

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18640

研究課題名（和文）赤外マルチファイバー技術と先端分光技術の融合で惑星展開を目指す小型赤外分光器開発

研究課題名（英文）Development of compact infrared spectrometer for planets the fusion of infrared multi-fiber and advanced spectroscopy

研究代表者

笠羽 康正（Kasaba, Yasumasa）

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：10295529

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：赤外ファイバー技術を多様な需要に対応できる複数赤外分光技術と結合させ、宇宙機・飛翔体搭載にも耐えうる、自由度の高い小型・高安定・高耐久の赤外計測器の基盤技術を実現した。この成果は、大気・地質・生命物質の情報を多く含むこの波長域で、リソースが極めて限定される着陸機・ローバーや気球・航空機・ドローン等を含む、未来の「可搬型探査」に破壊的なブレークスルーをもたらす。急激に小型化が進む3つの赤外分光技術、レーザー分光・ヘテロダイン分光・フーリエ分光技術と結合し、多様な波長範囲・分解能要求に対応したバックエンド側分光手段の選択枝を包含可能できる、次世代赤外分光の技術基盤として確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

赤外ファイバー技術を多様な需要に対応できる複数赤外分光技術と結合させ、宇宙機・飛翔体搭載にも耐えうる、自由度の高い小型・高安定・高耐久の赤外計測器の基盤技術を実現した。この成果は、大気・地質・生命物質の情報を多く含むこの波長域で、リソースが極めて限定される着陸機・ローバーや気球・航空機・ドローン等を含む、未来の「可搬型探査」に破壊的なブレークスルーをもたらす。急激に小型化が進む3つの赤外分光技術、レーザー分光・ヘテロダイン分光・フーリエ分光技術と結合し、多様な波長範囲・分解能要求に対応したバックエンド側分光手段の選択枝を包含可能できる、次世代赤外分光の技術基盤として確立した。

研究成果の概要（英文）：By combining infrared fiber technology with multiple spectroscopy technology that can respond to diverse demands, we have realized the basic technology for compact, highly stable, and durable infrared measurement instruments with a high degree of freedom that can be used on spacecraft and flying vehicles. This achievement could lead to a disruptive breakthrough in future "portable exploration" involving landers, rovers, balloons, aircraft, drones, etc., which have extremely limited resources in this wavelength region, which contains much information on the atmosphere, geology, and living materials. Combined with three rapidly miniaturizing infrared spectroscopy technologies, laser spectroscopy, heterodyne spectroscopy, and Fourier spectroscopy, this technology has been established as a technological foundation for next-generation infrared spectroscopy that can include a selection of back-end spectroscopy methods to meet a variety of wavelength ranges and resolution requirements.

研究分野：太陽系電波赤外線科学

キーワード：赤外ファイバー 赤外分光 レーザー分光 ヘテロダイン分光 フーリエ分光

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究は「赤外線ファイバーオプティクスを援用した次世代分光技術開発」を目指したものである。可視光域で先行したファイバーオプティクスは、光学系の簡素化・低コスト化・安定化・運用性向上により、物質・分子の吸収帯を大量に含む赤外域で革新を生みうる。

本研究開始以前、東北大・理チーム (笠羽・中川ら) は、地球・惑星大気の O_3 ・ CH_4 ・ H_2O 等の追跡を目指した可視ファイバー分光装置や赤外ヘテロダイン分光器、JAXA 火星衛星探査機 MMX の近赤外分光撮像装置開発などを進めてきた。名大・環境チーム (平原ら) は、国内初の高分散中間赤外グレーティング分光器を実働させ、また宇宙赤外線望遠鏡用の高分散赤外分光器開発を行ってきた。また、両者共同でフーリエ分光器の小型化と性能の両立検討を行っていた。

2. 研究の目的

折しも、連携する東北大・医工+富山大・工チーム (松浦・片桐ら) が、中間赤外域 (MIR: 波長 $5\text{-}20\ \mu\text{m}$) で中空赤外ファイバーの開発に成功した。中空チューブの内側面を銀コーティングして赤外光を反射し高効率伝送 ($0.5\ \text{dB/m}$ 以下) を実現したもので、芯材特性に依存せず広波長に適用可能である。医工分野では無侵襲診断やレーザー治療等で応用されつつある。

