

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

2023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) 2024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・理学部・助教		桑原正輝(研究分担者)					
	立教大学・理学部・特任准教授		中山陽史(研究分担者)					
	立教大学・理学研究科・博士課程前期課程2年		岸田真於(研究分担者)					
	立教大学・理学研究科・博士課程前期課程1年		加藤龍雅(研究分担者)					
立教大学・理学研究科・博士課程前期課程1年		一ノ瀬翔太(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	2,600,000	円	0,000,000	円	6,000,000	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ている。しかし、現時点では地球型系外惑星大気は未検出のままである。一方、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惑星の上層大気観測を目指し、2022年度に引き続き、(A)高感度高分散紫外線分光器の開発と(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の2つの課題に取り組んできた。紫外線宇宙望遠鏡 LOPYUTA 計画の採択を受け、系外惑星観測に適した高分散分光器の設計を優先的に進め、成立性の確認を行った。

(A)高感度高分散紫外線分光器の開発

2022年度に試験用のMCPとそのための小型真空チャンバ設備を整え、また、光子計数のためのソフトウェア開発を進めたが、分光光源の強度測定には課題が残っていた。光源に用いる重水素ランプの強度は150-200nmでは安定していることが確認できているにもかかわらず、本研究で重要な120-140nmでは10-20%程度の変動が見られており、その原因が分かっていた。そこで、本年度はMCPの量子効率測定に必要な分光光源の強度安定性に関する実験を進めた。120-140nmの範囲の光は酸素分子の解離を引き起こすため、大気中をほとんど通らない。一方、窒素分子はこの波長域では解離しないため、我々が使用している測定系では、光路中を窒素分子で満たす必要がある。窒素分子ガス(以降、窒素ガス)は、池袋キャンパス13号館に隣接する液体窒素タンクから取り出され、実験を行っている13号館6階のクリーンルームまで供給される。本実験で、数日程度をかけて分光光源強度の測定を継続的に行ったところ、液体窒素の汲み出し時にわずかながら受光器の出力が低下することが確認された。内部の気圧は計測できていないが、液体窒素の汲み出しに伴う窒素の流量の低下に伴い、光路における光の透過率がわずかに低下したことが原因であると考え、遠隔制御による測定を行えるよう設備を整え、測定を夜間に実施することにした。また、クリーンルーム内の室温は1℃程度以下の範囲で制御されているが、窒素ガスの供給管は外気にさらされており、これによる流量の変化を抑えるため、クリーンルーム内にある大型の真空用チャンバに外部からの窒素ガスをためてから、本実験の測定系に供給することとし、外部の気温変化を受けにくくなるようにした。また、測定系に複数のファンを取り付け、クリーンルーム内の温度変化と測定系の温度変化を極力近づけるようにした。これにより、短時間での変動を1%以下に抑えることができたものの、ランプを点灯してから徐々に検出器の出力が上昇していき、1%以内の変動に収まるまでに、ランプの点灯後6時間程度の時間がかかるという結果が得られた。ここで、窒素パージ自体は12時間程度以上前から行っており、十分な時間が経過していると考えられる。測定装置の温度は1時間程度で既に安定しており、温度変化や外気の変化が原因ではないと考えられるが、現時点でも原因を特定することは困難である。候補として、装置内部の(窒素分子以外の)脱ガスによる光路中の透過率のわずかな低下がおきており、光源である重水素ランプを点灯すると、装置内に迷光として紫外線が照射され脱ガスが起き、その脱ガス源からの放出量が徐々に下がっていくことによって、透過率が上昇し、出力が上がっていた、という可能性が挙げられる。そこで、窒素ガスを装置から部屋の外に排気する途中の配管に、四重極質量分析器(QMS)を取り付け窒素濃度の変化の測定を試みた。ここで、QMSによる測定において全圧の上限値が 10^{-2} Paであるため、バリアブルリークバルブを用いて窒素排気配管からの一部のガスを取り出すこととした。その上限程度まで圧力を上げた場合に、他の質量数の成分の測定下限値は 10^{-7} Pa程度であり、酸素分子の分圧がその値以下まで抑えられていることが確認出来た。一方で、QMSの真空配管内にあると思われる水分子起因の質量数の成分は残っており、これらはベーキングによって抑えられる可能性があるが、2023年度中には実施できなかった。2024年度中には実施しておきたいが、一方で、酸素分子の量が十分少ないことから、分光測定系の光路中に(酸素分子を多く含む)大気が無視出来ないほどの量だけ漏れ込んでいるという可能性は排除出来たと考えている。以上が2023年度の作業内容であり、残念ながら2022年度からの継続課題である、光源の安定性については完全に解決はしていないが、短時間(30分程度)での変動は十分に抑えられており、酸素分子を含む大気の混入も起きていないことが確認出来たため、2024年度は測定系の変更によって対応する方針をたてることができた。現状の設備では、MCPの量子効率のためには、まず分光光源の強度を較正済みフォトダイオードやCCDイメージセンサで測定してから、一度大気に開放しMCPを測定系に取り付ける必要があるが、現状ではそのように装置の付け替えを行った際に十分な精度で分光光源強度を安定させる保証が得られていない。実際に、2023年度にも一度装置のつけ外しを行い再現性を確認したが、出力の安定に必要な6時間程度の時間をかけたあとも、付け外しの前後で10%程度の変動が起きてしまっている状態である。そのため、測定装置の変更が必要であるという結論に達した。2024年度には、今回の測定でも使用した大型の真空用チャンバ内に窒素を満たし、その中に測定系を構築し、比較用の検出器(フォトダイオードやCCDイメージセンサ)とMCPチャンバを中にいれ、電動ステージによって、大気に開放せずに、短時間で出力を比較することで、量子効率を測定することができれば、分光光源強度を安定させることができると考えられる(実際には光源強度の安定というよりは、光路中の透過率の安定が重要と考えられる)。大型の電動ステージ等が必要であり、新規採択された科研費を用いて測定系を構築することを予定している。

