

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2018～2022

課題番号：18KK0083

研究課題名（和文）インフレーション探索に向けた半波長板変調式超電導転移端偏光計望遠鏡の開発

研究課題名（英文）Development of the HWP polarimeter with a TES detector for inflationary probe

研究代表者

松村 知岳（Matsumura, Tomotake）

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・准教授

研究者番号：70625003

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：インフレーション探索に向け国際共同研究（米、仏、伊、独）により精密CMB偏光観測への研究を行った。具体的には遠赤外線偏光望遠鏡気球実験PILOTへの参加、精密偏光観測の鍵となる偏光変調器の開発、要素技術のレーザー微細加工によるモスアイ反射防止構造を用いたアルミナ赤外線吸収フィルターを米国Greenbank望遠鏡MUSTANG2レシーバーへの提供、TESボロメータの評価試験、シミュレーションを用いた偏光角度の較正の実現性、そしてその精度のインフレーション探索に対する評価影響を実施した。研究期間途中にはコロナ禍の影響にて当初の国際共同研究計画から変更を余儀なくされたが十分な研究成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は宇宙の始まりにあったとするインフレーション仮説の検証に向けた一歩であり、その発見また上限の更新に向けた開発は教科書を塗りかえる成果への礎である。技術的には特に本研究で作製したアルミナ赤外線吸収フィルターは、微細加工面積として世界一の大面積を実現し、また世界で初めて観測に用いたという点でアイデアが実現化された大きなマイルストーンとなった。社会的には、ミリ波技術はBeyond5Gに対応する帯域であることから反射防止加工技術や評価方法など、開発したさまざまな成果が産業応用も考えられるために意義深い。

研究成果の概要（英文）：We carry out research with international partners (the US, France, Italy, and Germany) to probe the inflationary universe using cosmic microwave background (CMB) polarization measurements. Specifically, we listed four achievements: 1) participating French/CNES-led far-infrared balloon-borne telescope, PILOT, launched from Timmins in Canada, 2) development of a polarization modulator, including delivering a laser-machined moth-eye structure-based alumina filter to the MUSTANG2 receiver on Greenbank telescope as a byproduct from this development, 3) noise characterization of TES bolometer, and 4) simulation-based angle calibration feasibility study using blind analysis. Although we face COVID-19 and need to change international collaboration on a best-effort basis, we could establish the foundation of international collaboration that can last beyond this proposal term with the list of achievements above.

研究分野：実験・観測的宇宙論

キーワード：偏光 ミリ波 宇宙論 インフレーション 反射防止 変調器 角度較正 TESボロメータ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

欧州衛星 Planck の観測が終了し、その観測成果から宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background=CMB) 観測による標準宇宙論がさらなる精度で確立された。同時に、精密 CMB 偏光観測によるインフレーション探索に向けた観測・装置開発・解析方法の研究が進んでいた。インフレーションのエネルギースケールの指標であるテンソル・スカラー比は BICEP / Keck の観測が 0.07 (95% C.L.) の上限を与えていた。特に、観測における挑戦的課題として CMB と我々が住む銀河系内からの偏光放射 (前景放射) を区別することの重要性が認識されており、それに伴う広帯域観測への準備 (単一望遠鏡による観測の広帯域化、また複数の観測計画の組み合わせによる広帯域化) が加速した。

### 2. 研究の目的

本研究はインフレーション探索に向け国際共同研究により精密 CMB 偏光観測のための実験・装置開発を行う。具体的には、気球を用いたダスト偏光観測、ミリ波望遠鏡光学素子の広帯域化、そして将来観測の鍵となる偏光変調器と超伝導転移端検出器 (Transition Edge Sensor=TES) の性能評価を実現する。これにより、次世代のインフレーション探索のための要素技術を国際共同研究を通して確立する。

### 3. 研究の方法

当初想定していた研究方法は、2019 年から 2022 年までの 3 年コロナの影響で大幅な研究方法の変更が必要となった。結果としてリモート環境でも進められる以下の 4 つの研究テーマを定義し、並行して進めた。

