

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：24506

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K21296

研究課題名(和文) 偏光観測を用いた生命探査法の開発：海の検出と大気の特徴づけ

研究課題名(英文) Development of Polarimetric Techniques to Investigate Habitability of Exoplanets

研究代表者

高橋 隼 (Takahashi, Jun)

兵庫県立大学・自然・環境科学研究所・特任助教

研究者番号：80648957

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：月面地球照および月食の偏光観測を行い、次の結果を得た。(A) 地球反射面に占める海の割合が大きいほど、反射光の近赤外偏光度は高めになる。(B) 地球反射光の偏光度が最大となる位相角(光源-対象-観測者のなす角)は、可視光よりも近赤外線のほうが大きい。この観測特徴は「地球と同程度の光学的厚み(透明度)をもつ大気」の存在を指し示すものと考えられる。(C) 初めて月食の偏光度スペクトルを取得し、波長600nm以下や酸素分子の吸収波長で2-3%程度の偏光を検出した。地球大気透過光の偏光度は「雲の空間分布」に関係していることが示唆された。

これらの偏光特徴を用いた生命居住可能性の調査が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、月面地球照および月食の偏光観測により、「海が存在」、「大気の透明度」、「大気組成」、「雲の空間分布」に対応すると考えられる特徴を得た。これらはいずれも惑星における生命居住可能性に関係すると考えられ、中でも「海が存在」は生命活動に極めて重要である。本研究で得た観測特徴が太陽系外惑星に見られるかどうかを調べれば、系外惑星の生命居住可能性について情報を得ることができると期待される。つまり、本研究の成果は、有効な地球外生命探査の実現に貢献しうる。「我々は孤独なのか？」という人類社会が抱えてきた根源的な問いに答えるための一歩であるとも言える。

研究成果の概要(英文)：We conducted polarimetry for lunar Earthshine and lunar eclipses. Following results have been obtained. (A) Earth's polarization degrees in the near-infrared tend to be larger when the ocean occupies a larger fraction in the reflecting surface. (B) The phase angle for the Earth's maximum polarization is larger in the near-infrared than that in the visible wavelengths. This observed trend probably corresponds to existence of an atmosphere with an Earth-like optical thickness. (C) We obtained the first-ever polarization spectra of the Moon during a lunar eclipse and detected a 2-3% polarization degree at wavelengths shorter than 600 nm and at absorption bands of molecular oxygen. The polarization degree of the Earth's transmitted light may depend on inhomogeneity of the cloud distribution.

These polarimetric signatures may be useful to investigate the habitability of exoplanets.

研究分野：天文学、惑星科学、宇宙生物学

キーワード：地球照 月食 偏光観測 生命探査 系外惑星

## 1. 研究開始当初の背景

太陽系外惑星の発見は進み、「ハビタブルゾーン」(惑星表面に液体の水が存在できると予測される、主星からの距離範囲)に位置する惑星も発見されていた。しかし、ハビタブルゾーンに位置する惑星が実際に生命居住可能な環境を持つのか、さらには生命を宿すのかを調べることは依然として難しく、調査するための手法を開発することが必要であった。

月面地球照の観測は、系外惑星の観測データと比較可能な「空間分解できないほど遠方から観測した地球」の観測値を得るために、重要な役割を果たしてきた。地球照とは月の夜面に映る地球の反射光のことである。これまでの地球照の観測から、「レッドエッジ」と呼ばれる植物の分光特徴をはじめとして、生命探査上有用な観測特徴が抽出されてきた。

しかし、これまでの生命探査法開発で注目されていたのは、主として、光の強度または強度スペクトル上に現れる特徴であった。一方で、「光の振動方位ごとの強さの偏り」を意味する「偏光」については、種々の利点があるにもかかわらず、ほとんど注目されていなかった。具体的には以下の利点が挙げられる。

