

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：18K13601

研究課題名（和文）低質量星周りの地球型惑星の気候とスペクトル

研究課題名（英文）Climates and spectral signatures of rocky planets around low-mass stars

研究代表者

藤井 友香 (Fujii, Yuka)

国立天文台・科学研究部・准教授

研究者番号：20713944

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000 円

研究成果の概要（和文）：低質量星のハビタブルゾーンにある（自転と公転が同期している）地球型系外惑星において、大気圧や大気組成に依存した大気構造を3次元大気大循環モデルを用いて計算し、それを踏まえて（a）スペクトル形状の時間依存性を利用する方法、（b）ドップラー効果によるスペクトルの波長のずれを利用する方法、による惑星熱放射中の大気の吸収線（輝線）観測を検討した。これらの方法は、安定的な分光器（（b）の場合は高分散分光器）があればトランジットをしていない太陽系近傍の惑星にも適用可能であり、その検出可能性を見積もった。また、バイオシグニチャーとしての揮発性有機物の、低質量星の紫外線下での安定性を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ハビタブルゾーンの地球型惑星の中で、暗い低質量星周りのものは、発見や詳細観測に比較的有利であり、詳細観測に期待が高まっている。実際に発見されているターゲットで大気組成や大気圧を変えたときの大気構造を求め、また、検出器のノイズを考慮して大気分子の検出のための観測の条件を求めたことは、JWSTおよびその後の将来計画で想定されている中間赤外線の高感度観測によって惑星表層を制約する可能性を開く。また、バイオシグニチャーと考えられる揮発性有機物の大気中の安定性を系統的に調べたことで、観測しやすい分子の傾向が明らかになった。

研究成果の概要（英文）：I calculated the three-dimensional atmospheric structures of (synchronously-rotating) terrestrial planets in the habitable zones of low-mass stars, as a function of atmospheric pressure and composition. Based on these insights, I examined the observability of spectral signatures of atmospheric species in the planetary thermal emission, using (a) the time variation of the absolute flux ("phase curves"), and (b) the Doppler shift of the spectral lines. These methods can, in principle, be applied to non-transiting exoplanets in the solar neighborhood once a stable spectrograph (a high-resolution spectrograph in the case of (b)) is available, and the detectability with future observatories was evaluated. In addition, I studied the stability of one type of biosignature, volatile organic compounds, under the ultraviolet irradiation of low-mass stars.

研究分野：系外惑星

キーワード：系外地球型惑星 ハビタブルゾーン

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ハビタブルゾーンの地球型惑星の中で、暗い低質量星周りのものは、発見や詳細観測に比較的に有利であり、JWST などによる詳細観測に期待が高まっている。低質量星のハビタブルゾーンにある惑星は、主星からの入射光の波長依存性が太陽と違うことや、ハビタブルゾーンが主星に近いために強い潮汐力を受けて同期回転している(半球が常に昼面である)可能性が高いことなどにより、他の特性が同じでも表層環境については観測されるスペクトルが地球とは大きく異なる。それを踏まえて大気の特性和観測されるスペクトルを関連付けることが、将来観測の方針を決める上で重要である。

2. 研究の目的

(1) 低質量星のハビタブルゾーンにあり同期回転している惑星において、惑星の3次元大気構造や表層環境の、大気圧や大気組成といった基本的なパラメータへの依存性を理解する。また、観測スペクトルが表層環境(大気圧・表面温度・表面の水の有無など)をどう制約しうるかを理解する。

(2) 低質量星のハビタブルゾーンの惑星が受ける紫外線スペクトル(地球が太陽から受けるものに比べて、近紫外線は弱く遠紫外線では同等もしくは強い)の下での大気の化学構造を理解する。特に、特に生物圏が放出する分子の安定性を調べる。バイオシグニチャーの一つとして考えられているメタンは、低質量星のハビタブルゾーンの惑星では酸化が抑制され検出可能性が向上することが知られているが、他のバイオシグニチャー分子の安定性を調べ、低質量星周りの惑星においてバイオシグニチャーとして有用な分子を探す。

3. 研究の方法

(1) 3次元大気大循環モデルを用いて、大気圧や大気組成などが異なる惑星の大気構造を計算し、それに基づく観測シミュレーションを行う。

(2) 低質量星の紫外線スペクトルの下で、酸素の混合比や大気圧を変えて大気の化学計算を行い、各種ラジカルの存在量の鉛直分布を求める。それを踏まえて、生物圏由来の気体分子について表面フラックスを与えた時の大気中の存在量を求める。