この赤外ファイバーを多様な分光技術と結合し、将来の宇宙機・飛翔体搭載も念頭に自由度の高い小型・高安定・高耐久の赤外分光器を目指した基盤技術の形成を行った。レーザー/ヘテロダイン分光器・フーリエ分光器・グレーティング分光器への援用により、具体的な試験機による実証開発を目指した。リソースが限定される着陸機・ローバーや気球・航空機・ドローン等を含む、未来の小型・可搬型探査にブレークスルーをもたらしうることを期待する。

3. 研究の方法

(1) 赤外線ファイバーの光路結合・分割技術の開発 (東北大) : 東北大・理チームが中間赤外線中空ファイバーを開発する連携研究者する東北大・医工+富山大・工チームの支援を得て行った。まず、柔軟で高効率な複数ファイバーの光路結合・分割技術の実現を図った。中空ファイバーは、芯素材が存在しないため熔融法を援用したファイバー結合・分割は行えない。このため「光混合・分波」は数-10 数 cm 長の直方体導波路によって分割・結合する方式を目指した。

(2) 赤外線ファイバーオプティクスの分光システムへの適用検討 : 要求されうる多様な波長範囲・分解能に応じた複数の分光手段への適用を目指し、以下の実証開発を行った。

*レーザー分光・レーザーヘテロダイン分光 (東北大・理) : 前者は、ファイバを介して波長可変レーザーを照明光として導入し、その反射光を得る。分光素子が不要で、惑星表層・地下の地質・水痕跡探索等や医用応用 (東北大・医工と連携) 等とも連なる。また、高輝度のレーザーパルス照射して揮発するガスを分光する「破壊 IR 分析」も応用となりえる。後者は、波長可変レーザー光を信号源光に重畳した「混合光」を受信し、そのビート信号から超高波長分解能 ($\lambda/d\lambda \sim 10^6\text{-}7$) を得る方式 (電波技術の応用) である。両者とも波長可変の赤外線レーザーと赤外線ファイバーとの結合が鍵である。光学的により難しい後者でこの実現を目指した。

*フーリエ分光 (全メンバー) : 香川大 (石丸ら) が開発したフーリエ撮像分光器は、ピエゾ素子を用いた 10cm ・数 kg 程度の小型器である。これをベースとして導入部をファイバー技術と結合し、また真空動作も可能で広波長をカバーする赤外分光撮像装置の実現を目指した。

*グレーティング分光 (名大・環境) : 高屈折率物質によるイマージョングレーティングは、小さ

い光学系でも大きな波長分散が得られる。ファイバー技術との将来結合を目指してこの実現に向けた開発も目指した。

4. 研究成果

3年間の開発で、赤外ファイバー技術をレーザー分光・フーリエ分光技術と結合した次世代赤外分光の技術基盤を確立するとともに、グレーティング分光技術開発への援用に着手した。地上観測・各種計測利用が可能な実験室レベルの実証機構築を実現し、また将来の可搬用・宇宙機用の危機実現に必要な技術要素の洗い出しに至ることができた。

(1) 赤外線ファイバーの光路結合・分割技術の開発

「(2) 実証機開発」と連動しつつ、入射角・曲率によるビームプロファイル等の実用上不可欠な基本情報を蓄積した。中空ファイバー開発を進める共同研究先の富山大訪問が必須だが、COVID制約が緩和された2022年夏にこれも可能となり、ファイバー光学系の開発方向を確立できた。

