# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

## 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

Stability of Csl-coated Microchannel Plate

桑原 正輝,吉岡 和夫,村上 豪, 鈴木 文晴,疋田 伶奈,吉川 一朗 Masaki KUWABARA, Kazuo YOSHIOKA, Go MURAKAMI, Fumiharu SUZUKI, Reina HIKIDA, Ichiro YOSHIKAWA

2017年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

## 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

桑原 正輝\*1, 吉岡 和夫\*1, 村上 豪\*2, 鈴木 文晴\*1, 疋田 伶奈\*1, 吉川 一朗\*1

### Stability of CsI-coated Microchannel Plate

Masaki KUWABARA\*1, Kazuo YOSHIOKA\*1, Go MURAKAMI\*2, Fumiharu SUZUKI\*1, Reina HIKIDA\*1, Ichiro YOSHIKAWA\*1

#### **ABSTRACT**

A CsI-coated microchannel plate (MCP) is widely used for space missions in the spectral range of extreme ultraviolet (EUV), because of its high quantum efficiency. Although the CsI-coated MCP shows higher efficiency than bare ones, the degradation by deliquescence with the atmospheric water is known to be a serious problem. In this paper, we report the results of the experiment about stability of the CsI-coated MCP. The results show;

- 1) No abrupt decrease of the quantum efficiency (QE) of the CsI-coated MCP through the changes of storage environment was found.
- 2) The QE can be kept with decrease less than 10% by storing under H<sub>2</sub>O atmosphere at less than 0.05 Pa · hours. **Keywords:** Microchannel plate, CsI, Quantum efficiency

#### 概 要

極端紫外光(EUV)による撮像は惑星大気の観測に有効な手段として幅広く行われてきた。マイクロチャンネルプレート(MCP)は極端紫外光検出器として従来から用いられており、入射面に光電物質を蒸着することで感度を向上させることができる。MCPへの蒸着に用いられる光電物質の中でも代表的なものとしてヨウ化セシウム (CsI) が挙げられるが、CsI は潮解性を有しており大気曝露により劣化することが知られている。そのため、CsI を蒸着した MCP を用いる際にはその扱いに注意しなければならず、潮解による劣化を防止するために必要な条件を理解しておくことが重要である。そこで我々は CsI を蒸着した MCP の量子効率の安定性を調べた。その結果、保管環境の変化による量子効率の急激な低下は見られなかった。また、水蒸気への曝露を0.05 Pa・hours以下に抑えることで、量子効率の低下を 10%以内に抑えられることを確認した。

doi: 10.20637/JAXA-RR-16-011/0001

<sup>\*</sup> 平成 28 年 11 月 30 日受付(Received November 30, 2016)

<sup>\*1</sup> 東京大学 (The University of Tokyo)

<sup>\*2</sup> 宇宙科学研究所 宇宙航空研究開発機構(The Institute of Space and Astronautical (ISAS) / JAXA)

#### 1. 序論

地球やその他の惑星の大気は宇宙空間に散逸していることが知られている。その散逸量、空間分布や時間変動を観測的に明らかにすることは、大気散逸のメカニズムや惑星大気の進化過程の解明に役立つ知見を得るために非常に重要なものである。地球外気圏やプラズマ圏を構成する主な粒子である水素、ヘリウム、酸素は共鳴散乱を起こし、極端紫外光領域(EUV)にある特定の波長の光を放出する。これらの光を衛星や探査機から撮像することで、粒子の空間分布や時間変動を把握することができ散逸量の見積もりに繋がる。1990年代後半から EUV 撮像技術が急速に発展し、1998年には日本の火星探査衛星のぞみが世界初のプラズマ圏の撮像に成功した 1.2)。その後、のぞみ衛星の観測を皮切りに、様々な衛星ミッションが地球外気圏やプラズマ圏の撮像に成功している。2000年には NASA の IMAGE 衛星により、プラズマ圏の様々な大局的・局所的な構造や変動の様子が明らかになった 3)。2007年には日本のかぐや衛星が月周回からのプラズマ圏撮像に成功した 4)。2015年には超小型深宇宙探査機 PROCYON の観測により、深宇宙から地球外気圏の全体像を捉えることに成功した。

