

### ～月を見上げて、海のきらめきを探す～

地球の「海の偏光」を初検出。「海を持つ系外惑星」探しに偏光観測が役立つことを示す。

#### 【概要】

兵庫県立大学・名古屋大学・埼玉大学・ソウル大学の研究者からなる研究チームは、西はりま天文台の2mなゆた望遠鏡を用いて月面地球照を観測し、地球の「海の偏光」を初めて検出しました。

太陽系外惑星が続々と発見され、地球外生命の発見にも期待が高まっています。生命活動には液体が必要であると考えられていますが、系外惑星に海があるかを調べるのは簡単ではありません。滑らかな液面でキラキラと輝く光は「強く偏光する」という特徴を持ちます。したがって、偏光観測は、海を持つ系外惑星を探す手法として期待されてきました。しかし、地球を「遠く離れた惑星」として観測し、海の偏光を明確に検出した例はありませんでした。そのため、偏光観測が海探しに本当に役立つのか分かりませんでした。

研究チームは、月の夜面に映る地球の光である地球照を利用して、模擬的に「遠く離れた惑星」として地球を観測しました。32晩の観測から、「観測者から見える面に占める海の割合が大きいほど、地球の偏光度が高い」という結果を得ました。つまり、海が存在が地球の偏光度を高くしていることが、実際の観測により確認できました。この観測結果は、「海を持つ系外惑星」探しに偏光観測が役立つことを示すものであり、将来、偏光を活用した海探索の実現が期待されます。

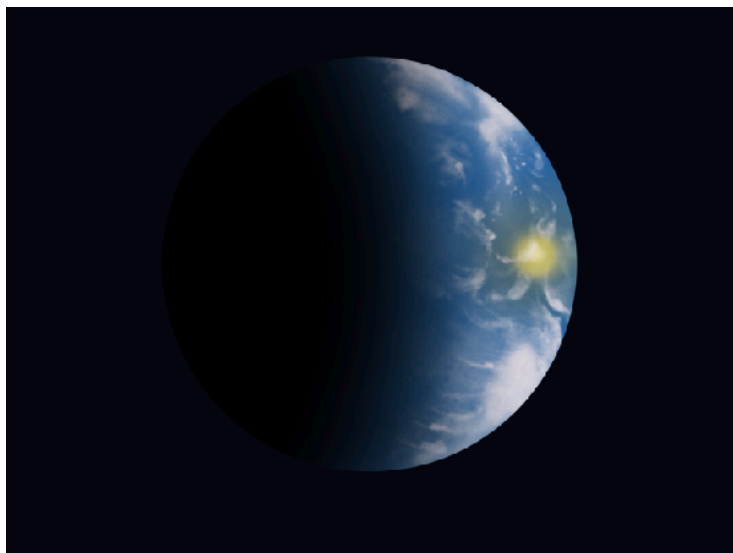


図1 海を持つ惑星の想像図。海面の「きらめき」が強く偏光する

クレジット: やこ/高橋隼



図2 兵庫県立大学西はりま天文台の「なゆた望遠鏡」

クレジット: 西はりま天文台

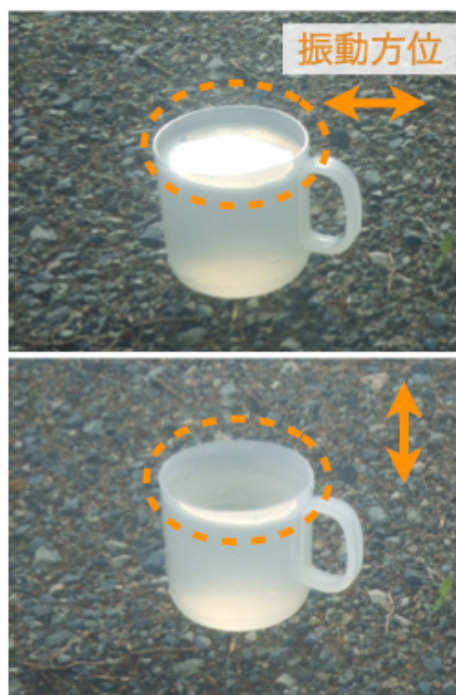
## 1. 背景: 「海を持つ系外惑星」を見つけるには？

系外惑星の発見が進み、地球外生命の発見への期待は高まっています。海を持つ惑星の発見は、生命探査の上で非常に重要です。なぜなら、生化学反応の溶媒として、液体は気体や固体よりも優れていると考えられるからです[1]。また、地球の海は生命のゆりかごであり、その多様性をもたらしました。