*中空光ファイバの特性評価：2021年度には、光の入射条件に依存する中空光ファイバの適切な特性評価を行う光学系を確立した。光の入射条件に依存する中空光ファイバの適切な特性評価を行う光学系を確立し、10 μm CO₂ レーザー と 9.6 μm 量子カスケードレーザーを結合効率90%以上で中空光ファイバーに入射でき、また85%/mの高効率伝送を確認した。また、インコヒーレントな自然光による伝送効率を初めて確認した。インコヒーレントな太陽光でも89.6%/mの伝送効率を初めて確かめた [講演：塚田+ 2021 他]。2022-3年度には、特性評価光学系を維持発展させ、実証機想定光学系におけるコヒーレントなレーザー光およびインコヒーレントな黒体・太陽光による伝送効率の実証確認を実施し、講演 [塚田+ 2022] および査読論文 [Nakagawa+ 2023 <https://doi.org/10.1364/AO.475426>] で結果をまとめて公表した。

*中空ファイバーバンドル開発：2021-2年度には、ファイバー端面に配するシーリングとリフォーカスに用いる赤外透過型マイクロレンズアレイとの結合に取り組んだ。非球面平凸レンズアレイ (1mm ϕ \times 10) により、シース材料が不要で近接配置可能な2次元バンドルHCWの試作・性能評価を可能とし、シース材料が不要で近接配置可能な2次元バンドルHCWの試作・性能評価を実現させた。

(2) 赤外線ファイバーオプティクスの分光システムへの適用検討

* レーザー分光・レーザーヘテロダイン分光

2021-2年度には、中空光ファイバを用いたファイバカプラを組み込んで、レーザー光の導入とそのヘテロダイン分光に成功を収めた。本システムは、CO₂ レーザーを用いたもので、中空ファイバカプラによって自然光との混合を行うものである (図1)。この「フルファイバー光学系」のレーザーヘテロダイン分光の信号取得効率を評価し、ミラーを多用し大型・複雑となっていた従来光学系と同等のシステム雑音温度 (10 μm でショット雑音限界に迫る約3,000 K) を確認した。この「ファイバー混合器」+「ファイバー」の基本機能の実証結果は、講演 [塚田+ 2022] および査読論文 [Nakagawa+ 2023 <https://doi.org/10.1364/AO.475426>] で公表した (図1)。これを基礎に、ミラーを多用し大型・複雑となっていた従来光学系から離れ、小型・高効率・高安定化を図りうる実用的なファイバー分光系を持つ小型中間赤外分光器の設計を行った。

2022年度末から2023年度には、光学・電子部品を調達してこの組立を実施した。太陽光を用いた地球大気分光観測を試みるとともに、地上望遠鏡への装着が可能な試験機を構築し、仙台市天文台の協力を得て2023年夏には金星大気の試験観測により問題点を洗い出すとともに、2024