この実験と並行して、LOPYUTA搭載に向けた高分散分光器の設計を行った。LOPYUTAでは当初分光器が1つ搭載される提案となっており、要求される空間分解能0.1秒角を達成するために0次光を用いたデータの事後処理が

研究【経過・成果】の概要 (つづき)

必要となっている。衛星の姿勢制御精度は1秒角程度であるが、高速撮像により姿勢のぶれ量を特定し、そのブレを考慮して取得された画像データを処理することによって、要求される空間分解能と波長分解能を達成するという手法である。この手法は、比較的明るい太陽系内天体では有効であるが、本研究で主要な観測対象となる低質量星周りの地球型惑星の観測に際しては、低質量星の発光強度が低いために、ぶれ量の測定を十分な精度で行うことができない。一方で、トランジットを見る系外惑星の観測では空間分解能要求が緩いため、低倍率の光学系により空間分解能を下げること、暗い天体でも波長分解能の低下を防ぐことができる。系外惑星の観測は、太陽系天体の観測と同程度の優先課題であり、現状 LOPYUTA は、高空間分解能の分光器(相対的に低波長分解能)と高波長分解能の分光器(相対的に低空間分解能)を持つ設計となっている。本研究では、この高波長分解能(高分散)分光器の設計を行った。一般的に、焦点距離を長くすれば波長分解能をあげることができるが、LOPYUTA に(限らず飛行体では)装置搭載可能な空間に大きな制約がある。そこで、本装置は、クロスディスパーザ付エシエル分光器の設計を採用した。望遠鏡の焦点面にスリットを設置し、トロイダルミラーによって平行光をエシエル回折格子に導き、エシエル回折格子と分散方向を垂直にしたトロイダル回折格子をクロスディスパーザとして用いるという設計である。ここで、トロイダルミラーとスリット間の距離をトロイダル回折格子と検出器間の距離より長くすることで倍率を低下させた。これにより、本研究の主要な観測対象である、水素、酸素、炭素原子、炭素イオンの輝線を波長分解能 40000 程度で観測することが可能となる見込みであり、この設計をもとに衛星全体の設計を進めている状況である。2024 年度以降は、この設計を詳細化しつつ、肝となるエシエル回折格子の試作と効率の測定を行う予定であり、本研究ではその準備を進めることができた。

(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

TRAPPIST-1 系のハビタブルゾーンにある惑星について、口径 6.5m の赤外線宇宙望遠鏡 JWST で観測が行われたが、現時点でも大気は未検出のみである。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、まだ十分な精度で観測が行われていないことを示している。本研究では上層大気に注目し、その観測実現性と、上層大気と表層環境の関係を理論的に予測し、上層大気の観測から惑星表層環境に迫ることを目標としている。2023 年度は、過去の研究で行われた計算において、用いられた物理パラメータや手法を確認し、複数の上層大気モデルに基づいて観測実現性検討を行った。上層大気モデルには流体力学的な大規模散逸が起きることを予測する Johnstone+18 や、粒子的な散逸(Jeans 散逸)を前提とする Tian+08 や、電子遷移による放射冷却を取り入れた Nakayama+22 を用いた。ここで、主星からの XUV 放射が惑星の大気構造を決定する重要なパラメータとなるため、最新の恒星放射推定データを用いて計算を行った。過去の研究では、トランジット時には恒星の中心を通過するという仮定でトランジット深さの計算を行っていたが、本研究では、更新された TRAPPIST-1 系惑星の軌道情報を元に、軌道傾斜角に応じたトランジット中のライトカーブを計算した。そのほか、過去の計算コードを再確認し修正を行った。結果として、口径 1.7m の WSO-UV では観測が可能となるものの、口径 60cm の LOPYUTA では TRAPPIST-1 系の惑星の上層大気の検出は困難であるという結論が得られた。過去に行った計算では、恒星の強度と検出器のノイズ評価に問題があり、ノイズ量は無視できる程度と考えられていたが、TRAPPIST-1 の 120-140nm 波長行きでの輝線強度は当初想定よりも低い可能性があり、その場合はそのノイズによりトランジットの検出は困難となるという結果が得られた。しかし、TRAPPIST-1 はかなり暗い恒星であり、同じ低質量星である赤色矮星に分類される恒星でも、それよりずっと明るい恒星が多いため、そのような主星の回りにあり、濃い上層大気が存在し、常時比較的多量の大気散逸が起きつづけているような惑星であれば、60cm 級の LOPYUTA でも観測は可能となる見込みである。

