

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：13901

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2018～2019

課題番号：17KK0090

研究課題名（和文）科学衛星の観測環境を模擬した地球型系外惑星観測のための高安定分光器の性能評価

研究課題名（英文）Performance verification of high stable spectrograph for characterization of transiting Earth-like planets

研究代表者

松尾 太郎（Matsuo, Taro）

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：00548464

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,000,000円

渡航期間： 15ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究は、NASA Ames Research Centerと協力して、太陽系近傍にある地球サイズの惑星の大気分光を行い、その惑星の表層環境や生命活動の有無を調査することを目的とした技術を確認するものである。本技術は、瞳収縮分光と呼ばれる、従来の焦点面分光と180度異なる概念の分光器である。この分光器は、原理的に望遠鏡の姿勢や主鏡の歪みの影響を全く受けないため、安定して惑星大気を分光することができる。本研究期間において、中間赤外線領域において瞳収縮分光の像を取得することに成功し、さらに100万分の10という分光測光精度を達成した。地球型系外惑星の大気を分光する新しい手法を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2009年に打ち上げられたKepler衛星によって、地球サイズの太陽系外惑星は宇宙に普遍的に存在することが明らかにされた。さらに、2018年に打ち上げが成功した、Transiting Exoplanets Survey Satellite (TESS)や地上望遠鏡によって、太陽系近傍において続々と食を起こす地球サイズの惑星が発見されている。この食を起こす惑星の表層環境や生命活動の有無を調査することが今後20年の目標である。本研究は、食を起こす惑星の大気を精密に分光する新しい瞳収縮分光技術をNASAと協力しながら確立し、将来の大型宇宙望遠鏡において実現する道筋を作ることができた。

研究成果の概要（英文）：This study establishes a technology for measuring the atmospheric compositions of Earth-sized planets orbiting nearby stars under a collaboration with NASA Ames Research Center. This technology, which is called "Densified Pupil Spectrograph (DPS)," enables us to perform extremely stable spectroscopy over a few hours under an existence of telescope pointing jitter and deformation of primary mirror. In this study, we built a prototype densified pupil spectrograph at NASA Ames Research Center. We successfully obtained the spectra of the densified sub-pupils on the detector plane and reduced the systematic noise of the spectrograph down to 10 parts-per-million (ppm).

研究分野：赤外線天文学

キーワード：太陽系外惑星 惑星大気 精密分光測光 中間赤外線

## 様式 F - 19 - 2

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 2009年に打ち上げられた Kepler 衛星により地球サイズの太陽系外惑星が多数発見され、宇宙において地球サイズの惑星は普遍的に存在することが分かった。2017年には地上望遠鏡においてトリスト 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の発見が報告されている。

このような惑星の大気を分光する方法として食分光がある。食分光とは、惑星が主星の前面を通過する際にその主星の一部の光が惑星大気を通過するために、惑星本体の食に加えて大気の追加吸収が観測されるものである。食の前後で分光することによって、惑星大気に含まれる分子組成を測定することが可能である。今後 20 年において、近傍の地球サイズの系外惑星を分光し、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の有無を確認することが重要な目標である。

(2) 地球サイズの系外惑星の食分光を実現するには、食の前後および食中の数時間にわたって 10 万分の 1 (10 parts-per-million (ppm)) の精度で計測することが要求される。しかし、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。つまり、汎用の分光器によって地球サイズの系外惑星の食分光を実現することは困難である。

(3) 以上を踏まえて、私たちは 2016 年に汎用の分光器と 180 度異なる瞳収縮分光器を提案した。本分光器は検出面と主鏡が光学的に共役の関係を作るため、望遠鏡の姿勢や主鏡の歪みによって分光像の位置や形状は変化しないことである。つまり、食の前後数時間に渡って高安定に分光することが可能になる。本方式は、NASA が提案する超大型宇宙望遠鏡の一つのコンセプトに採用され、地球サイズの系外惑星の大気分光の科学目標を担うことになった (文献 1)。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、NASA Ames Research Center と協力して、瞳収縮分光器の試験機を評価する極低温テストベッドを製作する。また、そのテストベッドにおいて瞳収縮分光器の性能評価を行い、将来の宇宙望遠鏡へ本方式を提案することである。

### 3. 研究の方法

(1) NASA Ames Research Center と大阪大学が協力して、瞳収縮分光器の性能評価を行う極低温テストベッドを開発した (図 1)。前者は、瞳収縮分光器全体を極低温に冷却するための極低温容器および中間赤外線検出器を用意した。後者は瞳収縮分光器の試験機を日本において製作し、NASA Ames Research Center に運んだ。性能評価は、NASA Ames Research Center において実施された。

(2) 本試験機のために採用された検出器は、NASA Ames Research Center において開発された James Webb Space Telescope (JWST) の中間赤外線装置 (MIRI) に使用される Si:As Impurity Band Conduction (IBC) である。私たちは、Si:As IBC 検出器の基礎パラメータを評価し、さらに検出器単体の安定性を評価した (文献 2)。これによってテストベッドで達成される安定性の上限値を決定した。

(3) 観測装置からの熱放射を抑えるために、光源から検出器までを -270 度まで冷却した。さらに、光源および検出器の温度変動は 1 ミリ K 以下に抑えることで、安定な環境下において分光器の安定性を評価することができた。

