

立教大学学術推進特別重点資金（立教 S F R）
大学院学生研究
2025年度研究成果報告書

研究科名	立教大学大学院	理学	研究科	物理学	専攻
研究代表者 (2026年3月現在 のものを記入)	在籍課程・学年		氏 名		
	☐ 博士前期課程 年 ☒ 博士後期課程 1 年		加藤 龍雅		
指導教員	所属部局・職名		氏 名		
	理学部・教授		亀田 真吾		
自然・人文・社会の別	☒ 自然 ・ 人文 ・ 社会		個人・共同の別	☒ 個人 ・ 共同 名	
研究課題	太陽系外における地球型惑星上層大気の理解に向けた大気粒子モデルの構築				
研究組織 (共同研究者が いる場合のみ、 2026年3月現在 のものを記入)	在籍研究科・専攻・課程・学年		氏 名		
研究期間	2025 年度				
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 233,955 円 / (採択金額) 250,000 円				

研究の概要 (200～300 字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)
当該研究の研究目的を含むこと。
これまで多くの太陽系外惑星が発見されており、惑星表面に液体の水を持つ可能性のある軌道に位置する地球半径程度の惑星も報告されている。しかし、それらの惑星が実際に現在の地球のように海洋を持つ温暖な環境であるかはわかっていない。このような惑星の大気観測に向けて宇宙望遠鏡計画が進められているが、ガス惑星のように観測例があるものを中心として理論研究が進められてきたことから、温暖湿潤な地球型惑星のような軌道や大気組成については理論研究に乏しいのが現状である。本研究では、将来の観測計画に向けた観測実現性の検討やデータ解析で用いる 3 次元大気モデルの開発に取り組んだ。
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] [大気散逸] [紫外線観測]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

以下の視点を含めて記載のこと。

- ・当該研究は何をどこまで明らかにできたのか(できなかったのか)。
 - ・何をもって研究成果(経過)を達成できた(できなかった)と考えられるのか。
- 自身が設定した研究目的・目標に照らして、その根拠がわかるよう記載のこと。

これまでに多くの系外惑星が発見されており、系外惑星探査の中心課題は、発見そのものから居住可能性の推定へと移行しつつある。Hubble Space Telescope (HST) による大気観測が進められてきた TRAPPIST-1 系では、2021 年に打ち上げられた口径 6.5m の James Webb Space Telescope (JWST) による観測も実施されたが、現時点では大気の実検出には至っていない。現在、LAPYUTA や Habitable Worlds Observatory (HWO) など、紫外線観測装置を搭載した次世代宇宙望遠鏡計画が進められている。本研究では、これらの観測装置を用いた惑星上層大気の観測を通じて、惑星表面環境に関する知見を得ることに着目する。特に、水を豊富に有する惑星がハビタブルゾーン内側境界よりも恒星に近い軌道を公転する場合、海洋の蒸発によって水蒸気大気が形成されるとともに、光解離によって生成された水素原子および酸素原子が宇宙空間へ散逸すると考えられる。このような上層大気において水素と酸素原子を同時に検出できれば、水の存在を示唆する重要な手がかりとなるため、有望な観測対象である。しかしながら、これまでの上層大気観測は主にガス惑星の水素大気に限られており、地球型惑星から散逸する水蒸気起源の大気を対象とした理論研究は十分に進んでいない。そこで本研究では、将来の観測計画を見据え、(1) 多成分系に対応した 3 次元粒子モデルの構築、(2) 粒子モデルから得られる空間分布に基づく透過スペクトルおよび減光曲線を計算するトランジットモデルの構築、(3) XUV 放射強度、上層大気温度に対するモデル応答の評価を行い、観測機器性能および星間物質の影響を考慮した観測実現性の検討、の 3 点の課題に取り組んだ。

(1) 多成分上層大気モデルの構築

本研究では、地球型惑星の上層大気散逸を多成分で記述する 3 次元粒子モデルの構築を行った。2024 年度の修士論文で開発した水素単一成分モデルでは、流出速度や大気散逸量については先行研究に基づく典型値をモデルに入力していたため、基礎的なモデルにとどまり、紫外線環境や大気組成の違いに対する系統的なパラメータに対する調査を行うことができなかった。そこで本研究では、温度および XUV 放射強度を入力とし、それに応じて流出速度や大気散逸量を等温のパーカー風と質量保存則から計算する手法を導入することで、幅広い紫外線環境に適用可能なモデルへと改良した。さらに、水素に加えて酸素原子を同時に扱う多成分粒子追跡を実装し、大気成分ごとの運動および電離過程を計算できるように拡張した。構築したモデルを用いて TRAPPIST-1d の軌道に地球半径・質量を持つ惑星を仮定した数値計算を実施した結果、水素大気は放射圧によって加速され、先行研究で示されているガス惑星と同様のテイル状構造を再現できることを確認した。一方、酸素大気は光電離断面積が大きく、放射圧による加速効果も小さいため、遠方へ輸送される前に電離が進行し、球対称に近い分布を形成する可能性を明らかにした。これにより、水蒸気大気において、放射圧や XUV 放射強度といった紫外線放射に対する応答が原子毎に異なるため、大気の空間分布に顕著な差が生じることを示した。以上より、本研究で構築したモデルは、多成分上層大気の基本構造を再現し得る基盤モデルとして有効である。一方で、恒星風との電荷交換反応や恒星放射の自己遮蔽効果の評価には至っておらず、今後の課題となっている。

