

令和元年5月19日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02164

研究課題名(和文)地球型系外惑星の熱放射観測のための超高安定分光装置の開発と宇宙望遠鏡への提案

研究課題名(英文)High stable spectrograph for characterization of transiting Earth-like exoplanets

研究代表者

松尾 太郎 (Matsuo, Taro)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：00548464

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,600,000円

研究成果の概要(和文)：太陽系外の恒星を周回する地球型系外惑星の食分光による大気分光のために、10万分の1の精度が要求される。私たちは、10万分の1を超える高精度の分光測光装置(瞳孔縮小分光器)を提案し、試験機として製作に成功した。また、本装置コンセプトは、NASAが計画する将来の極低温大型宇宙望遠鏡(Origins Space Telescope: OST)のベースライン装置として採用され、これらの成果がUS 2020 Decadal Surveyへ提出されるOSTの提案書へ載せられることになった。今後、NASAとの協力の下、極低温環境において試験機の安定性を10万分の1の精度で評価する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、中間赤外線での地球型系外惑星の分光観測に新しい道を切り拓くものである。中間赤外線には、オゾンやメタンといった地球生命が光合成や代謝によって生成される分子の吸収線が存在する。したがって、系外惑星の大気の非平衡性を分光観測において調査することで、生命の存在有無を推定することが可能になる。本研究において、中間赤外線での生命探査を実現する新しい装置概念を創案し、その試験機の開発に成功した。本研究において開発された技術が基盤となり、人類が長年抱えてきた「宇宙における生命の可能性」という究極的な課題に挑むことが期待される。

研究成果の概要(英文)：Finding and characterizing the atmospheres of habitable planets orbiting nearby stars is one of the most important scientific goals for observations that will be developed in the 2020s and 2030s. Near- and mid-infrared (IR) spectral features of H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, and other molecule species in the atmospheres of Earth-like planets are expected to have amplitudes of only ~10 parts-per-million (ppm) in transmission or emission spectra when transiting late M-dwarf stars. Here, we proposed a new instrument concept for characterizing transiting Earth-like planets around nearby late-type stars. This concept was named as densified pupil spectrograph. We successfully developed a cryogenic densified pupil testbed optimized for transit observation in mid-infrared wavelength. In addition, this concept was adopted by the future large space mission concept, Origins Space Telescope, and was described as a baseline instrument in the OST proposal for submission to US 2020 decadal survey.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：地球型系外惑星 高精度分光測光器 中間赤外線 検出器 極低温

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

## 1. 研究開始当初の背景

(1) Kepler 衛星により地球型系外惑星が多数発見され、私たちの銀河系において地球サイズの惑星は普遍的に存在することが示された。また、地上望遠鏡においてトリスイト 1 をはじめとした食を起こす地球サイズの系外惑星が太陽系近傍で発見され、さらに、2018 年に打ち上がった Transiting Exoplanets Survey Satellite (TESS) もまた太陽系近傍において地球サイズの食を起こす惑星を多数発見することが期待されている。したがって、本分野における重要な目標の一つが、近傍の地球型系外惑星を分光し、惑星表層における生命居住可能性や惑星大気から生命活動を示唆する分子を検出することである。

(2) 地球型系外惑星の食分光のためには、食の前後および食中の数時間にわたって 10 万分の 1 の精度で計測することが要求される。しかし、現在の汎用の分光装置では、観測装置の姿勢によって像が検出面上で移動するため、一定の明るさの光源を観測しても検出器の感度ムラによってシグナルが変動し、1000 分の 1 から 1 万分の 1 の精度に分光精度が限定されていた。したがって、汎用の分光装置において地球型系外惑星の食分光を実現することは困難である。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、地球型系外惑星の食分光を実現するための技術を確立することである。具体的には、10 万分の 1 の安定性を数時間にわたって維持することを室内において実証することである。また、その実現のために、本コンセプトを将来の宇宙望遠鏡へ応用することである。