1. 遠赤外線偏光望遠鏡気球実験 PILOT への参加 (フランスとの共同研究)
2. 精密偏光観測の鍵となる偏光変調器の開発 (米国との共同研究)
3. TES ボローメータの評価試験 (米国との共同研究)
4. シミュレーションを用いて、偏光角度の較正の実現性、そしてその精度のインフレーションに対する評価影響 (フランス、イタリア、ドイツとの共同研究)

### 4. 研究成果

上記 4 つのテーマの研究成果を以下に示す。

#### 1. 遠赤外線偏光望遠鏡気球実験 PILOT への参加 (フランスとの共同研究)

遠赤外線偏光望遠鏡気球実験 PILOT は 3 度目の観測カナダオンタリオ州 Timmins にてフランス宇宙局 (CNES) とカナダ宇宙局 (CSA) の協力により打ち上げキャンペーンを行った。打ち上げは 2019 年 9 月 24 日早朝で、要求を満たす約 1 日の飛翔により観測を行った。日本からは 3 度目のフライトより PILOT に参画し、研究代表者、Stever 研究員、小松、杉山 (大学院生 2 名) が打ち上げに参加し、フライト中のデータ解析を担当した。その成果の一部として観測性能は "Performance of the polarization leakage correction in the PILOT data", Bernard et al. (2023) として査読付き論文として発表した。科学性能については現在データ解析が進行中である。



図 1 2019 年の気球放球時。

## 2. 精密偏光観測の鍵となる偏光変調器の開発（米国との共同研究）

偏光変調器は半波長板（サファイア）と低温連続回転機構から構成されており、次世代 CMB 観測において、系統誤差や検出器システムが生み出す  $1/f$  ノイズの影響を最小化するための鍵となる装置である。特に、将来衛星計画 LiteBIRD の偏光変調器の仕様（広帯域化、省電力化、軽量化など）はこれまでにない挑戦的なものであり、この仕様を想定して開発を推進した。これらの開発は Sakurai et al. (2019), Komatsu et al. (2021), Sugiyama et al. (2022) にまとめた。特に本計画では、特に誰も実現したことがないサファイア半波長板の広帯域を実現すべくレーザー加工を用いたモスアイ微細加工、そして多層サファイアを用いてその仕様実現の実証を行った。これらの成果は Takaku et al. (2020, 2022) として論文として発表した。また、同時に将来計画のためだけではなく、開発したレーザーを用いたモスアイ反射防止構造を現行の観測に適応すべく、米国 Greenbank 望遠鏡 MUSTANG 2 レシーパーに搭載するアルミナを用いた赤外線吸収フィルターを作製した。これは、世界で初めてレーザー加工を用いたモスアイ反射防止構造を有するミリ波低温光学素子の観測搭載を実現した例となった。この成果は Takaku et al. (2021) として査読付き論文として発表した。また、[プレスリリース](#)としてその成果を広く公表した。

