

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25871211

研究課題名(和文)天体プラズマの光学観測に向けた高分解能極端紫外光検出器の開発研究

研究課題名(英文)Development of the high-resolution EUV detector for space plasma observation from spacecraft.

研究代表者

吉岡 和夫 (Yoshioka, Kazuo)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：70637131

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：曲率半径80mmの球面型マイクロチャンネルプレートの試作を完成させた。ピーク材とステンレス材を用いた保持機構を設計し、レジスティブアノードと組み合わせたアッセンブリを完成させた。この試作品を用いて、MCPの電子増幅を十分に機能させることができ、0.02mm程度の空間分解が可能なレベルまで高電圧を印加することに成功した。さらに、意図的に球面収差を作り出すレンズを用いて、スポットが球面上に集まるような試験用光学系を作成し、紫外線を用いた評価試験を行い、想定とおりの性能が出ていることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The curve MCP with its radius of 80mm has been developed. Three curved MCPs are assembled with the position sensitive resistive anode (RAE). We have conducted the HV test inside the vacuum chamber and simple optical test has also made. Both of the results are successful.

研究分野：宇宙空間物理学

キーワード：マイクロチャンネルプレート 球面 レジスティブアノード 放電 人工衛星

## 1. 研究開始当初の背景

2007年に打ち上げられた「かぐや」衛星には、私が中核的に開発に携わってきた極端紫外望遠鏡が搭載されていた。この観測器の本来の目的は、月周回軌道からの地球プラズマ圏観測であったが、実際の画像には多くの極端紫外天体が写りこんでいた(図1)。地球の上層大気からの光が混入しない宇宙空間から観測したことが、多くの新しい極端紫外天体の発見につながったのである。しかし当時の技術では光学収差のため天体は10分角程度に広がってしまい、またこの観測機はフィルター分光方式であったためスペクトルは取得できず、科学的成果は“天体の発見”に留まったままである。

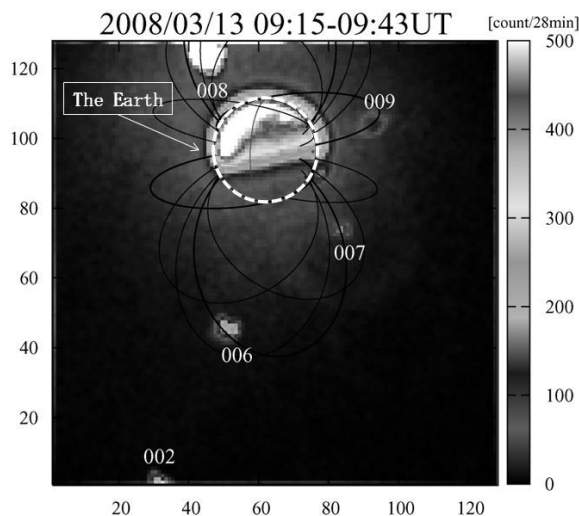


図1. 「かぐや」が取得した地球プラズマ圏(白色領域)。002, ...009と書かれた斑点が極端紫外天体である。

極端紫外光を用いた太陽系外天体の研究は未開拓の分野である。これは地球大気の吸収を避けるために宇宙空間からの観測が必須であることと、微弱信号を検出できる感度と波長・空間分解能をともに満足する観測器が存在しないためである。一方、近距離からの観測が可能な太陽系惑星においては、極端紫外光はプラズマや中性大気が発する輝線の多くが集中する重要な波長域として以前

から認識されてきた。例えば木星内部磁気圏では、イオンが電子との衝突電離で複数の輝線を発している。私は輝線の発光効率や衝突断面積からの逆算でイオン組成や密度、電子温度分布を導出できると考え、NASAのCassini探査機(1997年打上)が取得した木星磁気圏の極端紫外スペクトルにこの方法を適用した。検出器の感度が低く時間分解能が不十分だったため、非熱的電子の輸送などの物理現象を捉えるには至らなかったが、電子温度分布やイオン組成の導出には成功した。私は本研究を通して従来よりも感度・分解能を向上させた分光撮像器を実現し、木星磁気圏の高分解能観測を成功させ、さらにこの手法を太陽系外の天体まで拡張したいと考えている。

過去の紫外線天文衛星としてはNASAのEUVE(1992年打上)がある。EUVE衛星は、それまで星間吸収のため天文観測には不向きと考えられていた極端紫外光で全天マップを作成したことが大きな成果である。しかし波長分解能は10nm以上と大変あらく、天体からの放射総量の時間変動を、約半日という時間分解能で把握するのが精一杯であり、天体の物理現象を解明するには至らなかった。また、木星イオトラスの観測データを用いてプラズマ診断も試みられたが、波長分解能の問題で3本の輝線しか使えず精度は低かった。また1999年に打ち上げられた紫外線天文衛星FUSEは波長分解能が0.03nmと高かったが波長範囲が狭く(90.5-118.7nm)プラズマ診断には多くの仮定が必要であった。