では、どのようにすれば海を持つ系外惑星を見つけられるのでしょうか？ 系外惑星を写真に写すことは難度が高く、できたとしても惑星は点にしか見えません。したがって、惑星の模様にならず、海があることを示す兆候を見つけなければなりません。

研究チームは、海の兆候として「偏光」に注目しました。光の振動方位によってその強さが異なる場合、その光は「偏光している」と言います。太陽に照らされた海面はキラキラと輝いていますが、この「きらめき」は強く偏光しています（図3）。つまり、海が存在が、惑星の強い偏光というかたちで現れることが期待できます。

海単体が強く偏光していることは明らかな事実ですが、陸や雲なども「ごちゃまぜ」にした地球全体の光では、海の偏光成分は薄められて検出しづらくなってしまいます。実際の地球観測で、海の偏光が明確に検出された例はありませんでした。そのため、地球と同様に海を持つ系外惑星があったとしても、偏光観測で海の兆候を捉えることができるのか判断が付きませんでした。



**図3** 水面のきらめき（鏡面反射）を偏光フィルターを通して見た写真。偏光フィルターは、図の矢印の方位に振動する光のみを通す。振動方位を切り替えると光の強さが大きく変わるということは、鏡面反射は強く偏光していることを表している。偏光サングラスは、この性質を利用して鏡面反射を抑えている（下図の状態）。

クレジット: 高橋隼

## 2. 研究の手法と結果: 月に映る地球の光を観測し、「海の偏光」の検出に成功

研究チームは、西はりま天文台（兵庫県佐用町）の2mなゆた望遠鏡（図2）と近赤外線カメラNICを用いて、月面地球照を観測しました。地球照とは、月の夜面に映る地球の光のことです（図4）。地球照の観測は、月を「くすんだ鏡」に見立て、地球にしながら地球を観測するようなものです。模擬的に「点としてしか見えないほど遠く離れた惑星」として地球を観測する手法として、広く利用されています[2]。

2019年から2020年にかけて合計32晩の観測が行われました。観測日時によって「月から見える地球に占める海の割合」は、およそ15%から45%の範囲で変化します。海の割合が大きいほど、海面のきらめきが見える可能性が高いので、偏光度も高くなると予想できます。図5は観測で

得られた地球照偏光度と海割合の関係を図示したものです。データ点は右上がりに分布しています。期待通り、「海割合が大きいほど、地球の偏光度は高い」という結果が得られました。

上記では各晩の平均偏光度を使って議論をしたのですが、1晩の中での時間変化も調べて見ると、興味深いことが分かりました。図6（左）は、2020年1月3日に観測した地球照偏光度の時間変化を表したものです。世界時10時（日本時19時）から12時（同21時）にかけて、偏光度が半分ほどに小さくなったことが分かります。この日、観測始めの頃は、月から見た地球の大部分はインド洋に覆われていたのですが、時間がたつにつれ、インド洋は夜面へと外れていき、代わりにアフリカ大陸が視界の中心に入ってきました。図6（右）の青線に示すように、海割合はどんどん小さくなっていきました。図6（左）の地球照偏光度の時間変化と見比べると、偏光度と海割合が非常によく似た形の曲線を描いています。つまり、地球照偏光度が海割合に連動している様子が観測されました。このような連動は、2020年1月3日以外にも観測されました。

図5と図6はどちらも「海割合が大きいほど、地球の偏光度は高い」ことを示しています。つまり、今回の観測によって、地球の「海の偏光」を初めてはっきりと検出したと言えます。

