

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01964

研究課題名(和文) 太陽系外における地球型惑星大気の検出に向けた紫外線観測技術の新展開

研究課題名(英文) New ultraviolet observation techniques for detecting Earth-type exoplanetary atmosphere

研究代表者

村上 豪 (Murakami, Go)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：50734026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では宇宙望遠鏡に搭載可能な新方式の高ダイナミックレンジ紫外線検出器を開発し、系外惑星観測に展開しうる日本独自の紫外線観測技術を実証する。そのために本検出器用に最適化したMCPおよびCMOSセンサ、演算処理回路を選定・開発し、組み合わせせて新型検出器を完成させる。光学試験によりダイナミックレンジおよび位置分解能を測定し、また宇宙環境試験により衛星搭載性を確認する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は太陽系探査で実証してきた紫外線観測技術を太陽系外惑星の大気観測に展開させる新たな試みである。可視・赤外による系外惑星観測計画が世界各国で急速に進む中、太陽系探査で技術を培った紫外線領域に着目し、惑星高層大気分光観測から海洋を有する地球型惑星の発見を目指すという発想は本研究独自のものである。本研究により確立したCMOSセンサを用いた紫外線検出方式は、申請者が中心となり検討を進めていた「惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた紫外線宇宙望遠鏡計画(LAPYUTA計画)」にも採用見込みであり、生命を保有する惑星を発見するという目標の実現に向けたアプローチとして中核的な役割を担っている。

研究成果の概要(英文)：The discovery of a habitable planet is one of the ultimate goals of science. As an approach to the discovery of a habitable planet, we aim to realize observations of stellar ultraviolet radiation and exoplanetary atmospheres with a 1-m class ultraviolet space telescope. Spectroscopic observations of the upper atmospheres of terrestrial planets under intense ultraviolet radiation will reveal the surface environment, especially the presence of oceans. In this research, we have developed a new type of high dynamic range UV detector that can be installed on a space telescope, which is the key technology to realize the observation, and demonstrated Japan's unique UV observation technology that can be deployed for exoplanet observation. We selected and developed optimized sensors and processing circuit for this detector. We have also evaluated the on-board capability of the satellite. The results of this research will be reflected in future ultraviolet space telescope projects.

研究分野：惑星大気・プラズマ物理学

キーワード：CMOS 紫外線 検出器 光子計数 マイクロチャンネルプレート 系外惑星 高層大気

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

太陽系外に初めて惑星が発見されてから20年以上が経過し、その数はすでに3000個を超えている。その中には地球サイズの岩石惑星も含まれているが、いまだ地球のように表層に海洋を有し生命を育む環境をもつ惑星は見つかっていない。**果たして生命を有する地球という惑星は唯一の存在なのか？**これは人類にとって共通の問いであり、**生命を保有する惑星を発見することは科学がもつ究極の目標の一つである。**

系外惑星における生命保有の可能性を探る鍵は惑星表層環境、特に大気と海洋の情報を得ることにある。恒星系において主星から適度な輻射エネルギーを受け、十分な大気圧と惑星表層に液体の水を保有できる範囲を生命居住可能領域(ハビタブルゾーン)と呼ぶ。トランプスト1系に代表されるようにハビタブルゾーン内に存在する地球型惑星もすでに複数発見されている。しかしこれらの惑星の大気観測となると、地球サイズの惑星ではその大気層の厚みはせいぜい100km程度であり、**現在各国で計画が進められている可視光・赤外線望遠鏡で検出するのは困難である。**そのため、ハビタブルゾーン内の地球型惑星が実際にどれだけ生命保有可能であるのかは観測的には全くわかっていない。

研究代表者はこれまで太陽系内天体の紫外線観測により惑星高層大気や周辺環境を明らかにしてきた。地球高層では紫外線加熱などにより中性・電離大気が宇宙空間に散逸し、電離圏やプラズマ圏、外圏大気など希薄ながら高層大気が形成される。これら高層大気は紫外線領域に強い輝線・吸収線をもち、遠方からでも観測が可能となる。研究代表者は月周回衛星に搭載した紫外線望遠鏡で地球を撮像し、その高層大気が地球半径の3~5倍程度まで広がっている様子を捉えることに成功した。