4. 研究成果

本研究の成果は、主に3つに分けられる：低質量星ハビタブルゾーンの岩石惑星の、(1a) 大気組成・大気圧と熱放射フェーズカーブの関係 (1b) 熱放射スペクトルによる大気組成の検出可能性 (2) 生物圏が放出する分子の大気中の安定性。

(1a) 大気圧・大気組成と熱放射フェーズカーブ

地球近傍で発見されたハビタブルゾーン惑星のパラメータを利用し、3次元大循環モデル ROCKE-3D (Way, ..., Fujii, et al., 2018) により、表面状態と大気組成(海のない N₂ 大気、海のない CO₂ 大気、海のある N₂ 大気)および大気圧(0.1, 1, 10 bar)を変化させたときの3次元大気構造を調べた。また、それらに基づく熱放射高分散分光フェーズカーブを自作のコードにより計算した。大気圧が多くなるほど熱輸送は活発になるが(e.g., Selsis et al., 2011, Koll 2019) 同じ大気圧でも赤外活性な分子の量(たとえば CO₂)が増加するに伴って昼夜の熱分配がより効率的になるという傾向(e.g., Wang & Yang 2022)が確かめられた。また、表面が海に覆われている場合とそうでない場合でない場合とでの熱放射フェーズカーブの振幅の差が大きく、表層環境に海があるかどうかの一つの指標と考えられることを議論した。

(1b) 熱放射スペクトルによる大気組成の検出可能性

日本の宇宙望遠鏡計画である SPICA および GREX-PLUS において宇宙からの高安定な中間赤外線高分散分光が実現される可能性を踏まえて、本研究計画のメインターゲットである低質量星のハビタブルゾーンの惑星の検出可能性を検討した。観測波長帯である 10-18 μm において、ハビタブルゾーン付近の惑星（平衡温度が 250K 程度）の熱放射はピークを持ち、主星と惑星の光の混ざったものの中から惑星光の成分を検出するのに好都合である。

2つの観測方法が考えられる。一つは、フェーズカーブの振幅の波長依存性により大気組成を検出する可能性である。(1a)の結果を利用すれば、海がなく CO₂を適量持つ惑星においては、この方法で CO₂の検出が期待できることが分かった（GREX-PLUS で計画されているような 1メートルの口径では、Proxima Centauri b における CO₂の検出に必要な観測積分時間は、数日 2週間程度）。JWST クラスの口径（6.5メートル）で同様の観測ができれば、この方法はかなり短時間で検出できるが、実際にはベースラインの不定性によって検出が難しいことが分かった。

もう一つは、ドップラー効果による惑星スペクトルの波長方向のずれを利用する方法である。この方法では、吸収線一本一本を分解する高分散分光を必要とするが、フェーズカーブと異なり、大気の熱輸送効率によらず適用することができる。惑星の高分散スペクトルのシミュレーションを行ったところ、中間赤外線の熱放射スペクトルにおける吸収線の幅および間隔は可視光における反射光などよりも広がる（特に強い吸収帯は飽和する）ため、ハビタブルゾーンの惑星に期待されるような視線速度では、軌道上の異なる位置で十分にスペクトルがずれず、シグナルが大幅に減少することが分かった。