近年では、上記の PROCYON のような超小型衛星・探査機による惑星探査という新分野の確立が計画されている。日本の惑星探査の今後の発展には、先端的観測装置を開発し宇宙機搭載の実績を積んでいく必要がある。このような先端機器の実証には、超小型衛星・探査機による低予算・高頻度の惑星探査の実現が欠かせない。超小型惑星探査の利点として、開発期間や打上げ頻度が大型計画に比べて圧倒的に短く、開発や運用の結果得られる教訓や経験を次の計画に効率的にフィードバックできることが挙げられる。しかし、衛星・探査機の小型・軽量化に伴い、観測装置にも重量・サイズに対する制約が課されるため、開発に当たり生じるいくつかの問題点がある。その中でも特に重要なのが、観測装置の感度の低下である。EUV 検出器に使用されるような光学系は小型化に伴い集光能力が低下してしまい、その結果観測装置全体としての感度の低下が避けられない。よって重量・サイズの制約を満たしつつ感度向上が可能な手法を確立させる必要がある。

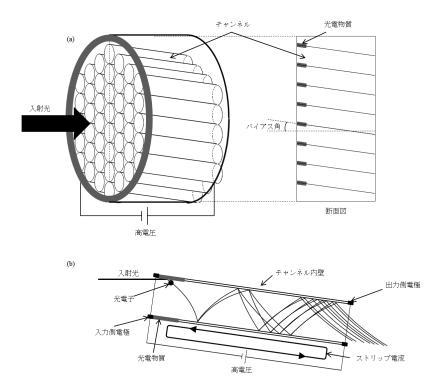
上記の衛星や探査機では極端紫外光検出器としてマイクロチャンネルプレート(MCP)が用いられている。 観測装置の感度向上のために、MCP の量子効率を向上させる試みが成されてきた。その一つとして MCP の 入射面に仕事関数が低く光電子を放出しやすい物質を蒸着するという手法がある。この手法は観測装置のサ イズによらず適用可能である。これまでの衛星ミッションで用いられてきた光電物質の中でも代表的なもの がヨウ化セシウム(CsI)である。MCP の入射面に CsI を蒸着することで量子効率が数倍から数十倍に向上する ため、観測装置の感度向上という点では非常に有効なものである。しかし、CsI は潮解性を有するため大気曝 露により劣化することが知られており、劣化させることなく宇宙空間まで運ぶためにはその保管方法の確立 が必要である。

そこで我々は CsI を蒸着した MCP を製作し、量子効率の安定性を検証した。本論文ではその結果について報告する。

#### 2. マイクロチャンネルプレート (MCP)

#### 2.1 MCP の概要

図1に MCP の構造、電子増倍の模式図を示す。MCP は直径 10 μm程度 の鉛ガラスでできたチャンネルを 束ねた構造をしており、それぞれのチャンネルが独立した電子増倍管として働き、全体で 2 次元の像を得ら れる。MCP の入力側・出力側 2 つの電極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る。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電場中で加速され再び内壁に衝突し、新たな複数の二次電子を生成する。このような二次電子放出がチャンネル内で繰り返されることによって電子数が増幅し、1 枚の MCP で約 10³ 倍の利得を得る。また、複数の MCP を重ねることにより利得を増やすことが可能であるが、増倍される電子はストリップ電流と呼ばれるチャンネル内壁を流れる微弱な電流から供給されているため、ある程度の電荷がチャンネル内に充満すると静電気的な反発力が働き飽和状態になる。そのため、重ねる MCP の枚数を増やしても増倍率は 10³ 倍程度が上限となる。また、電子の反射回数を増やし効率良く増倍するために、全てのチャンネルは入射面に対して一定の角度だけ傾けて配置する。これをバイアス角と呼ぶ。以上の仕組みにより地球周辺の EUV のような微弱な光でも MCP を用いることで、検出可能な強度の電気信号に変換することができる 5°。また、入射面から数μmの深さまで光電物質を蒸着することで仕事関数を低下させ量子効率を向上させることができる。



