

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00700

研究課題名（和文）地球型系外惑星大気の特徴づけのための精密分光方式の確立

研究課題名（英文）Establishment of a method for characterizing 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） 33,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、太陽系近傍にある低温星周りの地球型系外惑星の熱放射の検出、さらに大気分光を目指して、中間赤外線において超高安定の分光測光観測を実現するものである。その実現において、原理的に高い分光測光精度が達成可能な瞳分光法（望遠鏡の入射開口面を分光する方法）に着目し、極低温テストベッドをNASA Ames Research Centerに構築し、その実証と性能評価を行った。本実験を通して、瞳分光像を検出面に形成することに成功し、またジェームズ・ウェブ宇宙望遠鏡用に開発された中間赤外線検出器と瞳分光器を組み合わせることで10万分の10の安定性を得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球型系外惑星の大気分光は、宇宙における生命探査の最初の一步として位置付けられる。惑星大気分子組成から点として観測される惑星の表層での生命活動の可能性を検証することが可能である。本研究は、NASAが提案した極低温宇宙望遠鏡ミッションコンセプトに、瞳分光器を搭載することによって、2030年代に食分光を通して生命探査の実現を目指すものであった。その搭載に向けて、NASA Ames Research Centerにおいて技術実証を行い、技術の確立を目指した。結果として、当初目指していた分光測光精度10万分の10に到達することができ、これは生命探査を可能にする性能である。

研究成果の概要（英文）：This research aims to detect the thermal emission and atmospheric absorption of terrestrial exoplanets orbiting late-type stars in the vicinity of the solar system, realizing highly stable spectrophotometric observations in the mid-infrared. In order to realize the highly stable spectroscopy in the mid-infrared, we experimentally developed a densified pupil spectrograph, which forms a spectrum of the pupil plane optically conjugated to the entrance pupil and in principle can achieve high spectrophotometric precision. We developed a cryogenic testbed for demonstration and evaluation of the densified pupil spectrograph at NASA Ames Research Center. Through this experiment, we succeeded in forming the densified pupil spectroscopic image on the detection plane and obtained a stability of 10 parts-per-million (ppm) for a long-term observation by combining a mid-infrared Si:As detector for James Webb Space Telescope with the densified pupil spectrograph.

研究分野：太陽系外惑星科学

キーワード：中間赤外線分光器 高安定 極低温 中間赤外線検出器 瞳分光

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 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ティック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。

特に中間赤外線には、オゾンやメタンといった生物の代謝に由来する分子の吸収線が形成される。ここで酸化剤としての酸素・オゾンと還元剤としてのメタンは反応するため、吸収線として観測されれば、定常的に地球表層から何らかの形で大気に分子を供給していることを意味する。現在の地球においてオゾン・メタンともに地質活動などの非生物由来は生物由来に比べて小さいことを踏まえれば、オゾンとメタンが共存する非平衡の状態にある大気は一つの生命活動の指標として捉えることができる可能性がある。中間赤外線での大気分光は、宇宙における生命探査において非常に重要である。

(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。そこで、汎用の分光器ではあるものの望遠鏡の指向精度を大幅に改善する、あるいは望遠鏡の指向方向によって像の移動しない分光手法が求められる。

(3) 米国の2020年委員会へNASAが提案した4つの望遠鏡コンセプトのうちの一つが望遠鏡を極低温まで冷却することによって、遠赤外線までの光を観測することを可能とする、Origins Space Telescope (OST)である。このOSTで実施する科学テーマに基づいて、最終的に3つの観測装置に絞られ、そのうちの一つが中間赤外線高安定分光測光器である。これは、上述のTESS衛星によって発見された近傍の地球型系外惑星候補に対して、OSTで食分光による地球型系外惑星の大気分光を行うことを目的としたものである。

(4) OSTに搭載する装置として、私たちが提案した瞳収縮分光器が採用された。瞳収縮分光器は(2)で述べた、望遠鏡の指向方向によって像の移動しない分光手法を実現するものであり、望遠鏡の入射開口面と光学的に等価な面を分光することによって実現する。従来の分光器は、焦点に分光スペクトルを結像させることから、瞳収縮分光器は従来の概念と180度異なる概念に位置するものである。入射開口の分光スペクトルを取得する結果、望遠鏡の姿勢だけでなく、主鏡の歪みなどのあらゆる収差に対して、像の移動や形状変化が原理的には起こらない。以上より、OSTの仕様においても安定な分光測光ができる可能性がある。

### 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。本研究では、極低温で動作する望遠鏡の指向誤差を模擬する望遠鏡シミュレータと光源の明るさをモニターする測光機を開発し、指向擾乱のある条件下で瞳収縮分光器の性能評価を行う。光源そのものの明るさ変動と指向擾乱による観測データの変動を区別することで、指向擾乱が分光測光へ影響する成分だけを抽出する。

