

立教大学学術推進特別重点資金(立教SFR)  
共同プロジェクト研究

2022年度研究【経過・成果】報告書

研究代表者	所属部局・職名		氏名					
	理学部教授		亀田真吾					
研究課題	太陽系外地球型惑星大気の散逸現象観測に向けた高分散紫外線分光器の開発							
研究組織 (研究代表者・ 研究分担者) 2023年3月現在	所属研究機関・部局・職名		氏名					
	立教大学・理学部・教授		亀田真吾(研究代表者)					
	立教大学・理学部・准教授		中野祐司(研究分担者)					
	立教大学・理学研究科・博士課程前期課程2年		平林賢人(研究分担者)					
	立教大学・理学研究科・博士課程前期課程1年		岸田真於(研究分担者)					
全研究期間	2022年度		～	2023年度				
研究経費※ (上段:支出金額)	2022年度		2023年度		年度	総計		
	3,400,000	円	0,000,000	円	0,000,000	円	3,400,000	円
(下段:採択金額)	3,400,000	円	2,600,000	円	0,000,000	円	6,000,000	円

※1円単位で記入

研究の概要(200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

既に数多くの太陽系外惑星が発見され、地球と同程度の大きさの惑星も数多く見つかっている。しかし、地球のように海洋を有し、温暖湿潤な気候の惑星は見つかっていない。2020年代には、系外惑星大気観測を主目的とした光赤外宇宙望遠鏡が複数打ち上げられ、大型地上望遠鏡による観測が進められる。しかし、表層環境推定に重要な紫外線領域の観測設備は抜け落ちている。そこで本研究では、地球のように海洋を持ち、二酸化炭素濃度の低い大気を持つ太陽系外地球型惑星の探索を目標とし、紫外線宇宙望遠鏡搭載を見据えた高分散分光器の開発を進め、また、それを用いた地球型惑星の上層大気観測計画を検討する。

キーワード(研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[系外惑星] [紫外線] [惑星大気]

**研究【経過・成果】の概要** (図・グラフ等は使用しないこと。)

本研究では、紫外線宇宙望遠鏡による地球型系外惑星の上層大気観測を目指し、以下の2つの課題に取り組んできた。

**(A) 高感度高分散紫外線分光器の開発**

2022年度は紫外線分光器の主要部の1つである、検出器の量子効率の絶対値測定に注力した。本研究では、地球型系外惑星の上層大気に含まれる水素原子、酸素原子、炭素原子を検出することを目標として、それらの原子による吸収線幅程度の波長分解能を持つ分光器の開発を行っている。観測者(太陽系)から見て、惑星が恒星面を通過(トランジット)する際に、分光観測を行い、各成分の吸収線波長における吸収量を測定できれば、それらの成分が大気中に含まれる量を見積もることができる。ここで、吸収線幅程度の高分散素子が必要となるだけでなく、暗い天体の観測を可能とする光子計数が可能な高感度検出器が必要となる。特に、地球型惑星は木星型や海王星型に比べて半径が小さく、恒星光の遮蔽量が少なくなる。そのため、半径の小さい恒星(低質量星)周りの地球型惑星が当面の観測対象となる。太陽系周辺の恒星の8割は低質量星であり、現状最も良い観測対象と考えられる地球型惑星を複数有する恒星 TRAPPIST-1 も低質量星である。しかし、低質量星は暗く、低温であるため観測対象とする酸素原子線(130nm)等の遠紫外線領域の放射強度は、太陽型星よりもずっと低い。そのため、本研究ではマイクロチャンネルプレート(MCP)を使った紫外線検出器を採用する。MCPによって、入力紫外光から放出された2次電子を増幅し、それらを蛍光面に衝突させ、その発光(可視光)を高速のCMOSイメージセンサで捉え、光子計数を行う方式である。研究代表者は既にMCPの開口率を上げたFunnel MCPによって、紫外線領域での量子効率を向上させることを示したが、本研究以前には通常品との相対値しか示しておらず、その際に参照した通常品の量子効率の絶対値は、別の物品の値であり、かつ測定時期も10年程度前の物となっていた。さらに、紫外線領域での量子効率向上のため、MCPの光入射面の光電物質としてCsIがよく用いられるが、CsIは大気(特に水蒸気)との反応により、量子効率が低下することがよく知られており、過去の試作品では大気にさらされる時間も長くなってしまっていたため、劣化後の値が得られていた可能性がある。そこで、本研究では、あらためて1枚のMCP表面に、開口率を上げたファネル型と通常型の領域を形成し、また紫外線領域での量子効率向上のためのCsIを蒸着し、(1)ファネル型CsI有り(2)ファネル型CsI無し(3)通常型CsI有り(4)通常型CsI無し、の4領域を持つMCPを製造した。それに際し、専用の小型真空チャンバを製作し、メーカ(浜松ホトニクス)での製造後すぐにチャンバ内に取り付け、真空を保ちながら立教大学池袋キャンパスに輸送し、測定が行えるようにした。