このような現象を対象とした研究は国内外でもあまり進められておらず、また、LOPYUTA 打ち上げ後までは観測手段もないため、本プロジェクトチームメンバーが中心となって検討を行っている。さらに将来の計画となる Habitable Worlds Observatory は口径 6m で、紫外線にも対応する予定であり、本研究で進めた技術開発と観測検討をそのまま活かすことができ、LOPYUTA より圧倒的に大型の口径を活かし、より遠方までの多数の地球型惑星の観測が可能となる。このような状況を、2023 年 7 月に行われた Science with the Habitable Worlds Observatory and Beyond (STScI, ボルチモア) で紹介した。NASA 側では紫外線の分光器の搭載自体はほぼ決定しているものの、検出器の長期的な開発体制の維持に問題点があり、日本の貢献も期待されている状況である。現在は、2023 年度に更新した最新の検討結果を論文にまとめている。

※この(様式 2)に記入の【経過・成果】の公表を見合わせる必要がある場合は、その理由及び差控え期間等を記入した調書(A4縦型横書き1枚・自由様式)を添付すること。

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] G. Jones, S. Kameda (138/233), M. Kuwabara(144/233), et al., The Comet Interceptor Mission, Space Science Reviews, Volume 220, Issue 1, article id.9, 2024
- [2] M. Shoki, S.Kameda (10/17), et al., Fraunhofer line-based wavelength-calibration method without calibration targets for planetary lander instruments, Planetary and Space Science, Volume 240, article id. 105835., 2024
- [3] K. Tsumura, S. Kameda (17/24), et al., Heliocentric distance dependence of zodiacal light observed by Hayabusa2#, Earth, Planets and Space, Volume 75, Issue 1, article id.121, 2023
- [4] M. Yamada, S. Kameda (13/20), et al., Inflight calibration of the optical navigation camera for the extended mission phase of Hayabusa2, Earth, Planets and Space, Volume 75, Issue 1, article id.36, 2023
- [5] H.Ohnishi, Y. Nakano (4/4), et al., Generation of collimated far-ultraviolet (FUV) light using the laser-produced metal plasma, J. Appl. Phys. 134, 013103, 2023
- [6] Y. Ito, T. Yoshida, A. Nakayama, Numerical Performance of Correlated-k Distribution Method in Atmospheric Escape Simulation, The Astrophysical Journal, Volume 962, Issue 2, id.106, 13 pp, 2024
- [7] T. Nishioka, A. Nakayama (8/8), et al., Study of Atmospheric Ion Escape From Exoplanet TOI-700 d: Venus Analogs, Journal of Geophysical Research: Space Physics, Volume 128, Issue 8, article id. e2023JA031405 (2023)
- ④ [8] (国際研究会・口頭発表) S. Kameda et al., Life-environmentology, Astronomy, and Planetary Ultraviolet Telescope Assembly (LAPYUTA) mission, and exospheres of terrestrial exoplanets -UV Technology Development-, Science with the Habitable Worlds Observatory and Beyond, July 2023, STScI (Baltimore)
- [9] (学会発表・ポスター) M. Kishida, et al., Simulation of Exoplanetary Oxygen Exospheres for Ultraviolet Transit Observation, JpGU 2024, 幕張
- [10] (学会発表・口頭) Y. Nakano, Stability of diatomic carbon anion C₂⁻ in interstellar clouds: a time-resolved laboratory spectroscopy in a cryogenic ion storage ring Workshop on Interstellar Matter (ISM2023), 2023/11/8-10, Sapporo (Oral)
- [11] (招待講演) 中野祐司, 第12回 停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会 (12th SSRI) 極低温イオン蓄積リングを用いた物理
- [12] (招待講演) 中野祐司, 極低温静電型イオン蓄積リングを用いた冷却分子の物理とアストロケミストリー研究, 東北大マテリアル・計測ハイブリッド研究センター 若手フォーラム, 2023/11/7-8、東北大
- [13] (招待講演) 中野祐司, 高エネルギー重イオンを用いた原子物理, 日本物理学会 2024 年春季大会, シンポジウム「重イオン加速器 HIMAC での物理学研究」, 2023/3/18
- [14] (招待講演) 中山陽史 LAPYUTA による紫外線分光を用いた地球型惑星大気の検出と安定性の理解に向けて, JASMINE Consortium Meeting 2023, 2023/8/1~2, 三鷹(東京)
- [15] (招待講演) 中山陽史, 大規模大気散逸の理解に向けて: LAPYUTA による系外惑星観測 第 25 回惑星圏シンポジウム, 2024/2/20-22, 仙台(宮城).
- 受賞 [16] 第五回地球惑星科学振興西田賞* (受賞連絡 4/3(2024 年度))
- *昨年度の報告書にも参考として記載