

『「ホモキラリティ円偏光を活用した地球外生命探査」の実現に向けた基礎研究』
兵庫県立大学 自然・環境科学研究所 天文科学センター 高橋 隼

1 研究の背景と目的

1.1 生命探査法の開拓状況と限界

太陽系外惑星探査の進展により生命探査も真剣に検討されるようになり、多種の生命痕跡^{*1} が提案されている。代表例は、光合成の生成物である酸素分子ガスの吸収スペクトルや、植物の反射スペクトルの特徴である植生レッドエッジ^{*2} である。しかし、惑星環境によっては非生物的な酸素生成もありえ、また、ある種の鉱物など非生物によってもレッドエッジと似た特徴は起こりうる。現実的には、「決定的とまでは言えない生命痕跡」の検出を複数組み合わせ、惑星に生命が存在すると解釈する合理性を高めていくアプローチが必要である。

1.2 新しい生命痕跡：ホモキラリティに起因する円偏光

本研究では、新たな生命痕跡として「生体分子のホモキラリティ」^{*3} に注目する。これは生物と非生物を区別する非常に顕著な特徴である。ホモキラリティを持つ媒質は右回り・左回りの円偏光に対して異なる吸収率を持つため、生物の透過光や反射光は円偏光する。実際、植物の反射光は、特に葉緑素の吸収波長で 1%程度の円偏光度を持つ (Wolstencroft et al., 2004, Proc. Bioastronomy 2002)。したがって、地上に植生が広がっている惑星では、惑星反射光に生命起源の円偏光が含まれる可能性がある。惑星反射光の観測で、酸素ガスとレッドエッジに加え、(レッドエッジの短波長側、すなわち光合成色素に吸収される波長域で) 円偏光を検出すれば、光合成の存在を非常に強く示唆する。3種の観測特徴を光合成で整合的に説明できるからである。

植生のホモキラリティが地球反射光にどの程度の円偏光度をもたらすかは、測定成功例がなく不明である。地球のホモキラリティ円偏光度が不明では、系外惑星での検出を目指す計画を描くのは難しい。そこで、地球のホモキラリティ円偏光度を測定することを目指す。

*1 生命痕跡 (バイオシグネチャ) : 惑星に生命が存在することを指し示す観測的特徴。

*2 植生レッドエッジ: 光合成をする生物 (緑色植物) が持つ特徴的な反射スペクトル。具体的には、波長約 700 nm を境に反射率が急激に変化する特徴。

*3 生体分子のホモキラリティ: 生体分子の鏡像異性体のうちほとんど一方のみ (L 体アミノ酸、D 体糖質) が生物を構成することを指す。

2 研究方法・研究内容

2.1 地球照観測を実施するための装置開発

本研究では月面地球照の観測により、地球のホモキラリティ円偏光を検出することを想定する。地球照とは月の夜面に映る地球の反射光のことである (図 1)。Sterzik et al. (2009, Proc. Bioastronomy 2007) によると、地球照の円偏光度は 10-100 ppm 程度と予測される。つまり、10 ppm の円偏光度検出精度が必要である。

非常に高精度の観測が要求されるが、実現は可能である。近年、ppm 台の直線偏光度検出精度を持つ装置 (PlanetPol, POLISH(2), HIPPI; 以下「既存装置」) が



図 1 月面地球照

実用化されている。これらの装置はいずれも、大気変動の時間尺度よりも十分短い周期で（数百から数万 Hz）で半波長の位相変調（直線偏光方位の切り替え）をかけることにより、大気変動による測定値擾乱を防ぎ、高精度で偏光度を測定する。光学系前方に 1/4 波長板を挿入し円偏光を直線偏光に変換する、あるいは位相変調量が 1/4 波長となるタイミングと同期する信号を抽出することにより、直線偏光度と同程度の精度で円偏光度を観測できる。実際に POLISH2 は、13 ppm の円偏光度検出精度を達成している (Wiktorowicz+, 2015, ApJ)。

しかし、本研究で行う地球照観測には、既存装置では不足である。高速位相変調型装置では変調と同等以上に高速で光検出をする必要があるため、既存装置の光検出器には単素子の光電子増倍管 (PMT) が用いられている。PMT は高速で光検出を行える強みを持つ一方、空間分解能を持たないという弱みがある。地球照観測においては、月周辺のスカイ（背景光）の明るさを、その空間分布を考慮して差し引くことが必要である。すなわち、PMT を用いた既存装置では、スカイの空間分布を得ることができず、適切にスカイを差し引くことができない。