### 3. 研究の方法

(1) NASA Ames Research Centerと名古屋大学が協力して、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の左)。追加で極低温でも動作する指向誤差を模擬するサブシステムを開発し、テストベッドに取り付けて指向のある環境下でも瞳像が移動しないことを示す。

(2) NASA Ames Research Center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。名古屋大学は瞳収縮分光器の試験機、光源の明るさをモニターするフォトダイオード、指向擾乱や波面歪みを模擬する望遠鏡シミュレータを用意した。後者のサブシステムは全て日本において製作し、NASA Ames Research Centerに運んで組み立て、性能評価は、NASA Ames Research Centerにおいて実施する。

(3) 望遠鏡シミュレータのソフトウェアは、別途、常温で補償光学系を組んで、波面を計測し

ながら収差を与える可変形鏡のソフトウェアを製作した（図2参照）。波面センサをモニターしながら一つの収差を精度良く与えることに成功した（図3参照）。

（4）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、これによってテストベッドで達成され得る安定性の上限値を決定する。

（5）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。

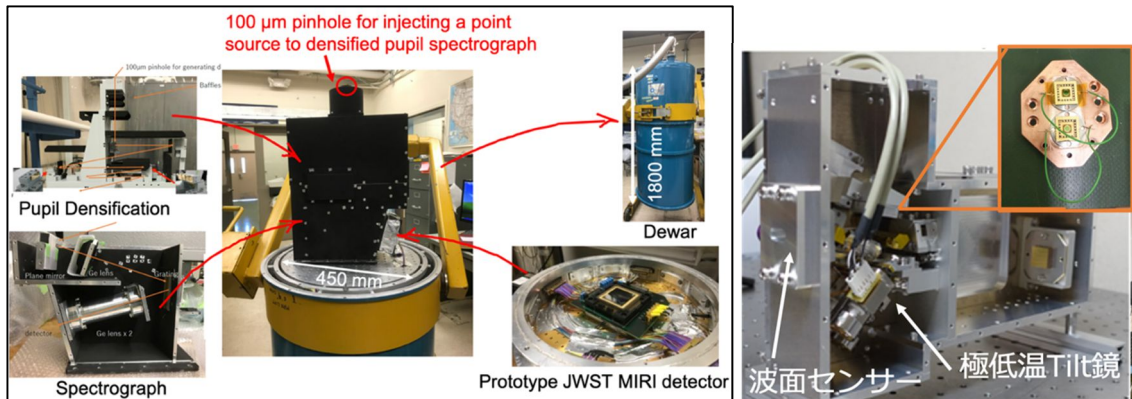


図1. NASA Ames Research Center において開発された極低温テストベッド（左）と極低温で動作する望遠鏡シミュレータと中間赤外線における高精度光量モニター（右）。

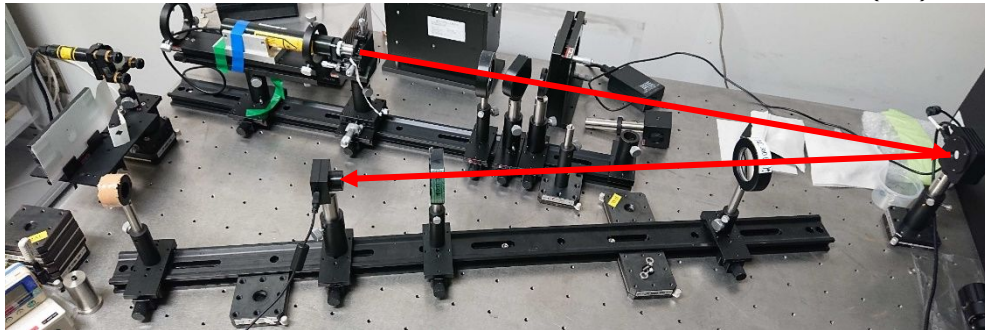


図2. 常温で構築した望遠鏡シミュレータ. 光源から出た光を平行光にした後に、可変形鏡で反射させて（写真の右）、シャックハルトマンセンサで測定する（写真中央下）。