#### 図1 (a) MCP の構造

鉛ガラスでできた直径 10 μm程度のチャンネルを束ねた構造をしている。チャンネルの入力側・出力側を取り囲む円環部分に高電圧を印加することで、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。全てのチャンネルは入射面に対して一定の角度(バイアス角)だけ傾けて配置する。入射面に光電物質を蒸着することで MCP の量子効率を向上させることができる。

#### (b) 電子増倍の様子を示した模式図 (チャンネル断面図)

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電場中で加速され再び内壁に衝突し、新たな二次電子を生成する。二次電子放出がチャンネル内で繰り返されることによって電子数が増幅する。チャンネル内の電子はストリップ電流と呼ばれるチャンネル内壁を流れる微弱な電流から供給されている。

#### 2.2 光電物質の蒸着

MCP の量子効率を向上させるため、入射面に光電子を放出しやすい物質(光電物質)を蒸着するという手法が広く用いられてきた。例えば、火星探査機のぞみや太陽観測衛星 SOHO の機器には極端紫外光を検出する目的で CsI や KBr を蒸着した MCP を用いてきた <sup>6,7)</sup>。近年では、超小型深宇宙探査機 PROCYON に搭載された観測装置にも CsI を用いた MCP が使用された。表 1 にこれまでの衛星ミッションに用いられてきた代表的な光電物質とその特徴を示す。

Parameters	CsTe	RbTe	CsI	CsBr	KBr	Au
$E_G + E_A [eV]$	4	4.1	6.2	7	7.4	7.4
$E_G + E_A [nm]$	309	300	200	177	167	167
Solar blindness	×	×	0	0	0	0
Stability	×	×	0	Δ	0	0

表1 代表的な光電物質とその特徴[8]

光電物質には様々な種類があり目的に応じて最適なものを選択する必要がある。MCP に蒸着する光電物質には蒸着の容易さ、仕事関数の小ささ、量子効率の安定性及び観測対象とする波長域以外の光に対し低感度であることが求められる。仕事関数はバンドギャップ(E<sub>G</sub>)と電子親和力(E<sub>A</sub>)の和で表され、光電物質が感度を持つ波長域はそのエネルギーに依存する。仕事関数よりも小さなエネルギーの光に対して光電物質は感度を持たない。EUV の観測において紫外から可視領域の光は重大な迷光源になる。これは太陽スペクトルに含まれる紫外から可視領域の光の強度が EUV のそれに比べ桁違いに大きいためである。

上記の条件を考慮すると、CsI は MCP の EUV に対する量子効率向上という観点では適した物質であることがわかる。しかし、CsI は潮解性を有しているため大気に曝露することで化学的・形状的に変化してしまい、その結果向上した量子効率を維持できなくなってしまう<sup>8)</sup>。よって、CsI を蒸着した MCP を用いる際には潮解による劣化を避けるように扱う必要がある。

#### 3. 実験

#### 3.1 MCP の CsI 蒸着面と未蒸着面の量子効率比の測定

MCP に光電物質を蒸着することによる量子効率の向上性能を評価するために、入射面を CsI 蒸着と未蒸着 の 2 つの領域に分けた MCP(図 2)のそれぞれの領域における EUV(50-150 nm)に対する計数を比較した。

図3に実際の量子効率測定の実験構成を示す。光源にはガスフローランプと重水素ランプを用いて輝線及び連続光を入射した。ガスフローランプにはアルゴン、ネオン、ヘリウムの3種類のガスを用いた。光源から発せられた光を回折格子分光器により単色化し真空チェンバーに導入した。単色化された光は分光器の出射スリットおよびチェンバー入口に設置したピンホールによって平行化され、MCPに入射する。MCPを可動ステージ上に設置することで、入射光の照射位置を自在に設定することができる。可動ステージを光軸と垂直に動かすことによりMCPのCsI蒸着面と未蒸着面に交互に光を入射し、それらの計数を測定した。各波長で3回ずつ測定を行い、計数の測定誤差を標準偏差で評価した。以下、CsI蒸着面と未蒸着面の計数の比を量子効率比として扱う。