## 3. 研究の方法

(1) 私たちは、10 万分の 1 の安定性を達成するために、汎用の分光装置を発展させるのではなく、汎用の分光装置と 180 度異なる概念の新しい分光装置を提案した。本分光装置は瞳収縮分光と呼ばれ、望遠鏡の空間分解能を犠牲にする代わりに、望遠鏡の姿勢による検出面での像の移動を原理的にゼロにするものである。私たちは、本研究において、次の二つの目標を立てた。1. 本コンセプトの理論的な検証と試験機による実証、2. 本コンセプトの次世代の宇宙望遠鏡への提案である。

## 4. 研究成果

私たちは、瞳収縮分光器の理論的検証に関して次の 3 編の論文を出版した。また、瞳収縮分光器を将来の宇宙望遠鏡計画へ積極的に提案することによって、NASA が提案する将来の大型宇宙望遠鏡計画 (Origins Space Telescope: OST) におけるベースライン装置として採用された (雑誌論文 2)。以下では、(1) から (3) において 3 編の論文の成果について報告し、(4) において OST に最適化された分光器について紹介する。最後に、瞳収縮分光器の試験機の製作と今後について (5) で述べる。

(1) 瞳収縮分光器の概念を提案し、望遠鏡の姿勢変化によるシグナルの変動を数学的に記述することに成功した。瞳収縮分光器は、図 1 に示すように、瞳を分割・縮小する機構と分光器の二つから構成される。前者の望遠鏡主鏡と光学的に等価な面 (瞳) を分割・縮小することによって、後者の分光器において瞳面と焦点面を波動光学的に逆転させることが可能となり、検出面で望遠鏡の主鏡の分割・縮小された分光像が形成される。これによって、望遠鏡の姿勢が変化しても検出器での像の位置が変化しない分光器を実現することができる (雑誌論文 4)。

(2) 瞳収縮分光器は、望遠鏡に入射した全ての光を検出器に結像させるため、焦点面において望遠鏡の視野を絞る必要がある。視野を絞らない場合、観測天体の光とそれ以外の光が検出器の同じ位置に結像されるため、分離することができない。そこで、視野を絞るためのマスクを焦点面に置く必要がある。しかし、焦点面に形成される点像の光の一部はマスクによって遮蔽されるため、望遠鏡の姿勢が変化する場合に、検出器に入射する光量が変化する。そこで、マスクによって遮蔽される光量を数学的に記述し、望遠鏡の姿勢変化に対する最適なマスクの大きさを導出した (雑誌論文 3)。

(3) 瞳収縮分光器が検出器の多数のピクセルに光を分散させることに着目して、検出器におけるゲインの変動を補正する方式を創案した。本方式を利用すれば、検出器ゲインの変動による系統誤差によって安定性が制限されるのではなく、ポアソンノイズによって安定性が制限される。本研究において、トリスイト 1 のような食を起こす M 型星周りの地球型系外惑星のスペクトルを計測することが可能になる (雑誌論文 1)。

(4) OST は、NASA が提案する 2030 年代の超大型宇宙望遠鏡コンセプトの 4 つのうちの一つである。この OST の主要な科学テーマの一つが、地球型系外惑星の食分光による大気分光での生命探査および生命居住可能性の検証である。この科学テーマを推進するために、分光器の高精度化が求められる。瞳収縮分光器は OST 計画においてベースライン装置として採用された。私たちは、波長分解能 100 から 300 で、波長 2.8 から 20 $\mu\text{m}$  までの広い波長帯域を一度にカバーする分光器の設計を行った。

(5) OST を通じて構築された共同研究を進展させて、瞳収縮分光器の試験機を NASA Ames Research において開発されたスペース用中間赤外線検出器と組み合わせて実験を進めている。図 2 は、瞳収縮分光器の試験機である。この実験の特筆すべきことは、光源、分光器、検出器のすべてのサブシステムを $-270$  度に冷却された極低温真空容器内で温度を安定化させていることである。したがって、背景光の変動による安定性の悪化や、光学系の熱放射による安定性の悪化は全くなく、10 万分の 1 の計測環境を実現することができる。2019 年 5 月には、極低温容器内で初めて瞳収縮分光器の計測を開始する予定である。