惑星探査で用いた手法を太陽系外天体に適用するには感度・分解能の向上が不可欠である。極端紫外光は透過率の問題でレンズが使えず、分解能を上げるためには複数の補正鏡が必要である。しかし極端紫外光に対する鏡の反射率は高々30%しかなく、光量が少ない天文観測では検出効率を確保するために

反射回数を減らす必要があり、そのぶん分解能を犠牲にしてきた。しかし光学系に合わせて検出面の形状を最適化できれば反射回数を増やさずに分解能を向上させられると私は考えている。具体的には、入射面を光学系の焦点面に合わせた曲面にすれば波長・空間分解能は格段に改善する。本研究で扱う MCP はこの点において実現の可能性がある光検出素子である。

## 2. 研究の目的

地球の電離圏やプラズマ圏からの光が混入しない宇宙空間から、極端紫外光（波長 30-150nm）で太陽系惑星および太陽系外天体を観測したい。天体が発する極端紫外スペクトルから温度や密度、イオン組成を導出する。そのために極端紫外用の光学系を改良し、波長・空間分解能を向上させる。具体的には 2 次元の極端紫外光検出素子として用いるマイクロチャンネルプレート（以下 MCP と略す）の形状に着目する。すなわち、本研究では装置の光学収差を最小限に抑えるために、これまで平面のものしか存在しなかった MCP を曲面にし、実用化させることを目的とする。

最終的には、光学収差を抑えるための湾曲方極端紫外光検出器を搭載機器として実用化させることで、これまで太陽系惑星でなされてきたプラズマ物理の議論の対象を太陽系外天体まで拡張することに貢献したいと考えている。

本研究で形状の最適化を試みる MCP とは薄いファイバプレートであり、いわば超小型の光電子増倍管（直径  $10\mu\text{m}$ ）数十万本の集合である。それぞれの管（チャンネル）が独立に電子増倍器としての機能を持つため、全体として 2 次元の光子到来位置情報を得る。通常は 3~5 枚の MCP を重ねて使用し、1 つの光子から  $10\text{E}+7$  個程度の電子雲を生成する。MCP には高圧（3~5kV）を印加す

るため放電による破壊の恐れがある。また形状の斑やチャンネルの向きのばらつきに起因する増幅率や感度の非一様性も煩わしい問題である。私はこれまで MCP の高効率化を目指した研究を行ってきた。その過程で浜松ホトニクス技術者と協力して MCP の試作を繰り返し、温度や材質等の製造パラメタの最適化を追及し、形状変形には熱変形が最適であると考えに至った。これは MCP 製作のノウハウを熟知した故にたどり着いた発想である。この方法ならば放電の原因となり得る細かな凸凹ができにくく、また数 10 万本のチャンネルを一様に配置できる。ただし、この手法による曲面 MCP の製造は他に例がない。

MCP の高効率化を目指した研究はこれまで多くの研究者によって盛んに行われてきた。しかし形状変形となると、15 年ほど前に米国の研究グループが掘削整形により球面 MCP の製造を試みた例があるのみである。しかし彼らの方法では表面に細かな凸凹や亀裂が生じ増幅率が安定せず、位置分解能が著しく低下する。また、このような凸凹は放電の原因ともなり得る。2000 年に打ち上げられた米国の磁気圏撮像衛星（IMAGE 衛星）には、開発当初球面 MCP が搭載される予定だったが、後に断念したのはこのことが原因であろう。問題は整形方法にあり、本研究で採用する手法ではこの点は問題にならないと考えている。

極端紫外光観測器の感度と分解能が向上すれば、天体におけるプラズマ物理の議論は飛躍的に深まる。例えば図 2 に示すように、主鏡とトロイダル回折格子および曲面 MCP を組み合わせれば  $200\text{mm} \times 500\text{mm} \times 150\text{mm}$  と小型ながら、1m 級の EUVE 衛星の 2 倍以上の有効面積を確保でき、10 倍以上の波長・空間分解能を実現できる。

この大きさと重量ならば ESA の木星探査計画 JUICE（2023 年打上）への搭載も可能と

なり、Cassini 探査機の数倍の時間・空間分解能で木星を観測できる。

私はプラズマ診断を通して、これまで謎とされている木星内部磁気圏の非熱的高温電子の生成過程を解明できると考えている。

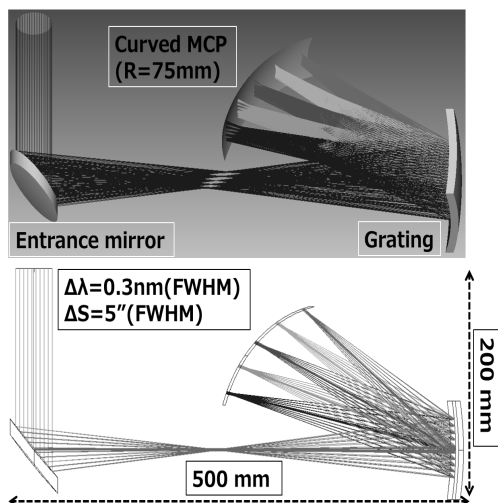


図 2. 2 回反射の光学設計。MCP を曲率半径 75mm の曲面にすれば波長・空間分解能が EUVE 衛星の 10 倍以上に向上する。(主鏡: 40mm, MCP: 25mm × 50mm)