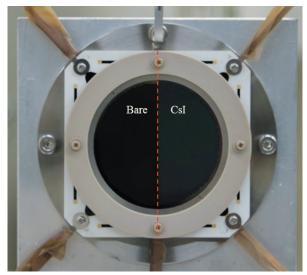
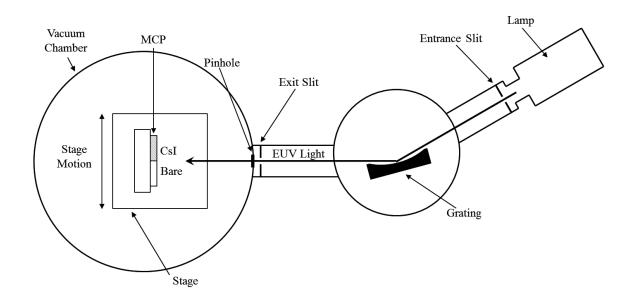


図2 実験に使用した MCP 入射面の半分に CsI を蒸着している。



#### 図3 量子効率比の測定の構成

ランプから発せられた光は回折格子分光器により単色化される。単色化された光は分光器の出射スリットおよびチェンバー入口に設置したピンホールによって平行化され、MCPに入射する。可動ステージを光軸と垂直に動かすことにより MCP の CsI 蒸着面と未蒸着面に交互に光を入射する。

#### 3.2 CsI の安定性確認試験

CsI を蒸着した MCP の保管環境による量子効率比の変化を調べた。MCP の保管環境を変え、量子効率比の測定を計 12 回行った。図 4 に各測定の番号と測定間の保管環境・時間を示す。保管環境には 10,100,1000 Pa と 1 気圧の  $N_2$  雰囲気下を採用した。また、各測定を行う際には真空チェンバー内の真空度を $5 \times 10^{-5}$  Pa以下になるまで真空引きをした。今回の実験では MCP の未蒸着面の量子効率は保管環境により劣化しないと仮定し、量子効率比から CsI の安定性を調べた。

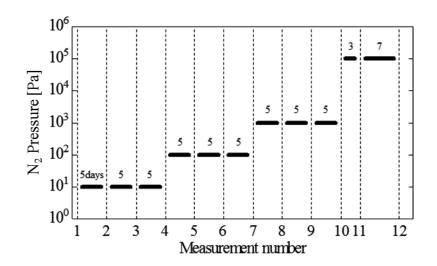


図 4 各測定の番号と測定間の保管環境・時間 チェンバー内を  $N_2$  で満たし、圧力を 10 Pa, 100 Pa, 1000 Pa, 1 気圧と変化させ量子効率比の測定を計 12 回行った。各測 定を行う際には真空チェンバー内の真空度を $5\times 10^{-5}$  Pa以下になるまで真空引きをした。

#### 4. 実験結果

#### 4.1 CsI の蒸着による MCP の量子効率向上性能の確認

Measurement 1 で得られた量子効率比を図 5 に示す。CsI 蒸着面での計数の未蒸着面での計数に対する比を量子効率比とし、図中に黒点で示している。MCP の CsI 蒸着面の EUV(50-150 nm)に対する量子効率は未蒸着面のものに比べ、約 1.4 倍から 100 倍向上している。この結果から、本実験で使用した CsI を蒸着した MCPにおいても、従来の研究と同等の量子効率の向上が認められることが確認された 8)。

図 5 から、長波長側の量子効率比が短波長側に比べ高いことが見て取れる。これは、長波長側の光子に対しては鉛ガラスの量子効率が短波長側に比べ低いため、CsI による量子効率の向上が顕著に表れた結果である。