年の火星大気分光観測による性能実証を行う直前に至っている。これらを併せて、講演 [大畑+ 2023, 2024] で成果報告を行った。

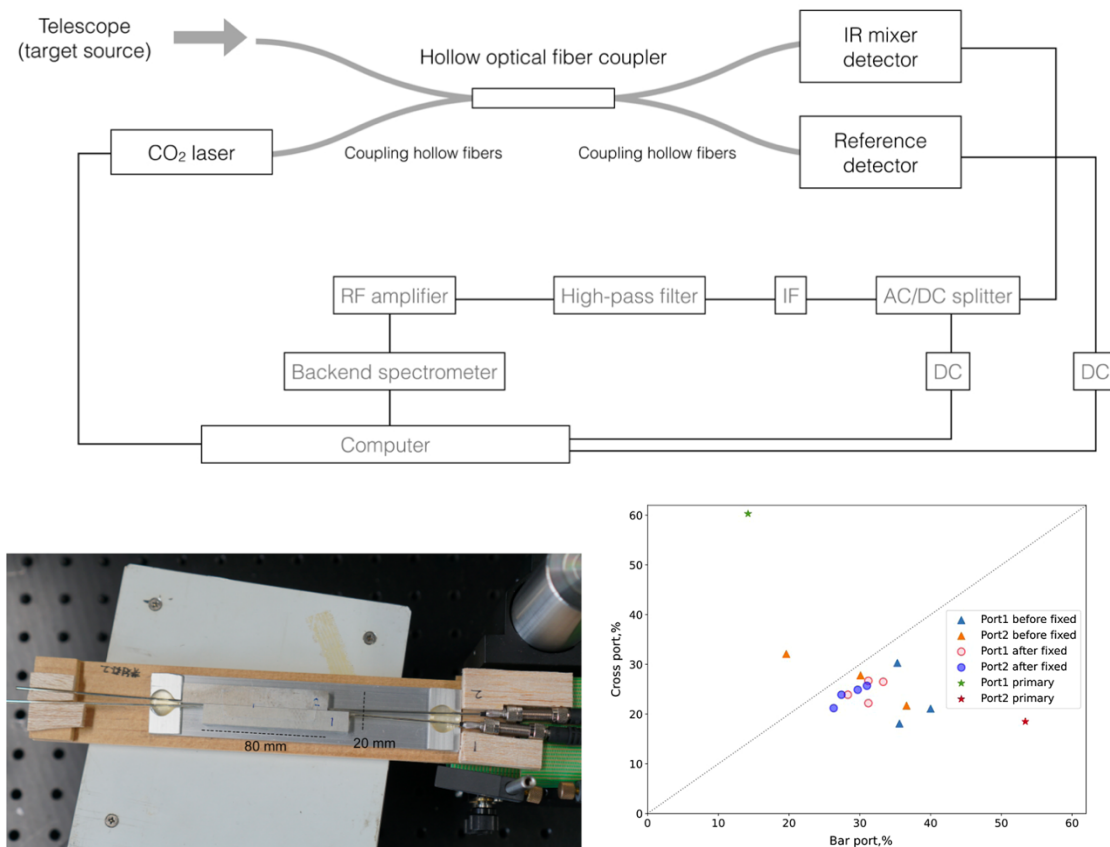


図 1. ファイバー光学系によるレーザー分光システム。(上) 基本構成。(下左) 富山大開発の中空ファイバー赤外光混合・分波器。(下右) 本混合・分波器の性能評価結果。[Nakagawa+ 2023 <https://doi.org/10.1364/A0.475426>]

* フーリエ/グレーティング分光

2021 年度には、名大科研費との合算も得て初動に要するハードウェア（ミニフーリエ制御ユニット）および制御ソフトウェアを導入した。まずその性能評価を行い、さらにファイバーと専用 Ge レンズを介して結合した中間赤外線ファイバー分光器を開発した。波長分解能 $R \sim 100$ ($\lambda = 8 \mu\text{m}$)、空間分解能 $\sim 0.1 \text{ mm}$ でのスペクトルイメージングを $7\text{--}13 \mu\text{m}$ （メーカー保証上限を越える）で可能であることを確認した。光学材料計測等への応用も行い、査読論文 [Maejima+ 2022 <https://doi.org/10.1007/s11664-021-09361-1>] と講演 [根岸+ 2022] で報告を行った。

2022 年度には、ハードウェア（波面分割型位相シフト干渉計ユニット）およびイメージングスペクトル解析ソフトウェアの評価と改良を本機器の製造メーカー（日進機械）からの支援も得つつ進め、講演 [根岸+ 2022; 趙+ 2022] でその結果をまとめた。また応用として、真空中での低温環境計測を要する太陽系氷衛星表層を覆う模擬物質の分光、および将来赤外線宇宙望遠鏡に要する中間赤外線透過光学部材の二次元分光撮像評価の試行にも着手し、講演 [根岸+ 2022; 古賀+ 2023] で報告した。

2023 年度には、さらにハードウェア・ソフトウェアの評価・改修を進め、外惑星想定の低温環境下におけるエチレン・ SO_2 ・ N_2O 等固体の赤外スペクトル測定を実現し、査読論文 [Koga+ 2023 <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01976-y>]; Ito+ 2023 <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2023.140742>] および学会講演 [根岸+, 2023; 高間+,