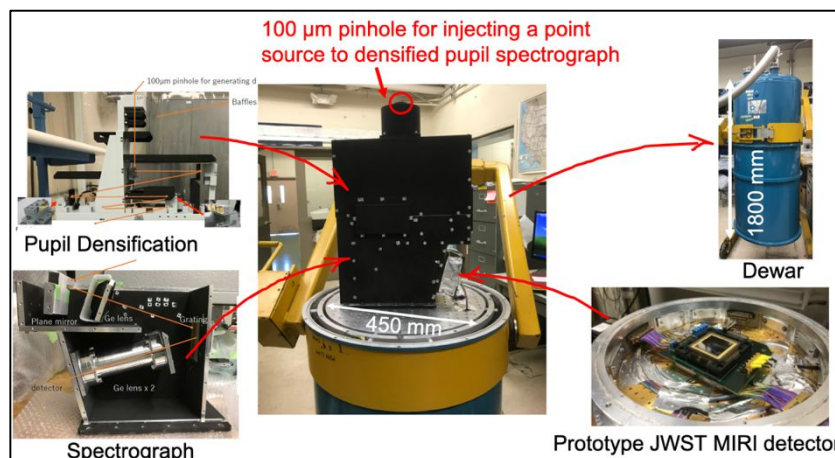


図 1. NASA Ames Research Center において開発された極低温テストベッドの概要。

#### 4. 研究成果

(1) 瞳収縮分光器で取得された分光像は設計されたパラメーター（波長帯域および波長分解能）と精度よく一致した。図2の左は、検出面において取得された分光像である。瞳が4つに分割されており、その分割された分光像が検出面において形成されている。

(2) 取得された瞳収縮の分光像を6時間に渡って取得し、その分光像の安定性を評価した。図2の中央は、ある一つの波長における時系列データである。

(3) 時系列データを積分しながら、分光器の安定性を評価した。ここで、安定性は1に規格化されたシグナルの標準偏差として定義された。図2の右は、時系列データの積分範囲を変えながら、安定性を導出した結果である。分光器の分光測光精度は、100万分の11(11 parts-per-million (ppm))であることが明らかにされた。これは、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よって、検出器におけるゲインの変動が抑えられたからであると考えられる（文献3）。以上より、瞳収縮分光器の室内実証に成功した。

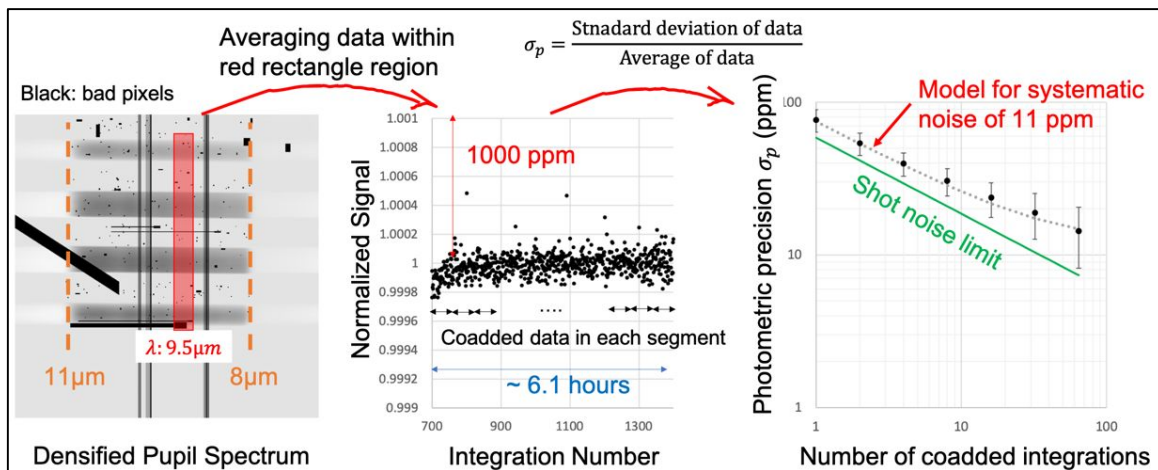


図2. (左) 瞳収縮分光器で得られたスペクトル像  
 (中央) ある波長における6時間にわたる時系列データ  
 (右) 時系列データから導出された分光器の安定性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Matsuo, T. Greene, T. Roellig et al.	4. 巻 10698
2. 論文標題 A highly stable spectrophotometric capability for the Origins Space Telescope (OST) mid-infrared imager, spectrometer, coronagraph (MISC)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 12 page
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2311896	査読の有無 無
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 S. Goda, T. Matsuo	4. 巻 156
2. 論文標題 A New Method for Calibration of Gain Variation in a Detector System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 24 page
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/aaeb29	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 T. Matsuo, T. Greene, R. Johnson, R. McMurray, T. Roellig, K. Ennico	4. 巻 131
2. 論文標題 Photometric Precision of a Si:As impurity band conduction mid-infrared detector and application to transit spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publication of Astronomical Society of Pacific	6. 最初と最後の頁 1006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1538-3873/ab42f1	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

〔学会発表〕 計0件

〔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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	グリーン トーマス  (Greene Thomas)	ナサ エイムズ リサーチセンター・Astrophysics Branch・Astrophysicist	