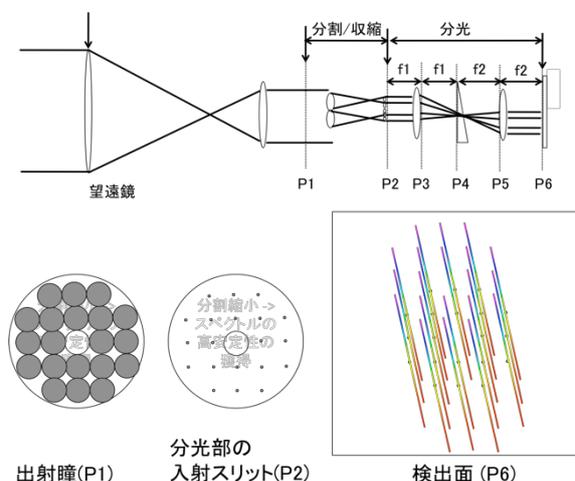


図 1. 瞳収縮分光器の構成

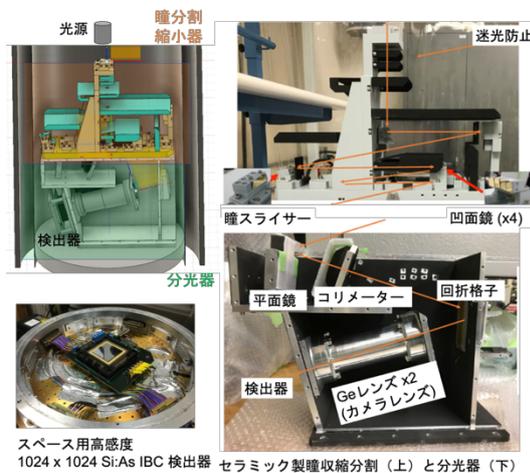


図 2. 瞳収縮分光器の試験機  
(瞳分割・縮小機構は右上、分光器は右下)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

1. S. Goda, T. Matsuo, “A new method for Calibration of Gain Variation in Detector System,” *Astronomical Journal*, **156**, 288, 2018. (refereed)
2. T. Matsuo, T. Greene, T. Roellig, et al. “A stable spectrophotometric capability for the Origins Space Telescope (OST) Mid-infrared Imager, Spectrometer, Coronagraph (MISC),” *Proceedings of SPIE*, **10698**, 200, 2018. (not refereed)
3. S. Itoh, T. Matsuo, S. Goda, H. Shibai, T. Sumi, “Pupil masks for Spectrophotometry of Transiting Planets,” *Astronomical Journal*, **154**, 197, 2017. (refereed)
4. T. Matsuo, S. Itoh, H. Shibai, T. Sumi, and T. Yamamuro, “A New Concept for Spectro-photometry of Transiting Exoplanets with Space-based Telescopes,” *Astrophysical Journal*, **823**, 139, 2016. (refereed)

〔学会発表〕 (計 3 件)

1. 合田翔平、松尾太郎、井戸雅之、伊藤哲司、芝井広、住貴宏、山室智康、「高精度測光分光のための集積回路における長期的な信号変動の補正方式」、2018 年春季日本天文学会
2. T. Matsuo, “A concept for transit spectroscopy and its potential application to future space telescopes,” ARIEL Space Mission Conference Brussels 2016
3. 伊藤哲司、松尾太郎、芝井広、住貴宏、「地球型系外惑星大気分光に向けた高安定分光器の基礎研究」、2016 年秋季年会

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：

種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<https://spacescience.arc.nasa.gov/story/ss-science-weekly-highlight/>

<https://origins.ipac.caltech.edu/page/technology>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：芝井 広

ローマ字氏名：(SHIBAI Hiroshi)

所属研究機関名：大阪大学

部局名：大学院理学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：70154234

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。