2024] で成果をまとめた。さらに、将来の宇宙展開も見越してより広帯域で感度を有するポロメータアレイと真空動作可能なピエゾアクチュエータを導入して、より広い波長範囲 ($4\sim 18\ \mu\text{m}$) でのイメージングスペクトルが取得可能な、特注自由曲面鏡 2 つを用いた分光系の設計・製作を行い、その成果を講演 [趙+ 2024] で報告した。

更に、ファイバー系と結合させてその小型化に寄与する波長 $10\text{--}20\ \mu\text{m}$ の高分散グレーティング候補材料 [Ito+ 2022 <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.2.025004>] の極低温光学特性 (吸収係数および屈折率) の精密測定を実施した。具体的には、CdZnTe イメージンググレーティングの波長 $10\text{--}19\ \mu\text{m}$ での屈折率の精密測定を実現するため、既存分光計の光源部と検出器部に中空ファイバを用いた新光学系を設計・製作した。従来にない精度での屈折率測定法を実現させ、学会講演 [榎木谷+, 2023, 2024; 生駒+, 2024] で成果報告を行った。

今後も、実用機開発に要する技術要素の洗い出しを進める。特に、耐環境性 (特に耐振動・材料)、材料・設計の透明性 (特に電気設計)、オンボードデータ処理性 (特にフーリエ分光器: $>100\text{MB}/\text{scan}$ の大量データの高速処理が必須)、小型化・軽量化、および省電力性 ($<10\text{W}$) の実現が実機には必要となる。また、急速に進む国際月・火星探査、特にその大気・表層・地下の将来直接探査への貢献を直接目標としている。また、多様な民生用途 (ガス・固体・生体計測等) への展開が可能な技術であり、連携する工学研究者群と共に有意義な共同研究を続けたい。

