

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05467

研究課題名(和文)天体プラズマの高効率観測に向けた極端紫外光検出器の開発研究

研究課題名(英文)Development of high-sensitivity EUV detector for space plasma

研究代表者

吉岡 和夫 (Yoshioka, Kazuo)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師

研究者番号：70637131

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,900,000円

研究成果の概要(和文)：原子やイオンの輝線が多く集まる極端紫外波長領域の光は天体プラズマを観測する上で非常に重要である。地球大気による吸収を避けるため飛翔体を用いた宇宙空間からの観測が必須となるこの波長域では、小型・軽量でありつつ高効率の観測を実現する装置が必要である。本研究を通して、これまで一般的に用いられてきた極端紫外光検出器の2倍から10倍以上の検出効率向上を実現する手法により確立し、さらにその性能を維持するための最適な保管方法を提案・実証した。この結果、従来よりもはるかに高効率な観測を低コストで実現するための道筋を立てることができた。

研究成果の概要(英文)：The extreme ultraviolet region where a lot of emission lines of ion and atoms gather is important in observing space plasmas. To avoid absorption by the earth's atmosphere, the observation from space is needed. At this wavelength, it is compact and lightweight, and equipment that realizes highly efficient observation is necessary. Through this study, we have established a method to realize detection efficiency better than 2 to 10 times higher than the conventional ones. We also proposed an optimal storage method to maintain its sensitivity. As a result, we were able to establish a path to realize observation with much higher efficiency at lower cost than before.

研究分野：宇宙空間プラズマ物理

キーワード：極端紫外光 量子効率 飛翔体 天体プラズマ 光電物質

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、極端紫外光（波長 30-150nm）を用いた宇宙空間物理および惑星科学の発展を目指している。極端紫外光を用いた天体観測は 1970 年代から行われてきた。当時の装置は、位置分解能を持たない光電子増倍管を複数個並べて、対象天体から到来する光子を一つずつ計数する仕組みで、大気やプラズマの密度導出が主な役割であった。その後 1990 年代後半に入ると、位置分解能を持つ光検出器の開発が進み、二次元撮像観測や、一次元の空間情報と波長情報を併せ持つ分光撮像観測が行われるようになってきている（例：NASA の Cassini 探査機搭載の紫外分光撮像装置 UVIS）。

天体観測に極端紫外光を用いる利点は、プラズマや大気を構成する原子やイオンの輝線の多くが集約されていることにある。分子の振動・回転遷移の輝線が可視から赤外域に多く分布することと対比して考えると、ちょうど原子・イオンのエネルギー帯に極端紫外領域が対応している。例えば、地球の 20000 倍という強力な磁場に囲まれた木星内部磁気圏に存在するイオプラズマトーラス（衛星イオの活火山を源とする高密度イオンの集まり）では、主成分である硫黄イオンや酸素イオンから、電子衝突励起を介して 100 通り以上の輝線が極端紫外波長域に発せられている。これらの輝線の強度は、イオン自身の密度に加えて、励起源である周囲の電子の物理量（温度分布・密度）を反映している。つまり、イオンの輝線強度から、それ自体は発光していない電子の温度分布や密度まで導けるのである。この手法はスペクトル診断と呼ばれ、対象天体に観測機を持ち込まなくても、遠隔からプラズマの温度や密度を導出できる画期的な手法である。さらに、空間変動と時間変動を明確に切り分けた情報を取得できるという遠隔観測の最大の利点も活かせる非常に有効な手法である。

申請者は、2013 年に打ち上げられた惑星分光観測衛星「ひさき」が取得したイオプラズマトーラスの極端紫外スペクトルに対してこの手法を適用し、強力な磁場に守られた木星内部磁気圏の中に、高温電子が流入している証拠を捉えることに成功した。この現象は、太陽系最強の粒子加速器として振舞う木星磁気圏を生成・維持する仕組みを解明するための重要な鍵である。この他にもスペクトル診断は直接探査が不可能な系外惑星やその主星の観測にも適用可能である。

このように、天体観測に非常に有効な極端紫外光だが、地球大気の吸収があるため宇宙空間からしか観測はできない。極端紫外光観測機の開発において常に問題になるのは、適切な透過材（レンズなど）が存在しないこと、鏡面反射率が低いこと、さらに光検出器の量子効率が低いことである。二次元の光検出器として用いられるマイクロチャンネルプレート