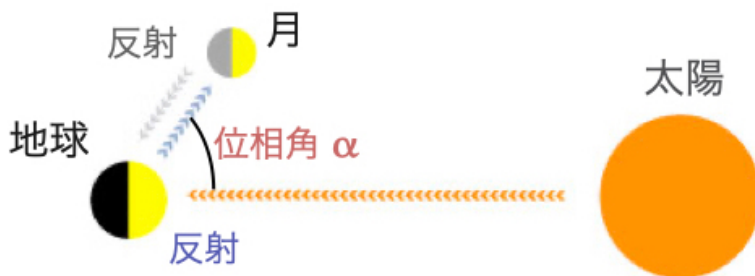


図4 地球照の写真（上）と地球照が起きる仕組み（下）

クレジット：（上）時政典孝/西はりま天文台、（下）高橋隼

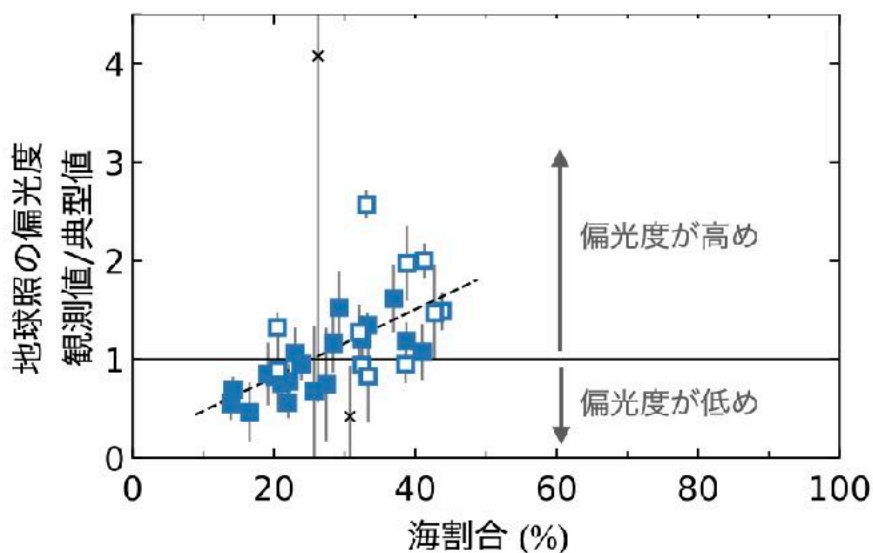
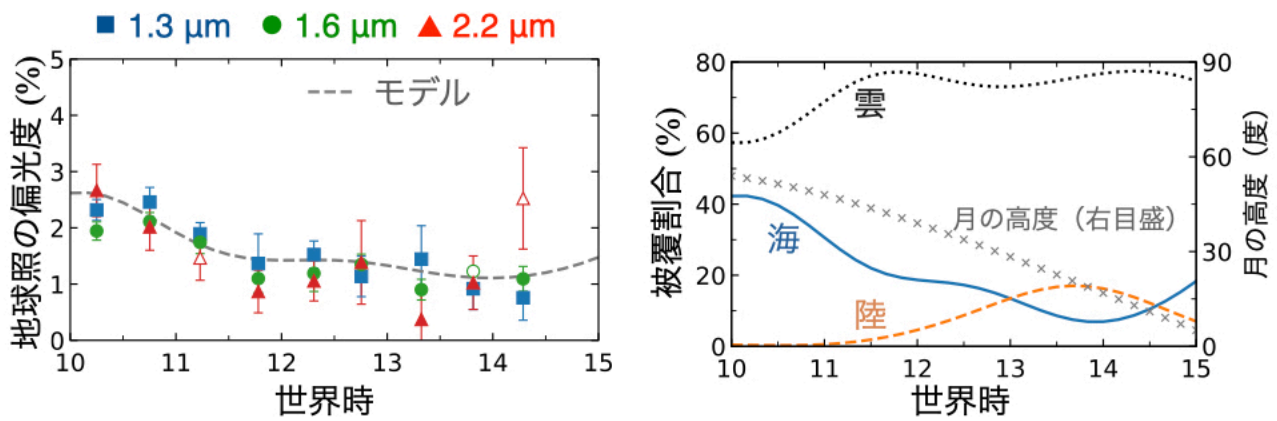