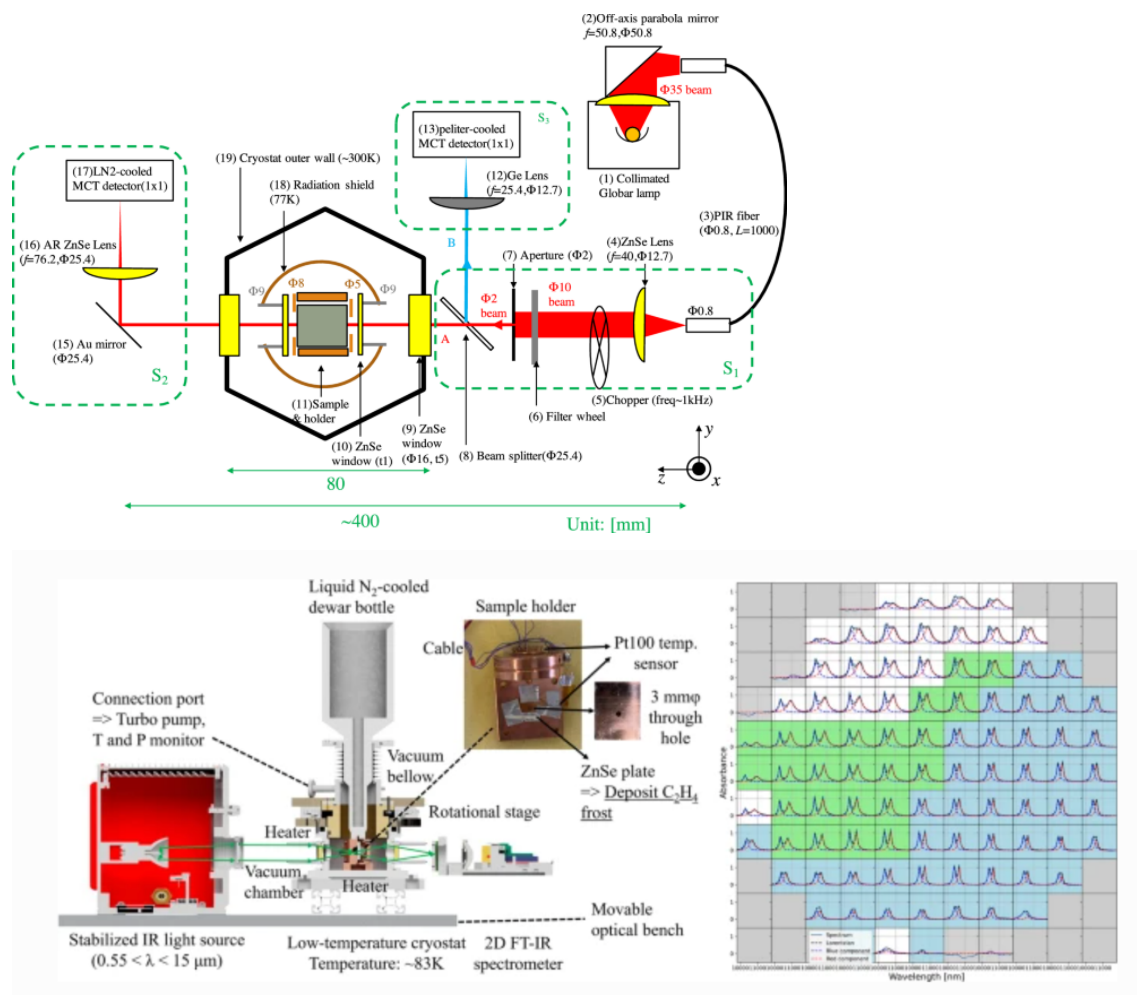


図 2. ファイバーフーリエ分光系とそれを活用した成果。(上) 基本構成 [Maejima+ 2022 <https://doi.org/10.1007/s11664-021-09361-1>] (下) C_2H_4 の低温中間赤外分光撮像結果 [Koga+ 2023 <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01976-y>]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nakagawa Hiromu, Tsukada Satoki, Katagiri Takashi, Kasaba Yasumasa, Murata Isao, Hirahara Yasuhiro, Matsuura Yuji, Yamazaki Atsushi	4. 巻 62
2. 論文標題 Mid-infrared laser heterodyne spectrometer by hollow optical fiber and its newly designed coupler	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 A31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.475426	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 Itoh Satoshi, Ishihara Daisuke, Wada Takehiko, Nakagawa Takao, Oyabu Shinki, Kaneda Hidehiro, Hirahara Yasuhiro, consortium the SMI	4. 巻 8
2. 論文標題 Simulations of the spectral resolving power of a compact space-borne immersion-echelle spectrometer using mid-infrared wave tracing	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 25004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/1.JATIS.8.2.025004	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 Maeshima Hiroshi, Matsumoto Kosei, Hirahara Yasuhiro, Nakagawa Takao, Koga Ryoichi, Hanamura Yusuke, Wada Takehiko, Nagase Koichi, Oyabu Shinki, Suzuki Toyoaki, Kokusho Takuma, Kaneda Hidehiro, Ishikawa Daichi	4. 巻 51
2. 論文標題 Infrared Absorption and Its Sources of CdZnTe at Cryogenic Temperature	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 564 ~ 576
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11664-021-09361-1	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 Ito Fumiyuki, Koga Ryoichi, Negishi Shohei, Hirahara Yasuhiro	4. 巻 829
2. 論文標題 UV irradiation and infrared observation of sulfur dioxide clusters and solids at cryogenic temperature	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 140742 ~ 140742
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cpllett.2023.140742	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 Koga Ryoichi, Negishi Shohei, Zhao Biao, Li Yuan, Ito Fumiya, Kasaba Yasumasa, Hirahara Yasuhiro	4. 巻 76
2. 論文標題 Mid-infrared imaging spectroscopic measurements of C2H4 frost simulating the outer solar system environments	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-024-01976-y	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 -