- ・ 利点 1 惑星の散乱反射物理の情報を持つ。  
⇒ 液面による鏡面反射の検出、大気組成の検出が可能
- ・ 利点 2 天体の偏光度・方位角は地球大気吸収によって変化しない。  
⇒ 地上大型望遠鏡の活用が可能
- ・ 利点 3 惑星の直接検出手法としても有用である。  
⇒ 直接検出と環境調査の手法が兼用可

そこで、我々は偏光を用いた生命探査法の開発を行った。

## 2. 研究の目的

本研究では、偏光を用いた生命探査法の開発を目指し、具体的には以下の 3 項目を目標とした: (A) 海を持つ惑星の探査法開発、(B) 大気の光学的厚みの調査法開発、(C) 「大気透過光の偏光」を利用した惑星特徴づけ手法の開発。さらに、全体に共通する項目として、超大型地上望遠鏡を用いて、偏光を用いた生命探査が実現可能であるか見積もることも目標とした。

## 3. 研究の方法

(A)、(B)については地球照(地球の反射光が起源)、(C)については月食(地球大気の透過光が起源)を偏光観測し、系外惑星の生命探査に応用可能な観測特徴を抽出した。研究項目ごとの具体的な手法は、次節に記述する。

## 4. 研究成果

### (A) 海を持つ惑星の探査法開発

液体表面は鏡面反射を起こし、粗い陸面よりも大きく偏光する。この性質を用いて、海を持つ惑星を探査できるかもしれない。我々が以前に行った研究から、海や陸といった地球表面の情報は、可視光よりも近赤外線領域の偏光に現れる可能性が高いことが分かっていた。近赤外線での地球照観測が望まれた。

まず、地球照観測を実現するための装置開発を行った。兵庫県立大学西はりま天文台の 2m なゆた望遠鏡に搭載されている近赤外 3 色同時カメラ NIC に偏光観測モードを導入し、十分な性能を持つことを確認した(高橋他, 2018, Stars & Galaxies; 高橋, 2019, Stars & Galaxies)。

次に、32 夜に渡って地球照を観測した。得られた偏光度を分析したところ、地球反射面に占める海の割合が高い時ほど、偏光度が高めになる傾向が得られた。つまり、海による偏光を検出したと言える。

地球のように海と陸が非一様に分布する惑星の場合、自転に伴い海が見え隠れすることに起因して惑星反射光の偏光度が変動すると考えられ、今回の地球照観測でも海の被覆率と連動する偏光度時間変動が検出された。すなわち、系外惑星の時系列偏光観測によって海が存在を調査できる可能性が拓かれた。

### (B) 大気の光学的厚みの調査法開発

我々が以前に行った地球照の偏光分光観測(波長範囲:450-850nm)により、「最大偏光位相角(偏光度位相曲線上で偏光度が最大となる時の位相角。位相角は光源-観測対象-観測者がなす角)は、長波長ほど大きくなる」という結果が得られた。この観測特徴は、「可視光短波長側の偏光は大気のレイリー散乱によって特徴づけられている一方、波長が長くなるにつれ表面(陸や海)の貢献が強くなる」結果であると解釈できる。このような現象が起きるのは、大気散乱と表面反射が惑星反射光に同程度に寄与する「大気の光学的厚みが地球と同程度の惑星」の特徴であると考えられる。

もし上記の解釈が正しければ、可視光よりも波長が長い近赤外線では、最大偏光位相角がさら

に大きいと予想される。(A)と同じ観測データを分析したところ、近赤外での最大偏光位相角は120-150度と、可視光で得られた90-100度よりも明確に大きかった。120-150度という最大偏光位相角はレイリー散乱を無視した理論計算 (Williams & Gaidos 2008) が予想する最大偏光位相角とよく一致する。総合すると、今回の観測結果は、我々が先行研究で示した解釈を支持し、さらに、近赤外波長では大気中のレイリー散乱はほとんど偏光に寄与していないことを指し示すと言える。このことから、系外惑星について、可視光から近赤外にかけて最大偏光位相角の波長依存性を調べることで、「大気の光学的厚みが地球と同程度の惑星」を探索できると期待される。