(2) トランジットモデルの構築

(1) で構築した 3 次元粒子モデルから得られる空間分布を基に、トランジット観測時の透過スペクトルおよび減光曲線を算出する解析プログラムの構築を行った。系外惑星は数 pc 以上の遠方に位置するため、Ly- α 線 (1216Å) の観測においては、星間空間に存在する中性水素や重水素による吸収の影響を強く受け、輝線中心付近における惑星大気起源の吸

研究成果の概要 (つづき)

収が観測困難となる。このため本研究では、観測実現性を適切に評価するために、星間物質による吸収効果を考慮した透過スペクトルの計算手法を実装した。構築したプログラムを用いて、(1)で行なった TRAPPIST-1d の軌道に地球半径・質量を持つ惑星を仮定した数値計算について解析を行い、水素および酸素に対する減光率や減光の継続時間について先行研究との比較を行った。その結果、いずれの成分においても減光の大きさや時間変化の傾向が先行研究と整合的であることを確認し、計算手法の妥当性を検証することができた。以上より、3 次元粒子モデルから模擬観測を行うための基盤となるプログラムを構築することができた。

(3) 多成分大気モデルを用いた観測実現性の検討

(1)、(2)で構築した粒子モデルおよびトランジットモデルを用いて、将来の紫外線観測における地球型惑星大気の観測実現性の検討を行った。現在の観測対象となる地球型惑星は、主に M 型や K 型といった低質量星を公転しており、これらの恒星は老齢であっても強い紫外線放射を維持するため、惑星は現在の地球よりもはるかに強い XUV 放射環境にさらされる。本研究では、このような環境を想定し、XUV 放射強度および上層大気温度を広く変化させた数値計算を行い、上層大気の空間分布、透過スペクトル、減光率への影響を系統的に調査した。さらに、LAPYUTA および HWO を想定し、望遠鏡口径や鏡面反射率、回折効率、量子効率を考慮した検出光子数の見積もりを行い、必要観測回数の評価を実施した。計算は、TRAPPIST-1d の軌道に地球質量・半径の惑星を仮定した数値計算に基づいて行った。その結果、XUV 放射強度が現在地球の約 1000 倍に達する場合でも、水素成分では大気散逸量の増加が支配的となり減光率が増加する一方、酸素成分では光電離の影響が支配的となるため、恒星半径によっては光学的に厚い領域が縮小し、減光率が低下する可能性を示した。また、同程度の大気散逸量において温度依存性を調べた結果、水素成分は温度上昇に伴い減光率が単調に増加する傾向を示すのに対し、酸素成分は空間分布の違いにより輝線中心での吸収効率が変化し、低温条件の方が大きな減光を示す場合があることを明らかにした。さらに、大規模散逸が生じる条件では、口径 60cm の LAPYUTA であっても 1~2 回のトランジット観測により水素大気の検出が可能であり、口径 6m の HWO では酸素原子についても数回の観測で検出可能であるとの見積もりを得た。先に述べたようにハビタブルゾーン付近に位置する惑星から散逸する水蒸気大気は観測的に重要なターゲットである一方、理論研究は十分に進んでおらず、空間分布や透過スペクトル形状に関する知見は乏しかった。本研究の結果から、水素原子と酸素原子では紫外線環境への応答が大きく異なり、それが観測に与える影響に対する示唆を与えることができたと考えている。

観測実現性の評価においては、地球コロナの発光や放射線ノイズなど、実際の観測環境で予想されるノイズの一部を十分に考慮できていない。特に LAPYUTA は地球周回軌道にあるため、これらの影響を適切に取り入れることで、必要となる輝線の明るさに関するより現実的な制約を与えることが可能となる。したがって、これらの効果を含めた追加の評価を行い、観測条件の推定精度を向上させることが今後の課題である。

研究発表 (研究によって得られた研究成果を発表した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。なお、成果発表を確認できる資料を合わせて研究成果報告書提出フォームより提出してください(紙媒体等、研究成果報告書提出フォームから提出できない場合は、別途リサーチ・イニシアティブセンターへ提出してください)。

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)

※修士論文・博士論文は含みません。

④ その他(学会発表、研究報告書の印刷等)

国際学会・ポスター発表

[1] Ryuga Kato, Akifumi Nakayama, Shingo Kameda, The Observational Feasibility of Extended Atmospheres on Terrestrial exoplanets in a runaway greenhouse state by Ultraviolet transit spectroscopy, AGU Fall Meeting 2025, New Orleans, 2025/12/14-19.

国内学会・ポスター発表

[2] 加藤龍雅, 中山陽史, 亀田真吾, 水蒸気大気を持つ系外地球型惑星における大規模散逸大気の検出可能性, 惑星科学会, 東京大学 駒場キャンパス, 2025/9/3-5.

[3] 加藤龍雅, 中山陽史, 亀田真吾, The Observational Feasibility of Escape of Water Vapor Atmosphere from Terrestrial Exoplanets by Ultraviolet Transit Spectroscopy. SGEPS, 神戸大学, 2025/11/24-27.

国内研究会・口頭発表

[4] 加藤龍雅, 中山陽史, 亀田真吾, 将来の紫外線望遠鏡計画に向けた系外地球型惑星上層大気の3次元粒子シミュレーション, 惑星圏シンポジウム 2026, 東北大学, 2026/3/2-4.

[5] (招待講演) 加藤龍雅, 暴走温室状態の地球型惑星における上層大気の広がりとその観測実現性, ISEE 共同研究集会 宇宙プラズマ・恒星放射が惑星超高層大気・衛星表層環境に及ぼす影響, 東北大学, 2026/03/23.