[学会発表] 計26件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 古賀亮一, 根岸昌平, 李源, 趙彪, 伊藤文之, 今井正亮, 笠羽康正, 平原靖大
2. 発表標題 外惑星環境を模擬したSO2とC2H4の凝縮実験及びin-situ中間赤外イメージング分光測定
3. 学会等名 第24回惑星圏研究会 (SPS2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 根岸 昌平、古賀 亮一、趙 彪、平原 靖大、李 源、伊藤 文之、笠羽 康正
2. 発表標題 木星衛星イオの表面環境を模擬した低温 SO2霜の赤外分光イメージング
3. 学会等名 日本惑星科学会 2022年秋季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 趙彪, 古賀亮一, 平原靖大, 根岸昌平, 李源, 伊藤文之, 笠羽康正, 松原英雄
2. 発表標題 遠赤外線 2次元フーリエ分光器(2D FT-FIR)光学系の開発
3. 学会等名 天文学会 2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 根岸 昌平、古賀 亮一、趙 彪、平原 靖大、李 源、伊藤 文之、笠羽 康正、山崎 敦
2. 発表標題 イオ表面環境を模擬した低温SO ₂ 霜の2D FT-MIR分光装置の開発
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中空光ファイバを用いた惑星探査用中間赤外レーザーヘテロダイン分光器の開発
2. 発表標題 塚田 悟輝、中川 広務、村田 功、平原 靖大、笠羽 康正、片桐 崇史、松浦 祐司、山崎 敦
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塚田 悟輝、中川広務、村田功、平原靖大、笠羽康正、片桐崇史、松浦祐司、宮本明歩、山崎敦
2. 発表標題 中空光ファイバを用いた太陽系内探査用中間赤外レーザーヘテロダイン分光器の開発
3. 学会等名 惑星科学会 2021年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 塚田悟輝、中川広務、村田功、平原靖大、笠羽康正、片桐崇史、松浦祐司、山崎敦、宮本明歩
2. 発表標題 中空光ファイバを用いた惑星探査用中間赤外レーザーヘテロダイン分光器の開発
3. 学会等名 惑星圏シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 根岸昌平, 古賀亮一, 趙彪, 平原靖大, 李源, 伊藤文之, 笠羽康正, 山崎敦
2. 発表標題 イオ表面環境を模擬した低温SO ₂ 微粒子の2D FT-MidIR分光装置の開発
3. 学会等名 惑星圏シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Negishi, S., R. Koga, B. Zhao, Y. Hirahara, Y. Li, F. Ito, Y. Kasaba
2. 発表標題 Mid-infrared imaging spectroscopy of solid SO ₂ simulating the environment of Jupiter's moon Io
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ohata, H., H. Nakagawa, T. Katagiri, Y. Kasaba, I. Murata, Y. Hirahara, Y. Matsuura, A. Yamazaki
2. 発表標題 Development of mid-IR heterodyne spectrometer with fibers and a fiber coupler for the observation of planetary atmospheres
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 古賀亮一, 根岸昌平, 趙彪, 李源, 伊藤文之, 今井正堯, 笠羽康正, 平原靖大
2. 発表標題 外惑星環境を模擬したSO ₂ とC ₂ H ₄ 霜の紫外線照射実験及び中間赤外イメージング測定
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中川貴雄, 松原英雄, 鈴木仁研, 榎木谷海, 平原靖大, 古賀亮一, 李源, 趙彪, 根岸昌平, 金田英宏, 和田武彦, 中岡俊裕, 細島拓也, 海老塚昇, 山形豊, 野津翔太, 野村英子
2. 発表標題 GREX-PLUS中間赤外線高分散分光器: イメージョン・グレーティングの開発
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 李源, 古賀亮一, 趙彪, 高間大輝, 平原靖大, 榎木谷海, 松原英雄, 中川貴雄, 和田武彦
2. 発表標題 GREX-PLUS中間赤外線高分散分光器: イメージョン・グレーティング材料の透過率の精密測定
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 趙彪, 古賀亮一, 平原靖大, 根岸昌平, 李源, 高間大輝, 伊藤文之, 笠羽康正, 中川貴雄, 榎木谷海, 松原英雄, 和田武彦
2. 発表標題 GREX-PLUS中間赤外線高分散分光器: イメージョン・グレーティング材料の光学特性評価のための2DFT-IR分光器の開発