の量子効率は、一般的に 10% 程度しかない。特に、波長 100 nm 以上の低エネルギーの光に対しては、量子効率が 1% を下回ってしまう。

## 2. 研究の目的

そこで本研究ではマイクロチャンネルプレート

の量子効率を向上させ、さらに安定してその感度を保つ手法の確立を目的とする。紫外や可視光の検出器では、受光面に光透過率の高いフッ化マグネシウムや合成石英などのガラス材が使われる。このとき、量子効率向上のために、入射面ガラスの内側に仕事関数の低い物質（光電物質）を塗布する手法が一般的である。光電物質により高確率で光電子が生じ、その後方の電子増倍部（マイクロチャンネルプレート）を経て電気回路に送られることで、光を電気信号として検出する仕組みである（図 1A）。一方で、極端紫外光を観測対象とする場合には、適当な透過材がないため入射部にガラス材は使えない。そのため、マイクロチャンネルプレートに対して保護物質を一切介さずに光を直接入射させる構造をとらざるを得ない。このとき、光電物質をマイクロチャンネルプレートの受光面に直接塗布することも可能である（図 1B）。

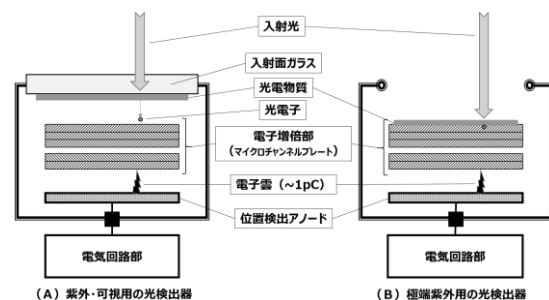


図1 紫外・可視用の一般的な検出器 (A) と、極端紫外用の検出器 (B)

図2に光電物質（ヨウ化セシウム）蒸着の有無によるマイクロチャンネルプレートの量子効率の違いを示す。この例では、特に波長 100 nm を越える光に対して劇的な量子効率向上の効果が見られる（図2, Yoshioka et al. 2013, PSS）。しかし、一般的に光電物質は潮解性を持つため、大気に曝してしまうと、量子効率が低下する（図3）。したがって、蒸着直後に見られる図2のような量子効率向上効果が長期間維持される保障はない。ガラス材により真空封止された状態で使用できる可視や紫外光の場合はこのような劣化の心配は不要だが、極端紫外光の場合は注意が必要である。したがって、ひとたび光電物質を蒸着したら、飛翔体搭載に向けた環境試験や運搬時にも、常に真空環境を保たなければならない、というのがこれまでの一般的な理解である。

実際に申請者がこれまで中核的に開発に携わってきた「ひさき」衛星搭載の極端紫外

分光器は、検出効率を維持するために 24 時間体制で真空引きを続ける必要があった。これは、特に誘爆性のある真空ポンプを使うため、打ち上げ準備作業において極めて厳しい制約となりロケット射場での作業は困難を極めた。幸い、「ひさき」を打ち上げたイプシロンロケットは固体燃料であるため、他のロケットに比べれば自由度が高く、打ち上げの 5 時間前まで真空引きを継続することが許された。そのため、検出器内部は十分な真空度を保つことができ、感度劣化を最小限に留め、ミッション目的の達成に必要な効率を維持できた。しかし、より制約の厳しいロケットや射場での待機期間の長い飛翔体ミッションに対しても、高効率の観測機するためには、感度劣化のない極端紫外光検出器の開発は非常に重要である。