### (C) 「大気透過光の偏光」を利用した惑星特徴づけ手法の開発

Coyne & Pellicori (1970) は、月食中の月が2.4%ほど偏光していたという観測結果を報告した。しかし、偏光の原因は解明されなまま放置されていた。もし惑星大気透過光が本当に偏光しているのならば、系外惑星トランジット時に偏光を検出できる可能性がある。さらに、大気透過による偏光の原理が明らかになれば、「トランジット偏光観測」により系外惑星の情報を引き出すというまったく新しい調査方法を手にするようになる。このような期待から、我々はこの「忘れられた謎」の解明に取り組むことにした。

我々は、2014年10月と2015年4月に得られた月食の偏光観測結果を解析した。2014年に初めて得られた偏光分光データから、波長500-600nmや酸素分子吸収帯(760nm)で最大2-3%の偏光度を検出した (Takahashi et al., 2017, AJ; 図1)。さらに、2014年と2015年で観測結果を比較することで、偏光の原因が「地球大気透過中の非等方的な2回散乱」と「雲の非一様な空間分布」の組み合わせである可能性を示した (Takahashi et al., 2019, PASJ)。以上から、太陽系内外の惑星のトランジット偏光観測により、大気組成や雲の空間分布の調査ができる原理的な可能性が示された。

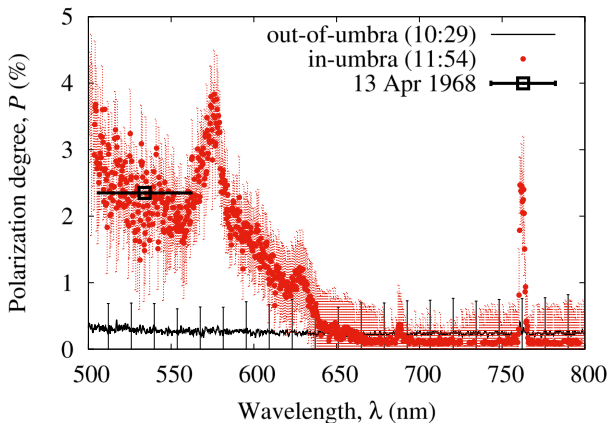


図1 2015年4月4日に観測された月食の偏光度スペクトル。黒線は観測対象領域が本影に入る前。赤点は本影に入っている間。Takahashi et al. (2017, AJ)を引用。

### (共通) 偏光生命探査の実現可能性の評価

具体例として、近赤外波長で期待される水蒸気の偏光分光特徴をとりあげ、次世代超大型望遠鏡(口径30-40m)および系外惑星直接観測装置の利用を想定し、偏光分光観測による水蒸気検出の実現可能性を見積もった。器械偏光、スペックルノイズによる誤差、光子ノイズによる誤差を考慮して検出可能性を見積もったところ、もし既知の系外惑星が地球と同様の偏光分光スペクトルを持つ場合、5-14個の惑星について検出可能であるという結果を得た (Takahashi et al., 2017, A&A; 図2)。

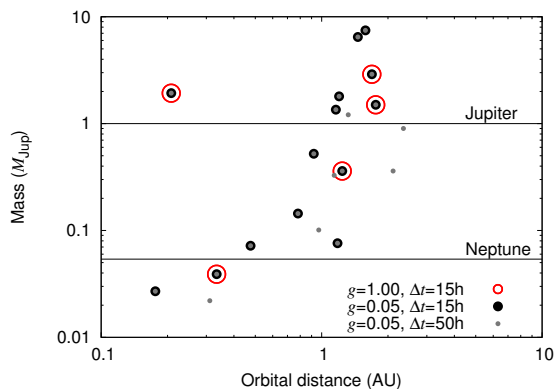


図2 水蒸気の検出が可能と見積もられた既知惑星の軌道距離と質量。gは偏光差分法の効率を表し、小さいほどよい(1は全く効かない)。Δtは総積分時間。Takahashi et al. (2017, A&A)を引用。