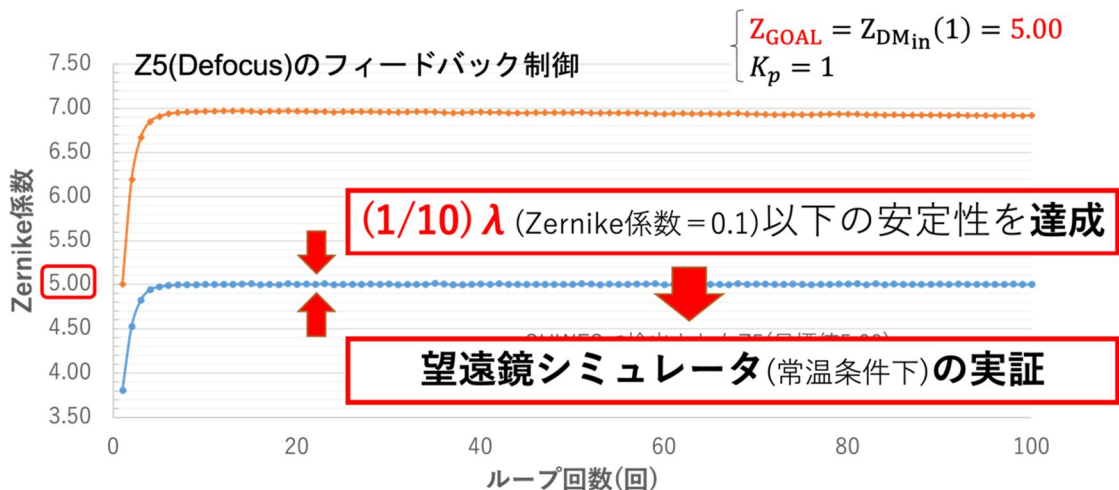


図3. フィードバック制御しながら一つのZernike係数だけを精度良く（波長の1/10以下）与えることに成功。

#### 4. 研究成果

Covid-19の影響で2019年度（初年度）にのみ NASA Ames Research Center において実験

を進めることができた。2019 年度から 2021 年度は実験施設が閉鎖したため、当初予定していた望遠鏡シミュレータを瞳孔分光器に取り付けることができず、瞳孔収縮分光器単体の評価となった。性能の評価には至らなかったものの原理の実証までは成功した。

代わりに、このテストベッドを利用せずに、名古屋大学に可視光でテストベッドを構築し、望遠鏡シミュレータで指向擾乱を模擬した。その結果、数 /D の指向誤差を与えても分光スペクトルの位置は 0.1 ピクセルのオーダーで全く変化しないことが確認された。以上より、指向擾乱に対して分光スペクトルは耐性があることを確認した。

(1) 瞳孔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 4 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) 取得された瞳孔収縮の分光像を 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 4 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 4 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、瞳孔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。以上より、瞳孔収縮分光器の室内実証に成功した。

(4) 瞳孔収縮分光器の発展として、ユニークな特徴を活かして宇宙干渉計への応用や高精度視線速度法観測への貢献も期待される。

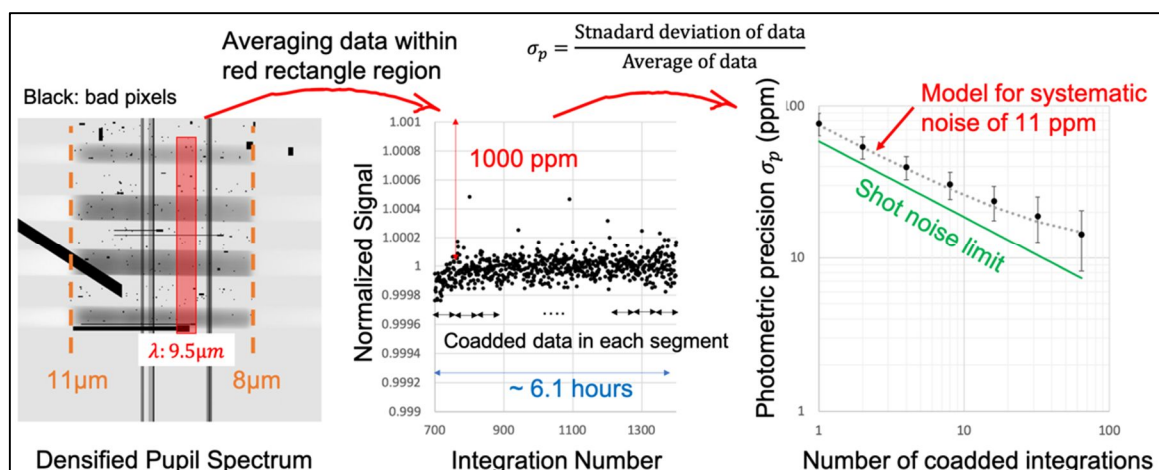


図 4. (左) 瞳孔収縮分光器で得られたスペクトル像  
 (中央) ある波長における 6 時間にわたる時系列データ  
 (右) 時系列データから導出された分光器の安定性