太陽系外には様々な年齢の惑星が存在しており、その主星の恒星型もそれぞれ異なる。**生命保有可能な惑星であることを決定づけるためには、現在の表層環境だけでなく、その惑星がこれまでに辿ってきた進化過程を理解する必要がある。**惑星大気進化過程には主星からの紫外線輻射量(特に極端紫外線や遠紫外線と呼ばれる波長領域)が支配的な役割を果たす。しかしこれらの波長領域は地球大気の吸収を受けるため宇宙空間からのみ観測が可能で、恒星の紫外線輻射量の測定はこれまでハッブル宇宙望遠鏡などによるわずかな観測例しかない。

このように、**生命保有惑星を発見するためには、系外惑星が現在どのような大気・表層環境をもち、どのように進化してきたかを明らかにしなければならない。**そのアプローチとして太陽系外の様々な恒星系において主星からの紫外線輻射量と惑星高層大気の組成や散逸量を観測する必要がある。一方、系外惑星観測はこれまで天文学分野を中心に進められ、現在各国で進められている主要な地上・宇宙望遠鏡はみな可視光・赤外線領域を対象とした計画であり、紫外線観測は含まれていない。その突破口として**研究代表者らがこれまで太陽系科学において培ってきた紫外線観測技術を新たに系外惑星分野に展開させ、紫外線宇宙望遠鏡による系外惑星大気観測を実現することが必要である。**

2. 研究の目的

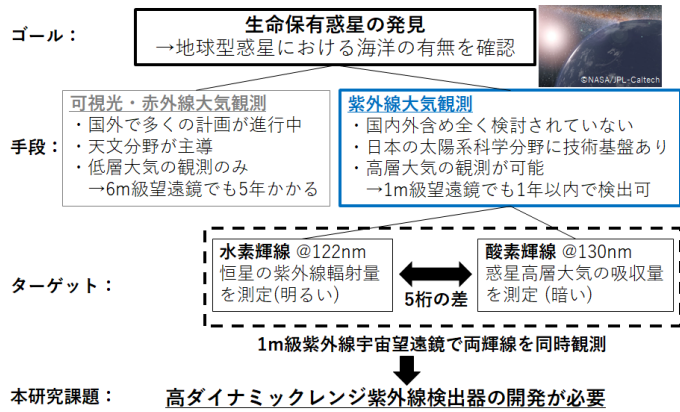
生命保有惑星の発見という大目標に向けて、**紫外線宇宙望遠鏡により様々な恒星系を観測し、主星からの紫外線輻射量と惑星高層大気の組成や散逸量を測定することを目指す。**紫外線は高層大気の主要な加熱源であり、主星の紫外線輻射量は惑星の大気分布を推定するのに必須となるパラメータであるが、これまで赤色矮星の紫外線輻射量はほとんど測定されていない。さらに赤色矮星周りのハビタブルゾーンは主星のごく近傍に位置するため、惑星が受ける紫外線輻射量は太陽系の数倍から10倍以上強いと考えられる。仮にこうした強紫外線環境下に地球型惑星を置くと、CO₂の少ない地球型の大気組成かCO₂の多い金星型の大気組成かで高層大気の広がりには大きな差があることが予想される。地球では海洋の存在と地殻変動による循環により大気中の二酸化炭素が取り除かれていると考えられている。すなわち遠紫外線領域によるトランジット分光観測によって**広がった酸素大気**が検出された場合、その惑星が海洋を有している可能性が高い。観測が実現すれば惑星の現在の表層環境の情報を得るだけでなく、惑星大気進化過程に関する理論を検証できる。

本研究は**太陽系探査で実証してきた紫外線観測技術を太陽系外惑星の大気観測に展開させる新たな試み**である。可視・赤外による系外惑星観測計画が世界各国で急速に進む中、**太陽系探査**

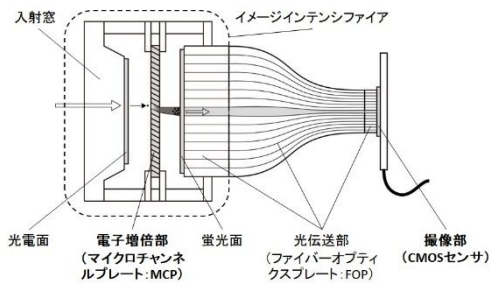
で技術を培った紫外線領域に着目し、惑星高層大気分光観測から海洋を有する地球型惑星の発見を目指すという発想は本研究独自のものである。

