

立教大学学術推進特別重点資金(立教SFR)

個人研究

2022年度研究成果報告書

研究代表者	所属部局・職名	氏名
	理学研究科物理学専攻・特任准教授	中山陽史
研究課題	低温度星周りの系外地球型惑星における大気散逸による大気進化への影響の解明	
研究期間	2022年度	
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 978,000円 / (採択金額) 978,000円	

研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフは使用しないこと。)

系外惑星科学の発展は著しいが、その観測の難しさから地球サイズ程度の地球型惑星の理解は乏しい。そういった中、低温度星周りの地球型惑星が今後数10年に渡る主な観測対象として検討されており、「地球のような温暖な環境を保つ地球型惑星は存在するのか」という問いは系外惑星研究における中心課題である。しかし、低温度星はUV強度が長期的に強く、大気散逸が大気進化に対して大きな役割を示す。そのため、温暖環境保持に対して重要な“大気”の進化が地球のような惑星とは根本的に異なる。本研究では、強UV環境における大気散逸率の推定に向けて、主に大気モデルの開発と大気構造の惑星質量依存性を検討した。

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。)

[系外地球型惑星] [大気進化] [大気散逸]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

惑星大気存在は温暖環境を維持し続けるのに必要不可欠であり、その存在、ひいては大気量や大気組成の検討は生命が存在しうる惑星(ハビタブルプラネット)の存在を決める重要な要因である。惑星大気は恒星からの XUV 放射によって加熱・膨張され、大気散逸が促される。現在地球のような弱い UV 環境であれば、大気散逸の影響は弱く、大気進化に対して重要な役割を示さない。しかしながら、初期地球や系外惑星においては恒星からの UV 照射がとても強いことが想定され、強い大気散逸が引き起こされる可能性が考えられる。そのため、大気散逸に伴う大気進化はハビタブルプラネットの存在を理解・予測する上で必要不可欠である。

強い XUV 放射に伴う大規模な大気散逸は現在太陽系の地球型惑星では起きておらず、大気散逸の検討は主に数値シミュレーションを通して行われている。近年の数値シミュレーションによって得られた理解として、強い XUV 放射に伴う大気散逸は、地球型惑星においても甚大なる影響を与えることが分かっている(e.g., Tian et al., 2008)。例えば、現在地球と同様の大気量・組成を持つ大気に対して、過去の太陽に相当する XUV 放射を与えた場合、大気は 10 万年以下という非常に短い時間で全て散逸してしまうことが示唆されている(Johnstone et al., 2019)。そのため、地球型惑星が温暖環境を保持するのに必要不可欠な大気を長期的に保持することは不可能であると理解されていた。そう言った中、申請者は分子雲や恒星彩層などで重要視される原子とイオンの電子遷移に伴う輝線放射に着目し、地球型高層大気モデルに組み込み、先行研究と同様の現在地球大気に対して XUV 強度との応答を検討した(Nakayama et al., 2022)。その結果、大規模な大気散逸が生じる温度よりも低い温度で輝線放射が有効に働くことが分かった。そして、大気進化にとって重要となる大気散逸率は先行研究に比べて 4 桁以上小さくなり、大気損失のタイムスケールが 10 万年から 20 億年と劇的に変わりうることがわかった。これらの結果は XUV 強度が強い低温度星周りの地球型惑星における大気の保持とその進化を理論的に予測する上で大きなブレイクスルーとなる。

本研究では流体モデルと放射モデルの開発を行い、惑星からの大気散逸を系統的に理解することを目的としている。まず流体モデルの開発について述べる。申請者の大気モデルは静水圧からのズレが小さいほど大気散逸が弱い場合にのみ適用可能である。つまり、鉛直流の速度が音速に比べて十分に小さい場合にのみ適用可能なモデルとなっており、より XUV が強い環境や惑星が火星サイズなど小さく、重力が弱い場合には大気散逸を正しく見積もることが困難である。そのため、それらの条件下における大気進化を取り扱うため、高層大気における流体モデルの開発に取り組んだ。開発を行っているモデルの概要を以下に述べる。流体モデル内の計算セル間の輸送フラックスは計算ステップ毎にセル間の不連続面における衝撃波問題を解く必要がある。そのため、衝撃波を取り扱うことが可能なリーマンソルバー HLLC(Toro et al., 1994)を用いて輸送フラックスを求めた。また、セル境界の物理量の内挿として 3 次の ESWEN03(Mignone et al., 2011)を用いた。そして、UV 環境などのパラメータ次第で高層大気がとりうる圧力構造は静水圧と音速流などのように変わりうる中、それらを同時に取り扱うことが可能なように well-balanced scheme(Kappeli & Mishra, 2016)を用いてセル境界における圧力を求めた。次に、地球などの静水圧下で見られるジーンズ散逸などの粒子的な振る舞いと流体的な振る舞いを同時に考慮すべく、slow hydrodynamic escape(Volkov et al., 2011)を考慮したモデルを用いて外側境界(外圏底)における数値フラックスを求めた。最後に時間発展は数値的に安定な方法として流体計算で用いられる 3 次のルンゲクッタ法(SSPRK3; Gottlieb & Shu, 1998)を用いた。これらの様々モデルを複合し、流体モデルを構築している。これは申請者の先行研究(Nakayama et al., 2022)によって静水圧条件からずれていく状況や、粒子的振る舞いから流体的振る舞いへの遷移するような条件が惑星高層大気からの大気散逸を理解する上で必要不可欠であることを示唆しているためである。