(2) 生物圏が放出する分子の大気中の安定性

地球化学の研究者らとの議論の中で、生物由来の揮発性有機物の一つであるイソプレン(C₅H₈)は、メタンと同程度の大きなフラックスを持ち、それ以外にもメタノール(CH₃OH)やアセトアルデヒド(HCHO)などの揮発性有機物もメタンの 10%以上のフラックスを持つことが分かった。炭素を基盤とするこれらの分子は生命の存在と密に関係しているため、バイオシグニチャーとして注目し、揮発性有機物の大気中での消滅パスやその効率を、官能基や C の数に基づき整理した。一方、大気化学構造計算の公開コード Atmos (Kasting et al., 1984) により、大気中の酸素の混合比を変え、揮発性有機物の酸化剤となるラジカルの存在量の鉛直分布を計算した。そこで得られた構造を固定し、その中で揮発性有機物の拡散を解くことにより、揮発性有機物の混合比を求めた。メタンやエタンなどの飽和炭化水素およびアルコールは、低質量星の紫外線下で存在量が抑制される OH によって主に壊されるため、その混合比はメタンと同様に上昇するが、イソプレン等の二重結合を持つ分子は、酸化的大気の下では O₃ や NO₃ によって壊されるため、還元的な環境でのみ大気中に十分蓄積できることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Shiohira, Yuta; Fujii, Yuka; Kita, Hajime; Kimura, Tomoki; Terada, Yuka; Takahashi, Keitaro	4. 巻 528
2. 論文標題 A search for auroral radio emission from beta Pictoris b	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2136-2144
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stad3990	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kurokawa, H.; Laneuville, M.; Li, Y.; Zhang, N.; Fujii, Y.; Sakuraba, H.; Houser, C.; Cleaves, H. J.	4. 巻 23
2. 論文標題 The Origin of Earth's Mantle Nitrogen: Primordial or Early Biogeochemical Cycling?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	6. 最初と最後の頁 e2021GC010295
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021GC010295	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Wang, Fei; Fujii, Yuka; He, Jinping	4. 巻 931
2. 論文標題 Unveiling Nongray Surface of Cloudy Exoplanets: The Influence of Wavelength-dependent Surface Albedo and Cloud Scattering Properties on Retrieval Solutions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 48
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac67e5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Matsuo, Taro; Greene, Thomas P.; Qezlou, Mahdi; Bird, Simeon; Ichiki, Kiyotomo; Fujii, Yuka; Yamamuro, Tomoyasu	4. 巻 163
2. 論文標題 Densified Pupil Spectrograph as High-precision Radial Velocimetry: From Direct Measurement of the Universe's Expansion History to Characterization of Nearby Habitable Planet Candidates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 63~63
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-3881/ac397b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Fujii, Yuka; Matsuo, Taro	4. 巻 161
2. 論文標題 Detecting Atmospheric Molecules of Nontransiting Temperate Terrestrial Exoplanets Using High-resolution Spectroscopy in the Mid-infrared Domain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 id.180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/abe129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okuya, Ayaka; Fujii, Yuka; Ida, Shigeru	4. 巻 880
2. 論文標題 Effects of a Binary Companion Star on Habitability of Tidally Locked Planets around an M-type Host Star	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab29e7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計9件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Fujii, Yuka
2. 発表標題 On the possibility of detecting thermal emission of non-transiting temperate rocky exoplanets without direct imaging
3. 学会等名 JpGU 2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Fujii, Yuka; Matsuo, Taro
2. 発表標題 Prospects for characterizing non-transiting temperate rocky exoplanets in thermal emission without direct imaging
3. 学会等名 2024 SEEC Symposium: Pathways to Characterizing Non-Transiting Planets (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Fujii, Yuka
2. 発表標題 Atmospheres of small planets affected by rock (and life)
3. 学会等名 Molecules in Extreme Environments: Near and Far (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤井友香、小松 勇、Gilbert Alexis、Danielache Sebastian、中川 麻悠子
2. 発表標題 系外惑星における生物由来ガスの検出可能性について
3. 学会等名 JpGU 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井友香
2. 発表標題 Strategies to characterize temperate rocky exoplanets
3. 学会等名 惑星圏研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井友香, 松尾太郎
2. 発表標題 中間赤外高分散分光による系外地球型惑星の大気組成の検出可能性
3. 学会等名 日本惑星科学会 2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fujii, Yuka; Matsuo, Taro; Kawashima, Yui; Ohno, Kazumasa; Okuya, Ayaka; Hirano, Teruyuki; SPICA planet team
2. 発表標題 Detecting molecular lines in thermal emission spectra of temperate planets with SPICA/SMI
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fujii, Yuka
2. 発表標題 Assessing the Potential of Volatile Organic Compounds as Exoplanet Biosignatures
3. 学会等名 Extreme Solar Systems IV (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Okuya, Ayaka; Fujii, Yuka; Ida, Shigeru
2. 発表標題 Habitability of S-type tidally locked planets: effects of a binary companion star
3. 学会等名 Extreme Solar Systems IV (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Elizabeth Tasker, Yuka Fujii	4. 発行年 2020年
2. 出版社 IOP Publishing Ltd	5. 総ページ数 36
3. 書名 Planetary Diversity "Observations of Exoplanets"	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------