3. 研究の方法

本研究では 1m 級の紫外線宇宙望遠鏡による系外惑星大気検出および恒星紫外線放射量の計測の実現を目指す。既存の紫外線観測技術を応用する上で最大の課題となるのは検出器のダイナミックレンジである。赤色矮星が発する紫外線放射量の大半を占めるのは水素ライマン線（波長 122 nm）である。一方、トランジット分光法により地球型惑星の高層大気検出でターゲットとなるのは酸素原子輝線（波長 130 nm）である。本研究の目的を達成するためにはこれら 2 波長を同時に観測できる分光装置を開発することが必要であるが、両者の明るさは 5-6 桁も異なる。この波長域ではマイクロチャンネルプレート（MCP）検出器が適しているが、従来 MCP からの信号読み出しに用いられてきたレジスタティブアノードエンコーダには毎秒 1 万個程度の光子計数が限界という欠点があり、ダイナミックレンジ不足のため 2 つの輝線を同時に観測できない。また 2 つの波長が近すぎるため、分光装置内で光学系や検出器を分けことは困難である。そこで本研究では暗い酸素輝線と明るい水素輝線を 1 つの検出器で同時に観測するため、高いダイナミックレンジをもつ新型の紫外線検出器を開発する（図 1）。



申請者は新型の紫外線検出器として、受光面および電子増倍部は従来型を維持したまま、位置検出部の代わりに可視光用の CMOS イメージセンサを用いる方式を考案した。電子増倍部からの電子雲を蛍光面に衝突させて可視光に変換し（イメージンテンシファイア）、ファイバーオプティクスプレート（FOP）を用いて CMOS センサに光を伝送する方式である（図 2）。50 fps 以上で光子計数ができれば 6 桁以上のダイナミックレンジを達成できる見込みであるが、汎用検出器である CMOS センサは飛躍的な技術進歩により高解像度ながら 100 fps 以上の高速撮像が可能なものが既に実用化されている。この方式ならば紫外線検出器として高速光子計数が可能となり、ダイナミックレンジを向上させて系外惑星観測実現に向けた技術課題を突破できる。本研究課題では宇宙望遠鏡への搭載が可能な新方式の検出器を開発し、どこまでダイナミックレンジを向上できるか明らかにする。そのために本検出器用に最適化した MCP および CMOS センサ、演算処理回路を選定・開発し、組み合わせて新型検出器を完成させる。光学試験によりダイナミックレンジおよび位置分解能を測定し、また宇宙環境試験により衛星搭載性を確認する。



4. 研究成果

本研究では 2020-2022 年度にわたり以下の研究成果を挙げた。

(1) 即時画像処理による光子計数が可能な高速プログラムの開発

新型検出器で光子計数を行うには、同じピクセル上に複数の光子カウントが重ならないように CMOS センサの高速撮像を繰り返す必要がある。全画像をそのまま保存すると毎秒 100MB 程度と膨大なデータ量になるため、宇宙望遠鏡に搭載するためには機上での即時処理が必須となる。本研究では高速処理が可能な FPGA を用いて、光子計数および位置検出の逐次画像処理を行う高速プログラムの開発を進めた。開発環境および FPGA 回路基板には過去の研究実績で調達済みの民生品を用いた。CMOS の画素ラインごとに読み出ししながら逐次重心計算を行う高速処理プログラムを開発し、動作確認及び計算処理時間の算出を実施した。

(2) 高速撮像 CMOS センサとイメージンテンシファイアによる原理実証

高速読み出しが可能（フレームレート 100 fps 以上）で高解像度（2000x2000 ピクセル以上）

の CMOS センサを有する民生品カメラを選定した。遠紫外線における高感度化処理を適用した MCP (ファネル型 MCP) をもつイメージンシファイアを試作し (図 3)、CMOS カメラと組合せて試験を行った (図 4)。紫外線光源を用いてフォトンカウンティングの評価試験を行い、新型検出器の原理を実証した (図 5)。