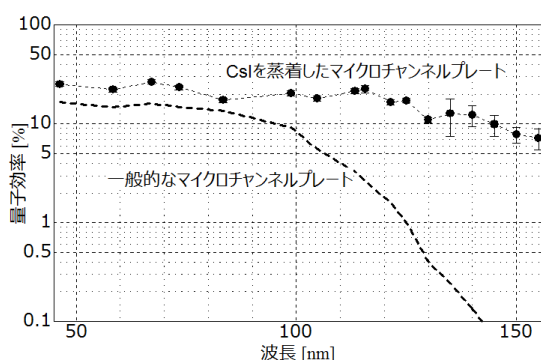


図 2. 光電物質の有無によるマイクロチャンネルプレート検出器の量子効率の違い

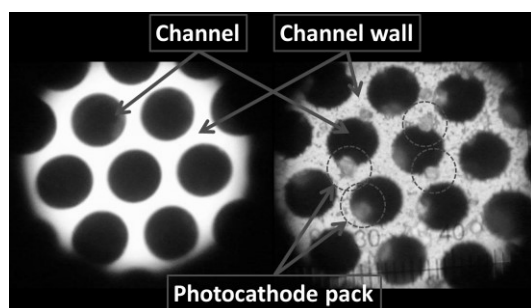


図 3. 光電物質蒸着直後(左)と劣化後(右)のマイクロチャンネルプレートの拡大写真

物質により反応時定数や結晶構造が異なるため、大気曝露による劣化の度合いは、光電物質の種類により異なると考えられる。そこで本研究では、まず複数の光電物質に対して、一定期間の保存の結果生じる感度劣化の度合いを比較し、最も耐久性の高い物質を選定する。このとき測定尺度として、真空度と保持時間を意識する。一般的に、真空ポンプで十分に排気した状態の真空容器を封止した場合は、10Pa 程度の真空度になる。したがって、この程度の真空度で長時間保管した場合でも、感度劣化しない光電物質、およびその蒸着パラメータ(厚さ・蒸着角度等)を決定する。また、光電物質の蒸着から打ち上

げまでの間に一度も大気暴露せずに保管し、打ち上げ後には受光面を宇宙空間に曝露できるようにシステムを構築することも本研究の目的とする。

### 3. 研究の方法

あらかじめ化学的特性の分かっている数種類の光電物質を固体の状態を用意する。これらの物質は、過去の飛翔体搭載機器への使用実績に加えて、仕事関数が低いこと、親水性が低いこと、可視光に対する感度が低いこと(迷光対策)、および入手が比較的容易であるという観点から選定した。最初の段階ではマイクロチャンネルプレートの代わりにアルミプレートに対して光電物質を蒸着し、量子効率を測定する。具体的な蒸着手段を図 4 に基づいて以下に述べる。電流導入端子を介して大気側の大型電源装置と接続したタングステン製のボートを真空ベルジャの中に設置し、 $10^{-3}$  Pa 程度まで真空引きする。固体状の光電物質を約 10mg 置いたボートに 50 アンペアの大電流を流し、約 700 °C まで加熱する。光電物質はボートと共に加熱され徐々に気化する。ボートの約 30 センチ上方に、被蒸着物としてアルミプレートを設置する。真空環境下なので、気化した光電物質は無衝突でアルミプレートに到達し、その一部が蒸着される。

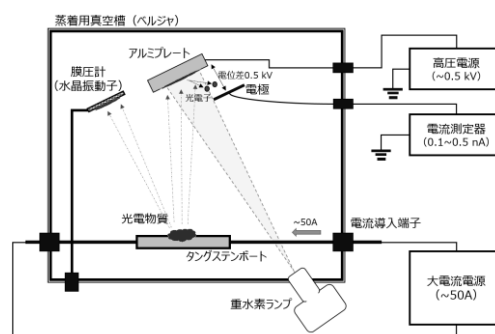


図 4. 蒸着装置の模式図

アルミプレートに対して、光を直接照射できる位置に極端紫外光源(重水素ランプ)を設置する。また、アルミプレートの近くに導線(および電流導入端子)と接続した電極を設置し、アルミプレートとの間に 0.5 kV 程度の電位を与えることにより、光電物質を蒸着しつつ、光電効果によって生成される光電流を計測する。このとき水晶振動子を用いて蒸着厚さを測定することによって、光電物質の厚さと光電流の関係を把握する。なお、私がこれまで行ってきた研究の結果、蒸着される光電物質の厚さは量子効率に影響を及ぼす重要なファクターであるが、厚み 200 nm を越えると量子効率は一定値となることが分かっている。したがって本研究では、まずは 200 nm を蒸着厚の目標値とする。しかし、潮解による劣化しだいはさらに厚みを増す必要があるため、より厚く蒸着したもの