本研究の目標を達成するには、高速位相変調型で、なおかつ撮像（2次元画像の取得）機能を持った装置の開発が必要である。そこで、従来の PMT に代わり、高速カメラ (CMOS カメラ、または EM-CCD カメラ) を光検出器として採用し、撮像機能を備えた高精度偏光観測装置 Polarimeter for Optical Precise Observations (POPO) を開発する。

2.2 研究の全体構成

本研究全体は下記(1)から(4)で構成される。2021年度は第1年次に該当する。

- (1) 超高精度の円偏光撮像装置の開発（1-2年次）
- (2) 月面地球照の円偏光観測（2-4年次）
- (3) 太陽系内惑星の円偏光観測（3-4年次）
- (4) 「系外惑星の偏光観測」に向けた技術試験（4-5年次）

3 研究成果

3.1 装置の設計・製作

POPOの光学系とその支持系を設計・製作した(図2, 3)。実験室内で光学系を組み上げ、動作試験および光学系調整を行った。光学系は偏光分離素子(ウォラストンプリズム)で2光路に分かれ、それぞれの光路で独立に偏光を計測する。最終的には両光路で撮像することを目指す。着実な開発のため、第一段階では、1光路はPMTを用いて瞳測光する(既存装置と同様の方式)チャンネルとし、もう一方の光路を高速カメラによって撮像するチャンネルとした。POPOに適した高速カメラの選定・入手には時間を要するため、まずは仮のCMOSカメラを取り付けて開発を進めた。また、最終的には光学系の最前面(望遠鏡側)に1/4波長板を挿入できる機構を追加し円偏光測定機能を持たせるが、この段階では直線偏光のみ測定可能である。

さらに、遮光板、自立・自走機構、望遠鏡との接続部品、補機類の取り付け台を設計・製作した。これらの部品を組み立て、望遠鏡に取り付けることができる状態にまでPOPOを組み上げた。

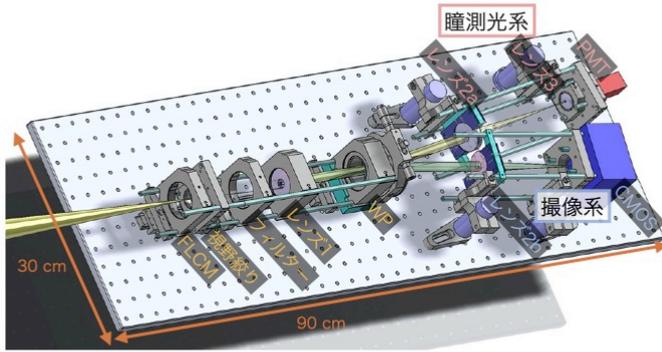


図 2 光学系・支持系の設計図

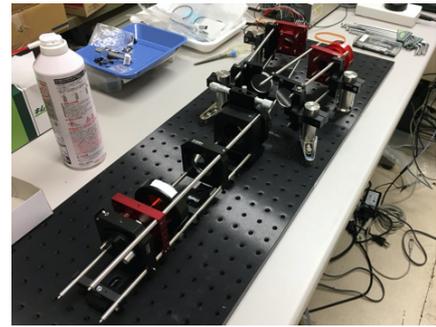


図 3 実際の光学系

3.2 ファーストライト、試験観測

2021年9月にPOPOを兵庫県立大学「なゆた望遠鏡」のカセグレン焦点に搭載した(図4)。9月から10月にかけて試験観測を行い、ファーストライト(天体の初観測)を達成した。瞳測光チャンネル(PMTによる光検出)を用いて、トワイライトスカイ(夕方の空)、金星、無偏光標準星、強偏光標準星等を試験観測した。非常に強く偏光するトワイライトスカイや金星の観測から、液晶位相変調器による変調と同期して、PMTの受光強度が変位することを確認した。これは、液晶分子の配列が変わることで入射直線偏光の方位角が回転し、ウォラストンプリズムで抽出された、ある方位の直線偏光の強度が変化することに対応する。つまり、高速位相変調による偏光測定原理が機能していることが確認できた。また、仮のCMOSカメラではあるが、撮像チャンネルを用いて天体を撮像することに成功した。