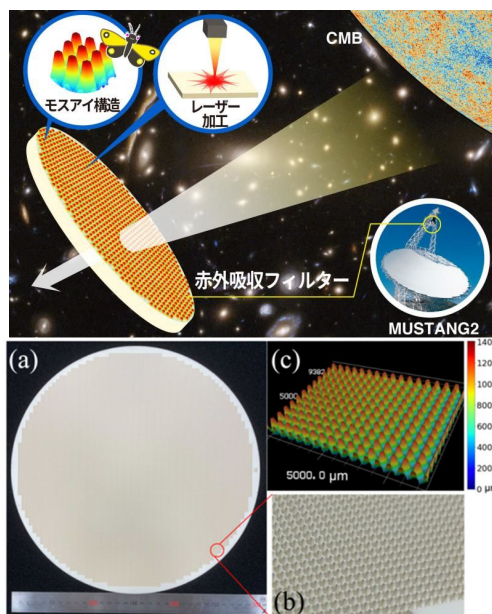


図 2（上）レーザー加工による反射防止微細構造の概念図。（下）作製したアルミナ赤外線吸収フィルター。

## 3. TES ボロメータの評価試験（米国との共同研究）

TES ボロメータは精密偏光観測の実現に必須の検出器である。米国と共同研究により TES ボロメータの作製は米国が担当し、評価を本研究テーマの枠内で進めた。評価項目は検出器ノイズと時定数、また特に外部磁場による影響に注力した。これは、これまであまり着目されていなかった部分であるが、将来観測に向けた観測装置として用いる偏光変調器や断熱消磁冷凍機は磁場源を持つために、外部磁場による影響評価は必須である。東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構にて断熱消磁冷凍機を搭載したクライオスタットにて 100mK に冷却した TES ボロメータに対して、ヘリウムホルツコイルで生成した外部磁場を印加することで磁場に対する感度を評価した。この成果は Ghigna et al. (2023) として査読付き論文に投稿した（査読中）。さらに、外部磁場を含めた外的影響のより検出器システムのゲインの変化をモデルを構築することにより精密な評価を行い、Ghigna et al. (2023) として発表した。

## 4. シミュレーションを用いて、偏光角度の較正の実現性、そしてその精度のインフレーションに対する評価影響（フランス、イタリア、ドイツとの共同研究）

精密な偏光観測の実現には観測装置と解析方法が相補的かつ包括的に扱われることで実験の最適化を行うことが重要である。精密偏光観測の限るなる系統誤差の一つに偏光角度の精密な再構築がある。観測装置の角度再構成精度の不定性を加味した装置モデルを元に観測を模擬するシミュレーションデータを生成し、このデータを解析過程で構成しテンソル・スカラー比を再構築できるか検討した。観測装置の角度再構成精度の不定性の情報は解析チームに秘匿し行った結果、2 つの独立したチームが正しい偏光角度およびテンソル・スカラー比を再構築した。この結果は Krachmalnicoff et al. (2022) として査読付き論文として発表した。