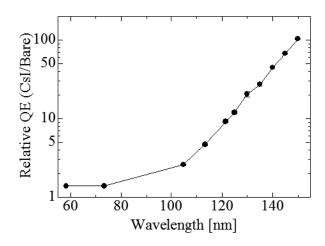


図 5 Measurement 1 で得られた量子効率(QE)の比 横軸は波長、縦軸は MCP の CsI 蒸着面と未蒸着 面の量子効率の比を表している。

#### 4.2 CsI の安定性

12 回の測定で得られた MCP の CsI 蒸着面の未蒸着面に対する量子効率比を図 6 に示す。MCP の CsI 蒸着面での計数の未蒸着面での計数に対する比(黒点)を量子効率比とし、それぞれ Measurement 1 の値で規格化した。

光電物質が劣化すると仕事関数が増大し量子効率の低下に繋がり、エネルギーの低い光子ほどその影響を受けやすい。よって、本実験では130 nm、140 nm、150 nm の波長の測定結果を CsI の劣化の指標として用いており Measurement 7 以降は短波長の量子効率比の測定は行っていない。

図6からわかるように保管環境の変化による急激な量子効率の低下は見られなかった。

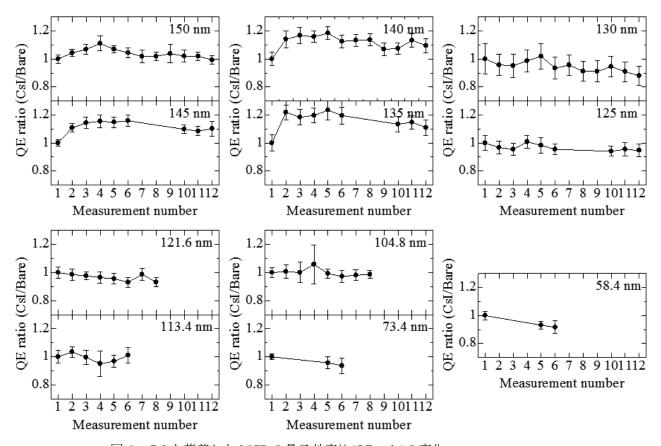


図 6 CsI を蒸着した MCP の量子効率比(QE ratio)の変化 横軸は測定番号、縦軸は量子効率比を表している。量子効率比はそれぞれ Measurement 1 の値で規格化した。本実験では 130 nm、140 nm、150 nm の 波長の測定結果を CsI の劣化の指標として用いており Measurement 7 以降 は短波長の量子効率比の測定は行っていない。

### 5. CsI の安定性に対する考察

CsI の潮解の反応速度は、主に CsI が曝露される雰囲気気体の水蒸気分圧によって決まると考えられる。各保管環境における水蒸気分圧の推定値を表 2 に示す。実験室の雰囲気気体が温度 25  $\mathbb C$  、湿度 65%の空気であり、 $N_2$  雰囲気下における水蒸気分圧の推定においては、真空チェンバー内の気体の組成が圧力によって変化しないと仮定し、本実験で使用した純度 99.99%の  $N_2$  の不純物が実験室の空気と同じ組成を持つと仮定した。

表 2 各保管環境における水蒸気分圧の推定値

Environment	10 Pa	100 Pa	1000 Pa	N <sub>2</sub> Purge
Partial Pressure of H <sub>2</sub> O [Pa]	2×10 <sup>-8</sup>	2×10 <sup>-7</sup>	2×10 <sup>-6</sup>	2×10 <sup>-4</sup>

水蒸気を多く含む気体に長時間曝露されることで CsI の潮解が進行することは明らかである。そのため、CsI の潮解の反応進行度を示す指標として、水蒸気分圧を時間で積算した値を考える。

図 7 に各測定までの保管期間における水蒸気分圧の推定値を保管時間で積算した値を示す。今回の試験では CsI の量子効率の有意な低下は見られなかったため、約0.05 Pa·hoursの水蒸気への曝露は CsI の蒸着による MCP の感度向上という目的に影響を及ぼさないと言える。