### 3. 研究の方法

浜松ホトニクスとの協力体制で曲面 MCP を試作し、アッセンブリとして使用可能な状態までくみ上げる。真空槽の中で極端紫外光による分解能確認試験を行う。評価用治具として球面レンズを用いた非球面集光システムを構築する。増幅率の安定性（パルスハイトの一様性）や暗電流、熱応力の集中による割れの影響を集中的に調査する。また高利得を得るために複数の曲面 MCP を重ねて使う際の最適な電位配置を決定する。さらに、増幅した電子雲の位置を検出するためのアノードと組み合わせたアッセンブリ構造を最適化する。最終的には、天体のプラズマ診断を行うために曲率半径 75mm の MCP アッセンブリを実用化することを目標とする。

### 4. 研究成果

曲率半径 80mm の球面型 MCP（3 枚重ね）の試作を完成させた。ピーク材とステンレス材を用いた保持機構を設計し、レジスティブアノードと組み合わせたアッセンブリを完成させた(図 3)。また、レジスティブアノードの 4 極には、フィードスルー（BNC コネクタ）が接続されており、チャンバの外には市販のチャージアンプ（4 チャンネル）を接続した。



図 3. 試作した MCP アッセンブリ。三枚の曲面 MCP が重ねられており、その下段にはレジスティブアノードが取り付けられている。(MCP 曲率: 80mm)

4 隅から飛び出しているステンレス製のピンは、レジスティブアノードの 4 極に対応しており、そのままチャージアンプと接続される。その他の 2 本は、高圧 IN と RTN である。

今回は、この試作品を用いて MCP の電子増幅を十分に機能させることができ、0.02mm 程度の空間分解が可能なレベルまで高電圧を印加することに成功した。これはすなわち、MCP でのゲイン（利得率：光電子ひとつが電子雪崩を経て生み出す電子雲の電荷量）の平均値が  $1E+7$  を越えていることを意味する。なお、通常の 3 枚重ねの MCP アッセンブリの平均的な増幅率は  $5E+6$  程度である。

さらに、意図的に平面光源から球面収差を

作り出すレンズを用いて、スポットが球面上に集まるような試験用光学系を作成し、真空チャンバの中で実際の紫外線を用いた評価試験を行った。この結果、想定とおりの点像分布関数を示すスポットダイアグラム、すなわちピンホールの点像を映し出すことに成功した。このとき、それぞれの半値全幅は0.05mm程度であった。なお、このとき光学設計用ソフトウェア（Z-MAX）を用いてその妥当性を評価した。

今回の成果により、より少ない光学素子（主鏡・回折格子等）で高い分解能の実現が可能となる。これは大型ミッションではもちろんのこと、そうでなくとも高い空間分解能を有する望遠鏡を設計できることを意味する。今後は、東京大学を中心としてこれから数年間の間に開発が本格化していく超小型科学衛星シリーズ（50kg級）への搭載を想定して、系外惑星観測用の望遠鏡の設計に着手する。

また、私は検出器の感度自体を向上させる研究を行っていく。今回の研究成果により、少ない光学素子でシンプルな構造の望遠鏡の設計が可能となった。しかしながら、そもそも一般的10%程度しかない量子効率に関しては、向上させるシロが十分にある。さらにその感度を高い状態で維持することも必須である。私は、極端紫外に対する光電物質（CsI, KBr等）の量子効率およびその安定性を確認するための研究を始めている。今回得られた曲面MCPの分解能に関する結果と、これから行う科研費研究（若手研究（A）2015~2017年、課題番号15H05467）の成果を合わせれば、これまでより格段に空間分解能が高く、かつ検出効率の高い観測装置が完成する。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

K. Yoshioka, G. Murakami, A. Yamazaki, F. Tsuchiya, M. Kagitani, T. Sakanoi, T. Kimura, K. Uji, and I. Yoshikawa, The extreme ultraviolet spectroscopy for planetary science, EXCEED, Planetary and Space Science 85, 250-260(2013).

〔学会発表〕（計1件）

K. Yoshioka, I. Yoshikawa, F. Tsuchiya, and EXCEED team, The Earth-orbiting EUV spectroscopy (EXCEED) on board the SPRINT-A (HISAKI), 45<sup>th</sup> DPS annual meeting, Denver, October, 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉岡 和夫 (YOSHIOKA, Kazuo)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員  
研究者番号：70637131