研究期間途中にはコロナ禍による国際共同研究の難しさはあったものの、こうした結果から十分な研究成果が得られた。そして、今後さらにインフレーション仮説の検証に向けた CMB 精密偏光観測を実現するため、観測、装置開発、シミュレーション・データ解析において国際共同研究を続ける土台を築くことができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Takaku Ryota, Wen Qi, Cray Scott, Devlin Mark, Dicker Simon, Hanany Shaul, Hasebe Takashi, Iida Teruhito, Katayama Nobuhiko, Konishi Kuniaki, Kuwata-Gonokami Makoto, Matsumura Tomotake, Mio Norikatsu, Sakurai Haruyuki, Sakurai Yuki, Yamada Ryohei, Yumoto Junji	4. 巻 29
2. 論文標題 Large diameter millimeter-wave low-pass filter made of alumina with laser ablated anti-reflection coating	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 41745 ~ 41745
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.444848	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 Komatsu Kunimoto, Ishino Hirokazu, Katayama Nobuhiko, Matsumura Tomotake, Sakurai Yuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Design of a frequency-independent optic axis Pancharatnam-based achromatic half-wave plate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.7.3.034005	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 Wen Qi, Fadeeva Elena, Hanany Shaul, Koch Juergen, Matsumura Tomotake, Takaku Ryota, Young Karl	4. 巻 142
2. 論文標題 Picosecond laser ablation of millimeter-wave subwavelength structures on alumina and sapphire	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics & Laser Technology	6. 最初と最後の頁 107207 ~ 107207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optlastec.2021.107207	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 Sakurai Y., Matsumura T., Katayama N., Komatsu K., Takaku R., Sugiyama S., Nomura Y., Toda T., Ghigna T., Iida T., Sugai H., Imada H., Hazumi M., Ishino H., Ohsaki H., Terao Y., Enokida H., Ishida Y., Iwata Y., Jamil D., Konishi K., Sakurai H., Yumoto J., Kuwata-Gonokami M., Kusaka A., Hill C.	4. 巻 -
2. 論文標題 Breadboard model of polarization modulator unit based on a continuously rotating half-wave plate for the low-frequency telescope of the LiteBIRD space mission	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11453, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X, 114534E	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560289	査読の有無 無
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 Toda Takayuki, Ishino Hirokazu, Komatsu Kunimoto, Matsumura Tomotake, Sakurai Yuki, Katayama Nobuhiko	4. 巻 -
2. 論文標題 Mechanical strength and millimeter-wave transmission spectrum of stacked sapphire plates bonded by sodium silicate solution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11453, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X, 114534K	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562366	査読の有無 無
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 Takaku Ryota, Hanany Shaul, Hoshino Yurika, Imada Hiroaki, Ishino Hirokazu, Katayama Nobuhiko, Komatsu Kunimoto, Konishi Kuniaki, Kuwata Gonokami Makoto, Matsumura Tomotake, Mitsuda Kazuhisa, Sakurai Haruyuki, Sakurai Yuki, Wen Qi, Yamasaki Noriko, Young Karl, Yumoto Junji	4. 巻 -
2. 論文標題 Demonstration of anti-reflective structures over a large area for CMB polarization experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11453, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X, 114531A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562028	査読の有無 無
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 Komatsu Kunimoto, Ishino Hirokazu, Kataza Hirokazu, Konishi Kuniaki, Kuwata-Gonokami Makoto, Katayama Nobuhiko, Sugiyama Shinya, Matsumura Tomotake, Sakurai Haruyuki, Sakurai Yuki, Takaku Ryota, Yumoto Junji	4. 巻 -
2. 論文標題 Demonstration of five-layer phase-flat achromatic half-wave plate with anti-reflective structures and superconducting magnetic bearing for CMB polarization experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11453, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X, 114534I	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560486	査読の有無 無
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 Komatsu Kunimoto, Ishino Hirokazu, Katayama Nobuhiko, Matsumura Tomotake, Sakurai Yuki, Takaku Ryota	4. 巻 -
2. 論文標題 Design and demonstration of the frequency independent fast axis of the Pancharatnam base multi-layer half-wave plate for CMB polarization experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11453, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy X, 114534B	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562092	査読の有無 無
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 Sugiyama Shinya, Matsumura Tomotake, Sakurai Yuki, Katayama Nobuhiko, Takakura Satoru, Tashiro Makoto, Terada Yukikatsu, Sato Kosuke, Katsuda Satoru, Hoshino Yurika, Takaku Ryota, Komatsu Kunimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of reconstructed angular error of a continuous rotating HWP for LiteBIRD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11443, Space Telescopes and Instrumentation 2020: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 114436X	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2576290	査読の有無 無
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 Takaku R., Hanany S., Imada H., Ishino H., Katayama N., Komatsu K., Konishi K., Kuwata-Gonokami M., Matsumura T., Mitsuda K., Sakurai H., Sakurai Y., Wen Q., Yamasaki N. Y., Young K., Yumoto J.	4. 巻 128
2. 論文標題 Broadband, millimeter-wave anti-reflective structures on sapphire ablated with femto-second laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 225302 ~ 225302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0022765	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 Ghigna T., Matsumura T., Patanchon G., Ishino H., Hazumi M.	4. 巻 2020
2. 論文標題 Requirements for future CMB satellite missions: photometric and band-pass response calibration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 030 ~ 030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/11/030	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 Qi Wen, Elena Fadeeva, Shaul Hanany, Juergen Koch, Tomotake Matsumura, Ryota Takaku, Karl Young	4. 巻 -
2. 論文標題 Picosecond laser ablation of millimeter-wave subwavelength structures on alumina and sapphire	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics and Laser Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 T. Ghigna, T. Matsumura, M. Hazumi, S. L. Stever, Y. Sakurai, N. Katayama, A. Suzuki, B. Westbrook & A. T. Lee	4. 巻 199
2. 論文標題 Design of a Testbed for the Study of System Interference in Space CMB Polarimetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 622-630
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02359-9	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 Ranajoy Banerji, Guillaume Patanchon, Jacques Delabrouille, Masashi Hazumi, Duc Thuong Hoanga, Hirokazu Ishino and Tomotake Matsumura	4. 巻 2019
2. 論文標題 Bandpass mismatch error for satellite CMB experiments II: correcting for the spurious signal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/07/043	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 Y. Ishida, H. Enokida, D. Ahmad, Y. Terao, H. Ohsaki, Y. Sakurai, H. Sugai, T. Matsumura and N. Katayama	4. 巻 -
2. 論文標題 Modelling the Energy Losses of a Superconducting Magnetic Bearing due to the Change of the Levitation Height Under Gravity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計11件(うち招待講演 2件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Ryota Takaku
2. 発表標題 Evaluation of instrumental polarization of a 200 mm diameter achromatic HWP with anti-reflective structures and impact on TES non-linearity
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Hasebe
2. 発表標題 Modeling of Sensitivity of LiteBIRD
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinya Sugiyama
2. 発表標題 Potential extra noise from a continuously rotating HWP using superconducting magnetic bearing for CMB polarimetry
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tommaso Ghigna
2. 発表標題 Modelling TES non-linearity induced by a rotating HWP in a CMB polarimeter
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryota Takaku
2. 発表標題 Large diameter Millimeter-Wave Low-Pass Filter Made of Alumina with Laser Ablated Anti-reflection Coating
3. 学会等名 16 th international conference of laser ablation (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 松村知岳
2. 発表標題 CMB実験ミリ波光学素子を見据えたセラミック材のミリ波特性評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松村知岳
2. 発表標題 LiteBIRD計画による インフレーション宇宙の探索
3. 学会等名 日本物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松村知岳
2. 発表標題 A far-infrared balloon-borne polarization experiment, PILOT
3. 学会等名 大気球ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ghigna, Tommaso
2. 発表標題 Design of a testbed for the study of system interference in space CMB polarimetry
3. 学会等名 Low Temperature Detector 18 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y Ishida, H Enokida, D Ahmad, Y Terao, H Ohsaki, Y Sakurai, H Sugai, T Matsumura and N Katayama
2. 発表標題 Modelling the Energy Losses of a Superconducting Magnetic Bearing due to the Change of the Levitation Height Under Gravity
3. 学会等名 10th ACASC - 2nd Asian ICMC - CSSJ (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomotake Matsumura, Yuki Sakurai, Hajime Sugai, Nobuhiko Katayama, Yusuke Ishida, Hisashi Enokida, Doa Ahmad, Yutaka Terao, Hiroyuki Ohsaki, Ryota Takaku, Kunimoto Komatsu, Shinya Sugiyama, Yoshiki Nomura, Teruhito Iida, Hirokazu Kataza
2. 発表標題 Requirement and design trade off of the rotational mechanism for polarization modulator using superconducting magnetic bearing for LiteBIRD
3. 学会等名 10th ACASC - 2nd Asian ICMC - CSSJ (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>プレスリリース 超短パルスレーザー加工技術で作製した蛾の目構造を世界で初めて電波望遠鏡に実装 <a href="https://www.ipmu.jp/ja/20220127-MUSTANG2">https://www.ipmu.jp/ja/20220127-MUSTANG2</a></p>
---