ただし、実際には潮解の反応速度は CsI の表面の形状など他の要因にも依存するため、反応進行度の水蒸気分圧と時間に対する依存性を上記のような簡便な指標で表す事は困難である。そのため、積算値が同じであってもより水蒸気を多く含む気体により短時間曝露された場合や、逆により水蒸気を少なく含む気体により長時間曝露された場合に同じ結果が得られるとは限らない。水蒸気分圧と曝露した時間の両方を考慮したより良い指標を考える事は今後の課題である。

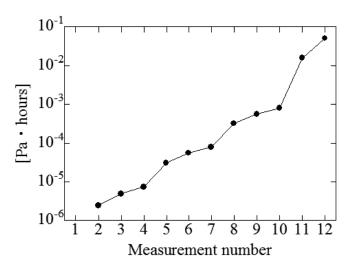


図7 各測定までに CsI に曝露された雰囲気気体の 水蒸気分圧の積算値。

#### 6. まとめ

極端紫外光による撮像は惑星大気の観測に有効な手段であり、検出器には従来から MCP が用いられてきた。MCP の感度向上の手法として入射面への CsI の蒸着が確立しつつあるが、CsI は大気曝露により劣化するため扱いが非常に困難であり、その安定性は現在まで詳しく検証されていなかった。

我々は CsI を蒸着した MCP を製作し、量子効率の安定性について検証した。その結果、保管環境の変化による量子効率の急激な低下は見られなかった。また、水蒸気への曝露を0.05 Pa·hours以下に抑えることで、量子効率の低下を 10%以内に抑えられることを確認した。これらの環境における観測装置の保管は惑星探査ミッションにおいて十分達成可能である。今後は保管環境や期間をさらに変化させた実験を行うことで、量子効率の低下を引き起こす必要条件を明確にする必要がある。

#### 参考文献

- I. Yoshikawa, 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, J. Geophys. Res., 102(A9), 1997, 19,897-19,902.
- <sup>2)</sup> I. Yoshikawa, 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., 106(A11), 2001, 26,057-26,074.
- 3) B. R. Sandel, A. L. Broadfoot, C. C. Curtis, R. A. King, T. C. Stone, R. H. Hill, J. Chen, O. H. W. Siegmund, R. Raffanti, David D. Allred, R. Steven Turley, and D. L. Gallagher, The Extreme ultraviolet imager investigation for the IMAGE mission, Space Sci. Rev., 91, 2000, 197-242.
- 4) G. Murakami, I. Yoshikawa, Y. Obana, K. Yoshioka, G. Ogawa, A. Yamazaki, M. Kagitani, M. Taguchi, M. Kikuchi, S. Kameda, and M. Nakamura, First sequential images of the plasmasphere from the meridian perspective observed by KAGUYA, Earth Planets Space, 62, 2010, e9-e12.
- 5) MCP アッセンブリ技術資料 (浜松ホトニクス株式会社)
- M. Taguchi, H. Fukunishi, S. Watanabe, S. Okano, Y. Takahashi, and T. D. Kawahara, Ultraviolet imaging spectrometr (UVS) experiment on board the NOZOMI spacecraft: Instrumentation and initial results, Earth Planets Space, 52, 2000, 49-60.
- O. H. W. Siegmund, M. A. Gummin, T. Sasseen, P. Jelinsky, G. A. Gaines, J. Hull, L. M. Stock, M. Edgar, B. Welsh, S. Jelinsky, and J. Vallerga, Microchannel plates for the UVCS and SUMER instruments on the SOHO satellite, Proc. SPIE, 2518, 1995, 344-355.
- <sup>8)</sup> K. Yoshioka, T. Homma, G. Murakami, and I. Yoshikawa, High sensitivity microchannel plate detectors for space extreme ultraviolet missions, Rev. Sci. Instrum., 83, 2012, 083117-1-6.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-16-011 JAXA Research and Development Report

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 Stability of Csl-coated Microchannel Plate

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/

©2017 JAXA

※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 degital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