も試作する。なお、光電流発生用の極端紫外光源には、安定した光量を維持できる浜松ホトニクス社製の重水素ランプを用いる。

アルミプレートへの蒸着が完了したら、実際の飛翔体搭載を念頭においた耐久試験に移行する。ここでは、容積 0.3L 程度の金属性の真空容器の中に、光電物質を蒸着したマイクロチャンネルプレートアセンブリを保管し、打ち上げ後に受光面を宇宙空間に対して曝す構造を想定する。なお、十分にベーキングを施した真空容器を封止状態で保管した場合、10 Pa 程度の真空度ならば 1 ヶ月は維持できる。したがって本研究における光電物質の劣化の評価には真空度 10 Pa という値を基準として定義する。

アルミプレートへの光電物質の蒸着後、ベルジャの真空度を 10Pa 程度に保ち 1 日、3 日、および 1 週間経過後にそれぞれ再度真空引きを行い、極端紫外光を照射して光電流値を測定する。なお、これらの待機時間は、飛翔体搭載機器の輸送・環境試験・打ち上げ運用時に連続して真空排気ができなくなる時間として現実的な値として選定した。この結果から、最も高い量子効率（電流値）を維持し続けた物質・蒸着厚を最適解として決定する。

フライト品においても、蒸着後の保持期間の真空度を 10 Pa（封止状態）とし、地上での環境試験や輸送時はその値を常に保ちつつ、宇宙空間で蓋を開けられる構造の容器を開発する。なお、この構造の容器自体はすでに「ひさき」への搭載実績があるが、当時は単体のマイクロチャンネルプレートに対して光電物質を蒸着した後、大気中で他の部品と組み合わせてから真空容器に入れるという手順をとらざるを得なかったため、蒸着から組み立てまでに要する約 1 時間は必然的に大気曝露してしまい、光電物質本来の性能を発揮することはできなかった。本研究では、マイクロチャンネルプレートアセンブリを組み立てた後に光電物質を蒸着するという手順をとることによって、そのような事態を防ぐ。具体的にはフライト品となる容器の中に、あらかじめ検出器を設置し、開閉式の蓋を開けた状態で真空ベルジャの中に設置する。前述のシステムでマイクロチャンネルプレート表面に最適な光電物質を蒸着する。

最適な厚さまで光電物質を蒸着した後に、真空状態を保ったままベルジャ内で容器の蓋を閉める。このとき、気密性を保つためにゴム O-ring をラッチ状の“鍵”で押しつぶす。またラッチの駆動には、パラフィンが熱により昇華するときの膨張でロッドを伸展させる構造のアクチュエータ（パラフィンアクチュエータ）を用いる。この開閉システムは、国際宇宙ステーションに搭載した観測機器で実際に用いた実績がある。なお本研究では、ゴム O-ring などの部分に光電物質が付着することなく、確実に気密性を保つことが開発のポイントである。

#### 4. 研究成果

一般的に宇宙探査に用いられるマイクロチャンネルプレートの表面にヨウ化セシウムを蒸着し、極端紫外光に対する感度（量子効率）の変化を調査した。具体的には、マイクロチャンネルプレートを構成するポア（直径 0.012mm）の角度を 20 度とし、その表面の 0.01mm 程度の深さにヨウ化セシウムを蒸着した（図 5）。そのマイクロチャンネルプレートを、15 分以内の大気暴露の後に、感度校正用の真空チャンバーにセットした。このチャンバーには、波長 30-150nm の単色光を生成するラインが備え付けてあり、波長選択的に検出器の量子効率を測定できる（後述）。

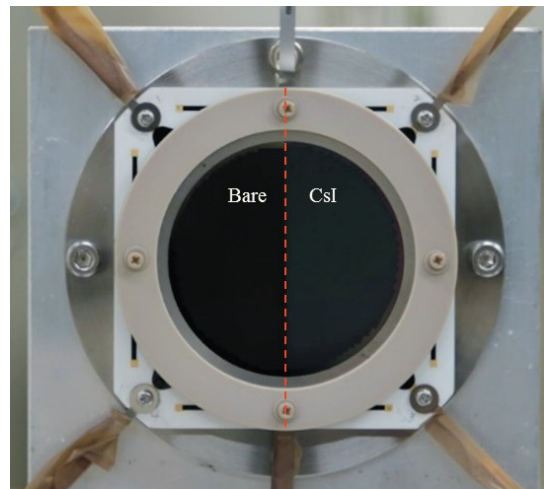


図 5. 試作したマイクロチャンネルプレート

また、真空ステージを用いてマイクロチャンネルプレートを移動させ、検出器の面に対して感度一様性、また利得率（光を電子に変換した後に、増幅する際の割合）の一様性を確認した。さらに、バイトン製の O-ring を用いた真空保管容器を開発し、その中にマイクロチャンネルプレートを保管し経年劣化の様子を観察した。