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Taro Matsuo, Satoshi Ikari, Hirotaka Kondo, Sho Ishiwata, Shinichi Nakasuka, Tomoyasu Yamamuro	4. 巻 8
2. 論文標題 High spatial resolution spectral imaging method for space interferometers and its application to formation flying small satellites	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 15001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.8.1.015001	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 Taro Matsuo, Thomas P. Greene, Mahdi Qezlou, Simeon Bird, Kiyotomo Ichiki Yuka Fujii and Tomoyasu Yamamuro	4. 巻 163
2. 論文標題 Densified Pupil Spectrograph as High-precision Radial Velocimetry: From Direct Measurement of the Universe's Expansion History to Characterization of Nearby Habitable Planet Candidates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ac397b	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 該当する
1. 著者名 Itoh, S., Matsuo, T.	4. 巻 163
2. 論文標題 A Coronagraph with a Sub- /D Inner Working Angle and a Moderate Spectral Bandwidth	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 279
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ac658a	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 Itoh, S., Matsuo, T., Ota, S., Ikeda, Y., Kojima, R., Yamada, T., Sumi, T.	4. 巻 12188
2. 論文標題 Development progress of diffraction-limited coronagraphs with moderate spectral bandwidths	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of SPIE	6. 最初と最後の頁 121884
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2629087	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 -

1. 著者名 Ota, S., Matsuo, T., Itoh, S., Kano, T., Ikeda, Y., Kojima, R., Sukegawa, T., Nakayasu, T., Koyama, M., Sumi, T., Yamada, T.	4. 巻 12188
2. 論文標題 Development of a high-precision spectrograph for diffraction-limited coronagraphs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of SPIE	6. 最初と最後の頁 1218851
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2629324	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 -

1. 著者名 Leisawitz David T., Matsuo Taro, Mosby Gregory, Ade Peter A. R., Akeson Rachel, Fixsen Dale J., Gong Qian, Kaneda Hidehiro, Maher Stephen F., Mundy Lee G., Ota Shunsuke, Rau Gioia, Sharp Elmer H., Shimokawa Toru, Staguhn Johannes G., Tucker Carole E., van Belle Gerard T.	4. 巻 12190
2. 論文標題 The Japan-United States Infrared Interferometry Experiment (JUStInE): balloon-borne pathfinder for a space-based far-IR interferometer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of SPIE	6. 最初と最後の頁 1219016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2629426	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 Y. Fujii, T. Matsuo	4. 巻 161
2. 論文標題 Detecting Atmospheric Molecules of Nontransiting Temperate Terrestrial Exoplanets Using High-resolution Spectroscopy in the Mid-infrared Domain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 14 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/abe129	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. P. Greene, R. R. Johnson, R. E. McMurray, T. Roellig, K. Ennico-Smith, B. P. Helvensteijn, A. Kashani, H. Shibai, T. Sumi, S. Itoh, I. Sakon, T. Yamamuro, Y. Ikeda, T. Manome, N. Iida, K. Yanagibashi, M. Kamiura	4. 巻 11443
2. 論文標題 Laboratory experiment of densified pupil spectrograph for the Origins Space Telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 8 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560421	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 T. Matsuo, S. Itoh, Y. Ikeda	4. 巻 161
2. 論文標題 Spectroscopic Fourth-order Coronagraph for the Characterization of Terrestrial Planets at Small Angular Separations from Host Stars	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 19 pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/abd248	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 Matsuo Taro, Greene Thomas P., Johnson Roy R., McMurray Robert E., Roellig Thomas L., Ennico Kimberly	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 Publications of the Astronomical Society of the Pacific	6. 最初と最後の頁 124502 ~ 124502
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

1. 著者名 Matsuo Taro, Greene Thomas P., Johnson Roy R., McMurray Robert E., Roellig Thomas L., Ennico-Smith Kimberly, Helvensteijn Bernardus P., Kashani Ali, Shibai Hiroshi, Sumi Takahiro, Itoh Satoshi, Sakon Itsuki, Yamamuro Tomoyasu, Ikeda Yuji, Manome Takeo, Iida Naoto, Yanagibashi Kentaro, Kamiura Masatsugu	4. 巻 11443
2. 論文標題 Laboratory experiment of densified pupil spectrograph for the Origins Space Telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 114436
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560421	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

〔学会発表〕 計1件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Matsuo Taro, Greene Thomas P., Johnson Roy R., McMurray Robert E., Roellig Thomas L., Ennico-Smith Kimberly, Helvensteijn Bernardus P., Kashani Ali, Shibai Hiroshi, Sumi Takahiro, Itoh Satoshi, Sakon Itsuki, Yamamuro Tomoyasu, Ikeda Yuji, Manome Takeo, Iida Naoto, Yanagibashi Kentaro, Kamiura Masatsugu
2. 発表標題 Laboratory experiment of densified pupil spectrograph for the Origins Space Telescope
3. 学会等名 SPIE (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究 分 担 者	芝井 広  (Hiroshi Shibai)  (70154234)	大阪大学・その他部局等・名誉教授   (14401)	削除：2020年5月18日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	NASA Ames Research Center			