPCgrateによる計算値(実線)  
入射光波長: 30.4nm

#### 謝 辞

分子科学研究所極端紫外光実験施設の中村永研技官と蓮本正美技官には、本実験で使用したBL-5B (ビームライン) での較正試験について御助言を頂いた。ここに感謝する。

宇宙科学研究所廣瀬和之助教授には、回折格子の溝形状をAFMで測定する際に尽力頂いた。ここに感謝する。本研究は平成14年度分子科学研究所共同利用研究の援助を得て実施された。

#### 参 考 文 献

- [1] Potter, A. and T. Morgan, Discovery of sodium in the atmosphere of Mercury Science, Volume 229, pp. 651-653, 1985.
- [2] Broadfoot, A. L., S. Kumar, M. J. S. Belton, and M. B. McElroy, Mercury's atmosphere from Mariner 10: Preliminary results, Science, Volume 185, pp. 166-169, 1974.
- [3] Bida, Thomas A., R. M. Killen, and T. Morgan, Discovery of calcium in Mercury's atmosphere, Nature, Volume 404, pp. 159-161, 2000.
- [4] Yoshikawa, I., A. Yamazaki, T. Murachi, S. Kameda, H. Sagawa, S. Okano, T. Okada, and M. Nakamura, Development of an

Extreme Ultraviolet Imaging Spectrometer for the BepiColombo Mission, *Advances in Space Research*, in press.

- [ 5 ] Yoshikawa, I., A. Yamazaki, K. Shiomi, M. Nakamura, K. Yamashita, Y. Saito, M. Hirahara, Y. Takizawa, W. Miyake, and S. Matsuura, Development of a compact EUV photometer for imaging the planetary magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, Vol. 106, 26057-26074, 2001.



25

## 既 刊 行 物

- 第106号 (1999年12月) S-310-27号機によるDCプローブ測定—ES層中の電子温度について—
- 第107号 (2000年2月) SEPACプロジェクトのエンジニアリングとマネジメント
- 第108号 (2000年2月) 飛行時間法を用いた中性ガス質量分析器の開発
- 第109号 (2000年3月) 金星ホールの生成機構に関する一考察
- 第110号 (2000年8月) 臼田宇宙空間観測所水素メーザ標準周波数時刻システム
- 第111号 (2000年10月) 臼田宇宙空間観測所用Xバンド冷却低雑音増幅器
- 第112号 (2000年10月) 探査機異常監視・診断システム (ISACS-DOC)
- 第113号 (2000年12月) 宇宙用熱制御材料の太陽光吸収率の入射角依存性と半球放射率の温度依存性に関する測定データ
- 第114号 (2001年3月) 科学衛星「はるか」の位相基準信号伝送システム—臼田地上局システムを中心にして—
- 第115号 (2001年3月) 成層圏大気中の多種の微量成分観測を目的とした気球搭載用大気採取装置の研究
- 第116号 (2001年9月) 科学衛星「はるか」における位相基準信号伝送のための衛星搭載システム
- 第117号 (2001年10月) 電磁飛翔体加速装置開発の歩み—(I)
- 第118号 (2001年12月) リングコア磁力計センサの衝撃実験—ペネトレータ型磁力計開発の基礎実験—
- 第119号 (2002年8月) 窒素振動温度測定器の室内実験による校正と解析手法の改良
- 第120号 (2002年11月) BepiColombo/MMO搭載カメラ用光学ガラスの放射線耐性試験
- 第121号 (2003年3月) X線天文観測科学衛星「あすか」および「ASTRO-E」の姿勢制御系
- 第122号 (2003年3月) 新精測レーダ
- 第123号 (2003年3月) 鹿児島宇宙空間観測所 34 mアンテナ科学衛星追跡局

---

## 宇宙科学研究所報告

第124号

2003年9月

発行者 宇宙科学研究所  
〒229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1  
電話(042) 759-8009

印刷社 株式会社 ワークワン  
〒229-1125 神奈川県相模原市田名塩田1-14-2  
電話(042) 778-6765

---