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 榎木谷海, 松原英雄, 中川貴雄, 平原靖大, 古賀亮一, 李源, 高間大輝, 和田武彦, 山口遼大, 田中颯
2. 発表標題 GREX-PLUS中間赤外線高分散分光器: イメージョン・グレーティング材料の極低温・中間赤外線屈折率測定装置の開発
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 細島拓也, 海老塚昇, 山形豊, 中川貴雄, 松原英雄, 榎木谷海, 李源, 平原靖大, 井上昭雄
2. 発表標題 GREX-PLUS中間赤外線高分散分光器: CdZnTeイメージョン・グレーティングの加工法の検討
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大畑 元, 中川 広務, 笠羽 康正, 村田 功, 片桐 崇史, 平原 靖大, 松浦 祐司, 山崎 敦
2. 発表標題 ファイバーとファイバーカップラーを用いた惑星大気観測用中間赤外ヘテロダイン分光器の開発
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会2023年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 根岸昌平, 古賀亮一, 趙彪, 李源, 高間大輝, 平原靖大, 伊藤文之, 笠羽康正
2. 発表標題 中間赤外分光イメージングによる木星衛星イオ環境を模擬した低温二酸化硫黄固体の変性実験
3. 学会等名 日本惑星科学会 2023 年秋季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 根岸昌平, 古賀亮一, 趙 彪, 李源, 高間大輝, 平原靖大, 伊藤文之, 笠羽康正
2. 発表標題 木星衛星イオ環境を模擬した低温二酸化硫黄固体の変性と中間赤外線分光イメージング測定
3. 学会等名 第23回分子分光研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤文之, 根岸昌平, 古賀亮一, 平原靖大
2. 発表標題 極低温でのSO ₂ 固体への紫外光照射実験と赤外測定 (2) 計算化学的アプローチ
3. 学会等名 第23回分子分光研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大畑元, 中川広務, 笠羽康正, 村田功, 片桐崇史, 松浦祐司, 平原靖大, 山崎
2. 発表標題 ファイバとファイバカプラを用いた惑星大気観測用中間赤外ヘテロダイン分光器の開発
3. 学会等名 惑星圏シンポジウム2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高間大輝, 古賀亮一, 根岸昌平, 平原靖大, 笹子宏史, 李源, 趙彪, 伊藤文之
2. 発表標題 太陽系外縁天体環境を想定したN ₂ O低温固体の中間赤外線イメージング分光
3. 学会等名 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 李源, 古賀亮一, 平原靖大, 榎木谷海, 松原英雄, 中川貴雄, 和田武彦
2. 発表標題 GREX-PLUS中間赤外線高分散分光器: 中間赤外線用イマージョン・グレーティング材料の極低温中間赤外線透過率測定装置の開発
3. 学会等名 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 生駒開, 平原靖大, 笹子宏史, 李源, 趙彪, 古賀亮一, 中川貴雄, 榎木谷海, 松原英雄
2. 発表標題 GREX-PLUS 中間赤外線高分散分光器: イメージョン・グレーティングの特性評価のための量子カスケードレーザーの開発
3. 学会等名 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 趙彪, 古賀亮一, 平原靖大, 笹子宏史, 根岸昌平, 李源, 笠羽康正, 中川貴雄, 松原英雄, 榎木谷海, 和田武彦
2. 発表標題 イメージョン・グレーティング材料の屈折率評価用の2DFT-IR分光器の開発
3. 学会等名 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 榎木谷海, 松原英雄, 中川貴雄, 平原靖大, 古賀亮一, 李源, 趙彪, 生駒開, 高間大輝, 笹子宏史, 和田武
2. 発表標題 GREX-PLUS中間赤外線高分散分光器: 中間赤外線用イメージョン・グレーティング材料の極低温中間赤外線屈折率測定装置の開発
3. 学会等名 日本天文学会2024年春季年会
4. 発表年 2024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	平原 靖大 (Hirahara Yasuhiro) (30252224)	名古屋大学・環境学研究科・准教授 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	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	中川 広務 (Nakagawa Hiromu) (30463772)	東北大学・理学研究科・准教授 (11301)	

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