次に、光子計数のためのソフトウェア開発を行った。毎秒20フレーム程度で撮像が可能となるCMOSイメージセンサを利用することで、1光子がMCP光電面に到達することによって生じる電子雲が蛍光面上に作る発光領域を、重複なしに捉えることが出来る。今年度は、このように、電子雲ごとに重なりが無い状態で、それらの電子雲の重心位置と蛍光面上での発光強度を求め、さらにそれらの個数を求めるためのプログラムの開発を行った。得られた画像を2値化し、数-10画素程度電子雲発光の位置が離れていれば別々の光子入力によるものとして判別し、その重心座標を記録することに成功した。これによって今年度製作したMCPの(1)-(4)領域の量子効率の相対値を測定した結果、ファネル型による量子効率の向上率((2)に対する(1))は波長によって異なり、1.6-2.0程度と先行研究と同程度の値となった。一方で、劣化が懸念されていた過去の試作品についても同様に測定を行ったところ、相対値は1.3程度となっており、ファネル型ではCsIの劣化による量子効率の低下の度合いが大きくなることを示唆する結果が得られた。

出力される電子雲の計数には成功したが、量子効率の絶対値を求めるためには、さらに分光光源の強度を測定する必要がある。量子効率が測定されている較正済みのフォトダイオードを用いるが、感度がMCPに比べて低いため、MCPに入射する光の量はノイズレベル以下となってしまう測定できない。一方で、フォトダイオードで測定可能な光量では、光子数が多すぎてMCPで計数を行うことができない、という問題がある。そこで、分光光源内に2種類の大きさのピンホール(直径0.5mmと25 $\mu$ m)を設置して、光量を調整できるようにした。また、現有の紫外線観測が可能なCCDカメラを用いることによって、0.5mmのピンホールと、25 $\mu$ mのピンホールを設置した時に、それぞれの光源強度の相対値を計測した。本CCDカメラは短時間から長時間の露光を行うことができるため、これらの相対値を求めることができ、これらの測定結果の組み合わせによって絶対値を求めることができる。しかし、本年度の実験の結果、本研究の観測対象として、特に重要な120-140nmの領域では、分光光源の強度が10-20%程度変動することが確認された。ランプ電源の温度安定性や160nm以下の光量測定に必要な窒素ガスの流量安定性なども入念に確認して試験を行ったが、150-200nmでは変動が1-3%程度に抑えられているにもかかわらず、120-140nmでは上述のように変動が大きいという結果が得られた。分光光源に用いられている重水素ランプの特性と思われるが、現時点ではその原因が明確ではない。ランプの安定度が10-20%程度であるとして、本実験の測定時間のスケールで、完全にランダムな変動であれば統計量を増やすことによって解決できるが、系統的な変動なのかどうか分からない状況であり、2023年度は引き続きこの光源の安定度の調査に取り組む。

## 研究【経過・成果】の概要(つづき)

## (B) 地球型惑星の表層環境推定に向けた上層大気観測の実現性検討

太陽系外の地球型惑星が数多く見つかってきており、表層に液体の水が存在可能と考えられるハビタブルゾーンに位置する惑星も複数発見されている。このような惑星は、地球のように生命を育む惑星である可能性があり、その表層環境を明らかにすることは、ここ数十年の宇宙科学の最重要課題である。2021年12月には、開発費1兆円規模の大型計画である口径6.5mの赤外線宇宙望遠鏡が打ち上げられ、ハビタブルゾーンに地球型(岩石型)惑星を有するTRAPPIST-1系の惑星大気の観測が行われてきた。液体の水が表層に安定的に存在するためには大気が必要であり、さらにその大気組成によって温度も大きく異なるため、表層環境を推定する上で大気組成は非常に重要である。しかしながら、1年の観測期間が完了した2022年末の時点で、TRAPPIST-1の惑星には大気が検出されていない。これらの惑星が大気を持たないことが確定したわけではなく、6.5mの赤外線宇宙望遠鏡をもってしても観測精度が1年では充分ではないことを示している。

そこで本研究では上層大気から表層環境に迫るべく、表層環境と上層大気の関係と、上層大気の実現性に関する研究を進めている。2022年度は上層大気モデルの見直しを行い、原子分子反応係数、特に酸素原子の反応係数の精度と、係数の幅によるモデル上層大気密度分布への影響を確認した。例えば酸素原子同士の衝突励起の係数は、40年ほど前のオーロラ発光を説明するために進められた研究に基づいており、一方で、その基となる論文を確認すると観測結果を必ずしも説明しきれていない状況であった。これに対して、2022年度には簡易的な実験による測定を研究代表者・分担者で検討したが、大規模な装置を導入する必要があるという結論に至った。それと並行して、上層大気モデルに1桁の幅を持たせて大気組成高度分布の差を確認したところ、上層大気(高度100km以上)の中でも下部の高度密度分布は変わるが、大気のトランジット観測に重要となるさらに上層(数千km以上)の分布は大きくは変化しないことが確認された。来年度は、酸素原子同士の衝突反応係数だけでなく、その他の値についても幅を持たせて計算を実行し、影響を評価する。また、この活動に際して、酸素原子については、多くの反応係数が実験・観測に基づいて検証されているが、炭素原子については検証されていないものが多いことが分かった。地球型惑星が持つ大気は、必ずしも地球のような窒素・酸素を主とした大気ではなく、金星や火星のように二酸化炭素を主とする大気を持つもの、少なからず存在すると考えられるため、それらの惑星についてトランジット観測を行った際に上層大気を検出できるかどうか、検討する必要がある。