この結果、一般的に光電物質として用いられるヨウ化セシウムは、従来定説とされていた高真空保管は必須ではなく、0.01 気圧程度の低真空でも 1 年近くは性能維持（量子効率・利得率の安定性）が可能であることが分かった。この結果は、探査機打ち上げ時のオペレーションにおける制約を軽減し、大幅なコストカットと効率の良い観測の実現につながる。【図 6, 業績：桑原他 2017】。

また、これまで市販の光源を用いてきた極端紫外領域のビーム光源に関して、自作の高周波回路基板を制作し、任意のガス（ヘリウム、アルゴン、酸素等）を励起させて輝線を放出させる手法を確立した。この結果、マイクロチャンネルプレートの量子効率試験における波長選択の自由度を向上させることができる。したがって、研究でも量子効率の波長依存性や、経年劣化の波長依存性にも着目して評価することができた。

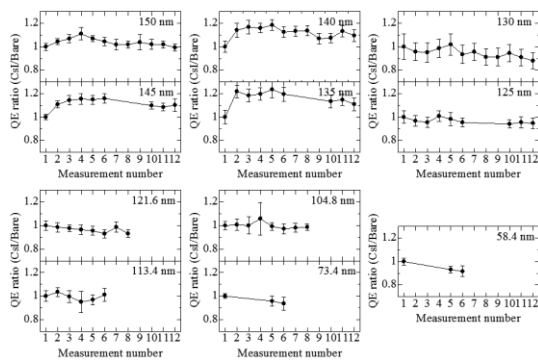


図6. 各波長における量子効率の変化

以上の成果から、自作のビームラインと、光電物質蒸着のマイクロチャンネルプレートの性能評価を通して、これまでよりも少ない労力で高精度な天体観測を実現できることを示した。リソースの限られた超小型探査機等へのミッション提案におけるハードルを一つ下げられたことになる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

1. Cho, Y., Kameda, S., Okuno, M., Horiuchi, M., Shibasaki, K., Wagatsuma, R., Aida, Y., Miura, Y. N., Yoshioka, K., Okazaki, R., and Sugita, S. (2017). Experimental characterization of elastometric O-rings as reusable seals for mass spectrometric measurements: Application to in situ K-Ar dating on Mars, *Adv. Space Res.*, 60, 1453-1462. (査読有り)
2. 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. (査読有り) [学会発表] (計5件)
1. 吉岡和夫, 吉川一朗, 村上豪, 山崎敦, 藤本正樹, 土屋史紀, 鍵谷将人, 木村智樹, 飛翔体による遠隔観測技術を用いた惑星磁気圏の研究, 日本物理学会第73回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス, 2018年3月 (招待講演)
2. 吉岡和夫, 桑原正輝, 吉川一朗, 今村剛, 田口真, 亀田真吾, 船瀬龍, 小泉宏之, 鈴木宏二郎, 笠原慧, 杉田精司, 超小型探査機による光学観測手法の惑星科学への応用, 日本惑星科学会秋季講演会, 大阪, 2017年09月
3. 吉岡和夫, 桑原正輝, 村上豪, 吉川一朗, EUV imaging for Earth's plasmasphere from Earth-Moon L2 point by nano-spacecraft named EQUULEUS, 日本地球惑星科学連合2017年大会, 幕張,

2017年05月

4. 吉岡和夫, 桑原正輝, 疋田伶奈, 鈴木文晴, 村上豪, 吉川一朗, Imaging observation for the Earth's plasmasphere from Lunar orbit by nano-spacecraft, 地球電磁気・地球惑星圏学会秋学会, 九州大学伊都キャンパス, 2016年11月
5. 吉岡和夫, 桑原正輝, 村上豪, 吉川一朗, 鈴木文晴, 疋田伶奈, 2次元極端紫外光検出器の感度向上と安定化, 日本地球惑星科学連合2016年大会, 幕張, 2016年05月

[図書] (計0件)

[産業財産権]

なし

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉岡 和夫 (YOSHIOKA, Kazuo)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師

研究者番号: 70637131