研究成果の概要 (つづき)

流体モデルの開発としてまず、解析解と対比が可能な簡単な問題から検討を行った。第一に一次元衝撃波管問題に取り組んだ。衝撃波管問題とは仕切りで分けられた圧力の異なる 2 流体間の仕切りを取り去った後の時間発展を解く問題である。流体計算を行った結果、解析解と一致するような解が得られ、実装した流体モデルを用いて簡単な流体問題を解くことが可能であることが分かった。次に惑星大気条件下での実装を目指し、検証に取り組んだ。そのため、先ほどの衝撃波管問題で用いたモデルに加えて、惑星重力を運動方程式に考慮している。さらに高層大気のような数惑星半径に至るまでの広がりを持つ場合には、球状に表面積が広がる効果を考慮し、計算グリッドを非一様にする必要がある。そういった実装の元、組成一様・温度定常を仮定し、運動方程式と連続の式を解くことが可能か検討を行った。この条件下では、問題なく計算を行うことができたが、光化学を含む化学方程式による組成変化や放射輸送・熱伝導・化学反応熱などのエネルギー方程式などを同時に解く場合、温度擾乱に伴う密度擾乱によって波が発生・伝搬することで、流体計算と連続の式を介して数値計算が不安定になることが分かった。これらは化学反応やエネルギー方程式の大部分を陰解法で解き、流体モデルを陽解法で解くという手法を用いているが、その接続が上手くいっていない可能性が考えられる。本研究では、中性分子/原子やイオンを含め 60 種以上の組成種に対して定常を仮定せず連続の式を解くため、擾乱に伴って数値計算が不安定になっていると予測される。そのため今後の課題として、流体モデルを含めた全ての方程式を陰解法で解くことを目指す。また、遷音速解になるような条件でのモデルの検証として、等温の恒星風モデル(Parker 1961)との比較を考えている。

本研究の主題の一つとして挙げていた流体モデルの開発が短期的に難しいと判断し、流体モデルの開発と並行し、その他の検討に尽力した。まず一つ目に放射モデルの開発である。地球型惑星などの放射活性な分子を多く含むような大気では分子による放射冷却が重要となる。しかしながら、分子の吸収線は数億本に至るほど多く、全ての吸収線を考慮することが困難である。研究協力者との検討の結果、k-分布法を用いた放射冷却モデルを構築した。k-分布法を高層大気モデルに対して適用させた初めての検討であり、全ての吸収線を考慮することで温度を問わず正確に放射冷却効率を推定することが可能であることが分かった。これらの研究は学術雑誌に投稿予定である。また、熱力学平衡などを仮定しているため、より高層大気にあった条件での正当性を今後検討予定である。

次に、より静水圧平衡条件に近く、流体モデルの開発が不要な課題として、スーパーアースにおける高層大気構造についての検討を行った。これらはパラメータ依存性を系統的に理解する本研究課題の目的の一部である。結果として、冷却に寄与するプロセスが惑星質量に依存して変化することが分かった。地球サイズ程度であれば、電離再結合に伴う放射が輝線放射冷却に比べて強い寄与を示すが、惑星質量が増加するほど輝線放射冷却の寄与が増大する。これはより強い惑星重力下では、コンパクトかつ高温な熱圏が形成され、温度に強く依存する輝線放射冷却が増大することに起因する。また、数値計算による冷却プロセスの理解に基づいて、熱圏温度・大気散逸率を解析的に求めることが可能な解析式を構築した。そのため、XUV 強度・惑星質量に応じた依存性を解析的に理解することが可能となった。これらの成果は今年度中に学術雑誌に投稿予定である。また、上記の数値計算結果に基づいて酸素輝線の観測可能性についても検討を行った。その結果平衡温度が 3000K 程度以下の低温度星では惑星放射が恒星放射の 1% 程度に達することが分かった。そのため輝線を分解できるような高分散分光器を持つ望遠鏡を用いて、惑星放射を観測可能であることが示唆される。これらの成果についても学術雑誌に投稿予定であり、今後すばる望遠鏡などの地上望遠鏡を用いた観測についてもプロポーザルを申請予定である。

※この(様式 2)に記入の、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(A 4 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] Nakayama, A., Ikoma, M., Terada, N., Survival of terrestrial N₂-O₂ atmosphere in Violent XUV environments through efficient atomic line radiative cooling, *Astrophysical Journal*, 937, 2022, 72.

②
特になし

③
特になし

④
[1] Survival of terrestrial N₂-O₂ atmosphere in Violent XUV environments, The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba, 13 - 14 October 2022, The University of Tsukuba.

[2] M型星周りにおける地球型大気保持の可能性、天文学会 2022 年秋季年会、2022 年 9 月 13 - 15 日、新潟大学.

[3] Survival of terrestrial N₂-O₂ atmosphere in Violent XUV environments through efficient atomic line radiative cooling, *Forming and Exploring Habitable Worlds*, 7 - 13 November 2022, Edinburgh, UK.

[4] 低温度星周りの地球型惑星からの大気散逸と大気保持の可能性、新学術領域「星・惑星形成」2022 年度大研究会、2023 年 2 月 20 - 23, 国立天文台