現状、地球型惑星大気の上層大気モデルは複数存在しており、どれも現在の地球や金星の上層大気を再現できているが、低質量星周りの地球型惑星がうける強いX線・EUV放射を受けた場合の上層大気の分布は大きく異なる。2022年度には、これらのモデルごとにその大気の広がりを探り、トランジット観測を行った際の減光率を計算した。また、口径1.7mの紫外線宇宙望遠鏡WSO-UV、0.6mの紫外線宇宙望遠鏡LAPYUTA、将来計画である口径6mの紫外・可視・赤外線宇宙望遠鏡と、項目(A)で要素開発を行っている紫外線分光器を組み合わせることで、地球型惑星上層大気の実現性の検討を行った。その結果として、最も上層大気が広がるモデルでは0.6mのLAPYUTAでも検出可能であるが、最も広がり小さいモデルでは検出困難であると分かった。ただし、この結果はWSO-UVに搭載を予定している低分散分光器UVSPEXを搭載した場合のものであり、新たに開発・検討中の高分散分光器を採用した場合は、検出が可能となるという結果も得られている。WSO-UV/UVSPEXを高分散分光器とするためには、スペースが十分ではないが、LAPYUTAや将来計画ではスペースが確保できる可能性があり、これらの計画に向けた高分散分光器の開発の重要性をあらためて示すことができた。これらの結果をまとめ、2023年3月の日本天文学会春季年会などで発表した。

**研究発表** (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

- ① [1] D. Sibeck, S. Kameda (16/25), Quantifying the global solar wind-magnetosphere interaction with the Solar-Terrestrial Observer for the Response of the Magnetosphere (STORM) mission concept, *Front. Astron. Space Sci.*, 10, 2023, 10.3389/fspas.2023.1138616
- [2] K. Ogawa, S. Kameda (21/31), Particle size distributions inside and around the artificial crater produced by the Hayabusa2 impact experiment on Ryugu, *Earth, Planets and Space* volume 74, Article number: 153 (2022), 10.1186/s40623-022-01713-3
- [3] K. Kuramoto, S. Kameda (11/36), Martian moons exploration MMX: sample return mission to Phobos elucidating formation processes of habitable planets, *Earth, Planets and Space*, Volume 74, Issue 1, article id.12, 2022, 10.1186/s40623-021-01545-7
- [4] K. Ogohara, S. Kameda (24/24), The Mars system revealed by the Martian Moons eXploration mission, *Earth, Planets and Space*, Volume 74, Issue 1, article id. 1, 10.1186/s40623-021-01417-0
- [5] S. Shroeder, S. Kameda (8/29), Characterization of the MASCOT landing area by Hayabusa2, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 666, id.A164, 10 pp., 2022, 10.1051/0004-6361/202244059
- [6] A. Gomez de Castro, S. Kameda (10/10), OUL: an ultraviolet wide field imager for the Luna 26 mission, *Proceedings of the SPIE*, Volume 12181, id. 121810D 9 pp. (2022)., 10.1117/12.2630627
- [7] T. Michikami, S. Kameda (17/41), Three-axial shape distributions of pebbles, cobbles and boulders smaller than a few meters on asteroid Ryugu, *Icarus*, Volume 381, article id. 115007., 2022, 10.1016/j.icarus.2022.115007
- [8] G. Cucho-Padin, S. Kameda, D. Sibeck, The Earth's Outer Exospheric Density Distributions Derived From PROCYON/LAICA UV Observations, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Volume 127, Issue 6, article id. e30211, 2022, 10.1029/2021JA030211
- [9] N. Takaki, S. Kameda (6/19), Resurfacing processes constrained by crater distribution on Ryugu, *Icarus*, Volume 377, article id. 114911., 2022, 10.1016/j.icarus.2022.114911
- ④ (学会発表) [10] 亀田真吾他、Current Status of UVSPEX onboard WSO-UV, *JpGU2022*, 2022年6月。
- (学会発表) [11] S. Kameda et al., Upper atmosphere of Earth-like exoplanets around low-temperature stars, *THE THIRTEENTH MOSCOW SOLAR SYSTEM SYMPOSIUM*, 2022年10月, Moscow (Online発表)
- (学会発表) [12] 亀田真吾他, 太陽系外地球型惑星上層大気の検出可能性, 天文学会春季年会, 2023年3月, 立教大学池袋キャンパス
- (シンポジウム・招待講演) [13] S. Kameda et al., Solar-Terrestrial Physics to Stellar-ExoTerrestrial Physics, *Symposium on the Future of Heliospheric Science: From Geotail and Beyond*, 2023年3月, 東京大学本郷キャンパス
- (受賞 [14] 第五回地球惑星科学振興西田賞 (申請は2022年12月、受賞連絡は4/3))