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	高倉 理  (Takakura Satoru)  (30811525)	国立研究開発法人国立環境研究所・地球システム領域・特別 研究員    (82101)	

## 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	片山 伸彦  (Katayama Nobuhiko)  (50290854)	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授    (12601)	
研究分担者	櫻井 雄基  (Sakurai Yuki)  (50780847)	岡山大学・自然科学学域・特任助教    (15301)	
研究分担者	石野 宏和  (Ishino Hirokazu)  (90323782)	岡山大学・自然科学学域・教授    (15301)	

	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
研究協力者	小西 邦昭  (Konishi Kuniaki)  (60543072)		
研究協力者	櫻井 治之  (Sakurai Haruyuki)		
研究協力者	櫻井 雄基  (Sakurai Yuki)		
研究協力者	ギーニャ トマソ  (Ghigna Tommaso)		

## 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
研究協力者	小松 国幹  (Komatsu Kunimoto)		
研究協力者	杉山 真也  (Sugiyama Shinya)		
研究協力者	高久 諒太  (Takaku Ryota)		
研究協力者	長谷部 孝  (Hasebe Takashi)		

## 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			
				他1機関
米国	ミネソタ大学	カリフォルニア州立大学	ローレンス・バークレー国立研究所	
ドイツ	ハノーファー・レーザー研究所	マックス・プランク天体物理学研究所		
英国	オックスフォード大学			
フランス	パリ大学	Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS)	IRAP	
イタリア	SISSA			