以上のように、本研究から、海の存在、大気中の光学的厚み、大気組成、雲の分布といった、惑星の生命居住可能性に関する性質を指し示す偏光特徴を明らかにすることができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 高橋 隼	4. 巻 113
2. 論文標題 忘れられた謎 月食の偏光	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 天文月報	6. 最初と最後の頁 261-268
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 高橋 隼	4. 巻 2
2. 論文標題 NIC偏光モードの性能評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Stars and Galaxies	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.32231/starsandgalaxies.2.0_3	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 -
1. 著者名 Takahashi Jun, Itoh Yoichi, Watanabe Makoto, Akitaya Hiroshi, Takaki Katsutoshi, Kawabata Koji S, Itoh Ryosuke, Oasa Yumiko	4. 巻 71
2. 論文標題 Comparison of polarization at two lunar eclipse events	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psz017	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 高橋 隼、禅野 孝広、斎藤 智樹、伊藤 洋一	4. 巻 154
2. 論文標題 NIC 偏光観測モードの再開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Stars and Galaxies	6. 最初と最後の頁 17-27
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.32231/starsandgalaxies.1.0_17	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 -

1. 著者名 Jun Takahashi, Yoichi Itoh, Kensuke Hosoya, Padma A. Yanamandra-Fisher, Takashi Hattori	4. 巻 154
2. 論文標題 Polarized Transmission Spectrum of Earth as Observed during a Lunar Eclipse	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aa91d6	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 該当する

1. 著者名 J. Takahashi, T. Matsuo, Y. Itoh	4. 巻 599
2. 論文標題 Feasibility of spectro-polarimetric characterization of exoplanetary atmospheres with direct observing instruments	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201628206	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12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 高橋 隼
2. 発表標題 地上からの地球観測：月面地球照・月食
3. 学会等名 ABC若手分野間連携勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋 隼, 本田敏志
2. 発表標題 西はりま天文台 NICとWFGS2の改良
3. 学会等名 2019年度せいめいユーザーズミーティング (第29回光赤外ユーザーズミーティング)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 隼, 伊藤 洋一, 渡邊 誠, 秋田谷 洋, 高木 勝俊, 川端 弘治, 伊藤 亮介, 大朝 由美子, 石橋 遥子, OISTER collaboration
2. 発表標題 月食偏光の比較: 2014年10月8日と2015年4月4日
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 隼
2. 発表標題 月食の偏光観測
3. 学会等名 第9回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋隼, 伊藤洋一, 細谷謙介, Yanamandra-Fisher, P. A., 服部堯
2. 発表標題 2015年4月4日皆既月食の偏光分光観測
3. 学会等名 日本天文学会 2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋隼
2. 発表標題 月食の偏光観測
3. 学会等名 第8回 光赤外線天文学大学間連携ワークショップ
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jun Takahashi, Taro Matsuo, Yoichi Itoh
2. 発表標題 Feasibility Evaluation of Spectro-Polarimetric Detection of Water Vapor in an Atmosphere of Exoplanets
3. 学会等名 Water in the Universe: from clouds to oceans (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Jun Takahashi
2. 発表標題 Feasibility of Spectro-Polarimetric Detection of Atmospheric Components of Exoplanets
3. 学会等名 TMT Science Forum (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 高橋隼, 松尾太郎, 伊藤洋一
2. 発表標題 偏光分光観測による系外惑星水蒸気探査の実現可能性
3. 学会等名 日本天文学会2016年秋季年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 高橋隼、松尾太郎、伊藤洋一
2. 発表標題 偏光分光観測による系外惑星大気調査の実現可能性
3. 学会等名 アストロバイオロジーネットワーク2016年年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Jun Takahashi, Taro Matsuo, Yoichi Itoh
2. 発表標題 Feasibility Evaluation of Spectro-Polarimetric Detection of Water Vapor in an Atmosphere of Exoplanets
3. 学会等名 Water in the Universe: from Clouds to Oceans (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 高橋隼
2. 発表標題 皆既月食の偏光観測
3. 学会等名 第6回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔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