図5 地球照偏光度（各晩の平均値）と海割合の関係。縦軸は「観測された地球照偏光度」を、その位相角（図3参照）における「地球照偏光度の典型値」で割ったもので、1より大きければ「観測値は典型値よりも高かった」ことを表す。塗りつぶされた点は「新月～上弦～満月」、白抜きの点は「満月～下弦～新月」の観測。

クレジット: Takahashi et al. Astronomy & Astrophysics, 2021 を改変



**図6** 2020年1月3日に得られた地球照偏光度の時間変化（左）と、海・陸・雲の被覆割合の時間変化（右）。左図のデータ点の形や色の違いは観測波長の違い（白抜きは質の悪いデータ）。

クレジット: Takahashi et al. Astronomy & Astrophysics, 2021 を改変

### 3. 研究の意義: 海を持つ系外惑星探しへの応用

この観測結果は、海を持つ系外惑星の探索にとっても朗報です。系外惑星の偏光観測によって、海を見つけられることを示す結果だからです。次世代以降の超大型地上望遠鏡や宇宙望遠鏡には、偏光観測機能を持つ系外惑星観測装置の搭載が構想されています[3,4]。こうした装置を用いて、海を持つ系外惑星の探索が実現することが期待されます。

### 4. 研究体制について

本研究は、高橋 隼（たかはし じゅん）兵庫県立大学 自然・環境科学研究所 天文科学センター 特任助教が主導する、以下の6人からなる研究チームによって実施されました。

- 高橋 隼（兵庫県立大学）
- 伊藤 洋一（兵庫県立大学）
- 松尾 太郎（名古屋大学）
- 大朝 由美子（埼玉大学）
- Yoonsoo P. Bach (Seoul National University)
- 石黒 正晃 (Seoul National University)

## 5. 論文・研究会発表について

本研究成果は、2021年9月14日に、国際学術誌「Astronomy & Astrophysics」にオンライン掲載されました。また、本研究の概要を、2021年3月22-26日に広島およびオンラインで開催された国際会議「IAU（国際天文学連合）シンポジウム360: Astronomical Polarimetry 2020 – New Era of Multi-Wavelength Polarimetry」※にて発表したところ、Best Presentation Award（最優秀発表賞）の一つに選ばれました。

### - 論文情報

タイトル: Polarimetric signature of the oceans as detected by near-infrared Earthshine observations（日本語訳: 近赤外地球照観測で検出された海の偏光兆候）

著者: J. Takahashi, Y. Itoh, T. Matsuo, Y. Oasa, Y. P. Bach, and M. Ishiguro

掲載誌: Astronomy & Astrophysics

掲載日: 2021年9月14日

巻、論文番号: 653, A99

DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039331>

プレプリント: <https://arxiv.org/abs/2106.10099>

### - IAUシンポジウム360 情報

ウェブサイト トップページ: <https://astropol2020-iau.jp>

賞関連: <https://astropol2020-iau.jp/best-poster-award-and-best-presentation-award/>

## 6. 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業（15K21296, 17K05390, 21K03648）、および兵庫県立大学特別研究助成金の助成を受けたものです。また、光・赤外線天文学大学間連携事業からの支援を受けました。

## 7. 参考文献

- [1] Benner, S. A., Ricardo, A., & Carrigan, M. A. 2004, Curr. Opin. Chem. Biol., 8, 672
- [2] Arnold, L. 2008, Space Sci. Rev., 135, 323
- [3] Kasper, M., Cerpa Urra, N., Pathak, P., et al. 2021, The Messenger, 182, 38
- [4] Fitzgerald, M., Bailey, V., Baranec, C., et al. 2019, Bull. Am. Astron. Soc., 51, 251

更新履歴

21.09.28 誤字を修正しました。