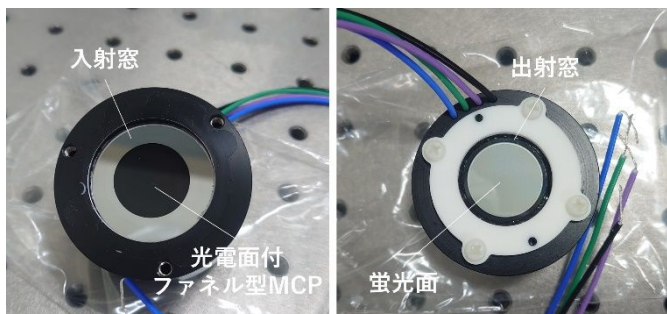


図 3. 試作した高感度イメージンシファイア。

(3) 宇宙機搭載可能な CMOS センサの選定及び FPGA 高速処理回路基板の開発

高速読み出し可能かつ宇宙機搭載が可能となる見込みのある CMOS センサを選定した (図 6 右)。選定した CMOS センサの形状に合わせて接着用の FOP を新規に設計した。また前述で開発済みの高速処理プログラムを搭載する FPGA 回路基板を開発した (図 6 左)。即時処理に必要な能力の FPGA を選定し、宇宙望遠鏡への搭載を念頭に置いた回路を設計した。



図 4. フォトンカウンティング評価試験の様子。

(4) CMOS センサへの FOP 接着及び熱環境耐性の評価

CMOS センサへの FOP の接着方法は過去の要素開発研究において確立済みと考えていたが、過去の試験より厳しい熱環境条件で新たに熱サイクル試験を実施したところ、CMOS センサに破損が生じることがわかった。そこで要素試験と評価を繰り返して FOP と CMOS の接着方法を見直し、熱サイクルへの耐性の強い新たな接着方法を見出した。この方法で、衛星搭載機器に要求される典型的な熱サイクル条件に対しても健全であることを確認した。(3)で選定した CMOS センサに新たな方法で接着が可能となる FOP を新規に設計・製作した。

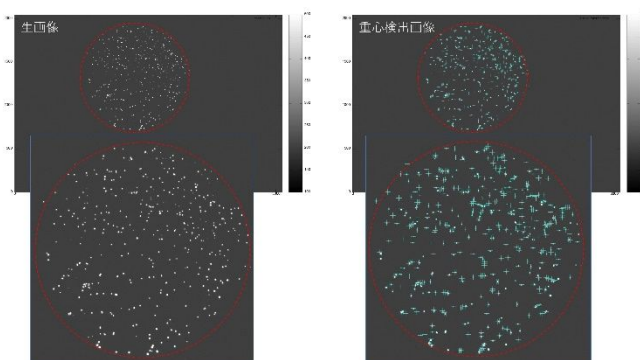


図 5. フォトンカウンティングによる位置検出例。



図 6. 選定した CMOS センサ (右) 及び開発した FPGA 回路基板 (左)。

(4)における CMOS センサと FOP の接着方法の見直しは当初予期していなかった項目であるが、本研究によってその課題を克服することができた。今後も研究開発を継続し、以下の項目を実施していく。

- ・ (3)で選定した CMOS センサ及び開発した FPGA 回路基板を組み合わせた性能評価
- ・ (3)で選定した CMOS センサへの FOP の接着及び熱サイクル環境への耐性評価
- ・ (2)で試作したイメージンシファイアと FOP 付 CMOS センサ、FPGA 回路基板を全て組合せた検出器全体での性能評価

本研究により確立した CMOS センサを用いた紫外線検出方式は、申請者らが中心となり検討を進めていた「惑星科学、生命圏科学、および天文学に向けた 紫外線宇宙望遠鏡計画 (LAPYUTA 計画)」にも採用見込みであり、計画の実現に向けた中核的な役割を担っている。新型検出器の次期紫外線宇宙望遠鏡への搭載・実証に向けて今後も開発研究を展開する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Murakami, G., F. Tsuchiya, M. Kagitani, A. Yamazaki, K. Yoshioka, M. Kuwabara, K. Enya, and S. Matsuda
2. 発表標題 Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly (LAPYUTA) mission: instrument overview
3. 学会等名 Magnetospheres of Outer Planets Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上豪、ほか
2. 発表標題 紫外線宇宙望遠鏡LAPYUTAによる氷衛星プリューム観測計画
3. 学会等名 惑星圏シンポジウム2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上豪、ほか
2. 発表標題 Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly (LAPYUTA)
3. 学会等名 光赤天連シンポジウム2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松田 昇也 (Matsuda Shoya) (20772213)	金沢大学・電子情報通信学系・准教授 (13301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	桑原 正輝 (Kuwabara Masaki) (60827575)	立教大学・理学部・特任准教授 (32686)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関