さらに4.3等(Rバンド)の無偏光標準星の観測結果から、ストークスパラメータ q および u (直線偏光の度合いを表すパラメータ)の統計的な誤差を導出した。10分間の連続観測で得られた q 、 u の標準誤差は20ppm程度(約6万データ点)であった(図5)。1時間の連続観測を行えば誤差が10ppmを切る計算になり、ほぼ想定通りの精度が得られた。



図 4 なゆた望遠鏡に搭載されたPOPO

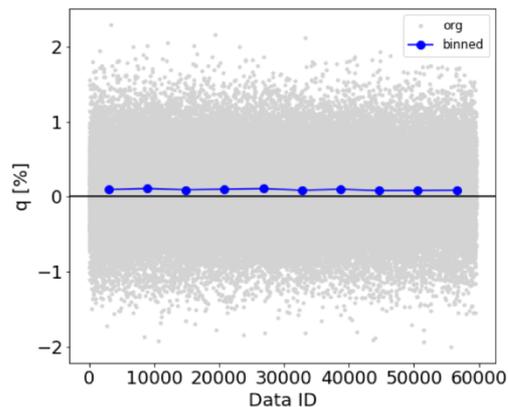


図 5 PMTを利用した無偏光標準星の観測例。横軸は測定点の番号で、時系列に並んでいる。最初から最後までが約10分間である。縦軸は、直線偏光を表すストークスパラメータ q 。灰色の点は全測定値。青色の点は、全測定時を10区間にビンニングしたもの。この観測では、平均値0.0943%、標準偏差0.52%、標準誤差0.0021%(21ppm)が得られた。

3.3 高速カメラの選定および入手

高速位相変調型装置に撮像機能を持たせるという前例のない試みにおいて、高速カメラは最も重要な機器のひとつであり、その機種選定には慎重を要する。可能な限り最新かつ広範な情報を収集し、綿密に機種選定を行った。4社のCMOSカメラまたはEM-CCDカメラを比較した。量子効率、読み出しノイズ、暗電流強度、200 fpsで読み出し可能なセンサーサイズ等の値を元に、地球照観測で10 ppmの円偏光測定精度を得るために必要な総積分時間を見積もり、最適なカメラを選定した。このカメラでは約2時間の積分で目標精度を達成できると見積もられる。2021年10月にデモ機を望遠鏡に取り付けて試験を行い、おおよその感度、読み出し速度、操作性を確認した。その上で、カメラ本体、および、その制御に必要な周辺機器を入手し、カメラをPOPOに取り付けた。

3.4 研究発表

〈発表文献〉

i) 高速偏光観測で拓くフロンティア, 高橋隼, 前原裕之, 野上大作, 川端弘治, IN「光赤外線天文学大学間連携 OISTER で拓く新しい天文学 2021」, 2021,

<https://drive.google.com/file/d/1l6mtVxuFKEQL5tStwHhrJLOV115pT89b/view>

ii) Frontiers Explored by Fast Polarimetry, Takahashi, Maehara, Nogami, Kawabata, IN “Future Frontier of Astrophysics and Astronomy by OISTER”, 2022 (iの英語版、現在校正中)

〈研究会等での発表〉

iii) 高速位相変調を用いた偏光観測装置の開発, 高橋隼, 2021年8月, 2021年度なゆたユーザーズミーティング, オンライン, 口頭

iv) 月食・月面地球照の偏光観測, 高橋隼, 2021年11月, 第12回光赤外線天文学大学間連携ワークショップ, オンライン, 口頭

〈高校生への講義〉

v) 偏光観測と装置開発, 高橋隼, 2022年1月, 神戸大学グローバルサイエンスキャンパス ROOT プログラム 特別セッション, オンライン, 口頭

3.5 まとめ

第一段階の装置を組み上げ、ファーストライトを達成した。瞳測光チャンネルではほぼ想定どおりの精度を得ており、装置の開発はほぼ計画どおりに進捗している。

4 生活や産業への貢献および波及効果

本研究は「宇宙の中で我々は孤独か」という、人類が抱いてきた根源的な問いへの回答につながるものであり、人々の世界観や生命観に変容をもたらさう。研究拠点である西はりま天文台は公開天文台・生涯学習施設としての機能もあり、様々な機会を通して、本研究の一端を紹介してきた(例えば、3.4.v)。日常生活では考えることのない視点で世界や生命を考えるきっかけを提供していると認識している。