

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：82645

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20927

研究課題名（和文）空に浮かぶ人工電波源—ドローンを用いた原始重力波探索の高精度化

研究課題名（英文）High-Precision Primordial Gravitational Wave Observation Using Drones

研究代表者

小栗 秀悟（Oguri, Shugo）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：20751176

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、スペイン領テネリフェ島の2つのCMB偏光観測実験GroundBIRDとQUIJOTEに対し、ドローンによる検出器較正を行い、高感度測定を実現することを目指していた。本研究にて、GroundBIRD望遠鏡に新型の焦点面検出器アレイをインストールした。この新型の検出器アレイには、これまでの7倍となる161ピクセルの検出器が搭載されており、マッピング速度が大幅に向上した。また並行して、国内にて、ドローンをプログラム飛行させ、デモンストレーション試験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

GroundBIRD実験は、数少ない日本主導のCMB地上望遠鏡で、本研究においてほぼ完成形に至り、サイエンス観測が開始できたことは非常に大きな成果である。また、国内のデモンストレーション試験により、ドローンを用いたビームマッピングの手法を確立することができた。期間内にテネリフェ島の望遠鏡を用いたドローン評価試験は実現しなかったが、近い将来の評価試験実現に向け、確かな手応えを得た。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed to establish high-sensitivity measurement strategies by calibrating the detectors of two CMB polarization observation experiments, GroundBIRD and QUIJOTE, in Tenerife using drones. During the course of this research, a new focal plane detector array was installed on the GroundBIRD telescope. This new detector array is equipped with 161 pixels, seven times more than the previous array, significantly improving the mapping speed. Additionally, demonstration tests were conducted domestically using the programmed flight of drones.

研究分野：宇宙マイクロ波背景放射

キーワード：CMB ドローン 電波望遠鏡

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) 宇宙初期の加速膨張「インフレーション」が生成する原始重力波の初検出を目指し、CMB 偏光観測の分野では多くの実験がしのぎを削っている。インフレーション宇宙論は、ビッグバンより前の、宇宙が誕生した瞬間に迫る仮説であり、宇宙の指数関数的な膨張が起きたとしている。この膨張による空間の歪みにより、原始重力波が発せられたと考えられている。ビッグバンの残光である CMB をバックライトに用いて、世界で初めてインフレーション起源の原始重力波を観測することが最終目標である。
- (2) 本研究は、スペイン領テネリフェ島に設置されている二つの望遠鏡 GroundBIRD と QUIJOTE を用いて、高感度な CMB 偏光観測を実現することを目指している。CMB は、ほぼ無偏光の黒体放射であるが、原始重力波による空間異方性等によって、少し偏光成分が存在する。この偏光成分の精密観測が、原始重力波の初検出には必要不可欠である。偏光成分の精密観測のためには、無偏光成分を差し引かななくてはならない。そのため、ピクセルごとに、偏光角の直交する二つの検出器で同一の空を観測し、その差を計測する。その際、片方の検出器の特性を見誤ってしまうと途端に偽信号が載ってしまうため、各検出器や付属するアンテナの特性の較正が極めて重要になる。

2. 研究の目的

- (1) 近年急速に注目を浴びつつある小型無人航空機「ドローン」を人工電波光源として用い、電波望遠鏡の視野の形状・感度を精度よく較正して、CMB 偏光観測の更なる高感度化を目指す。電波望遠鏡による観測では、可視光に比べて波長が長いため、回折により広範囲の光を検出してしまう。高感度観測を実現するためには、周囲の光がどれくらい入ってしまうかを定量的に知る必要がある。視野の形状を詳細に測定するためには、望遠鏡の開口径に比べて十分遠くに光源を置く必要がある。本研究では、空中に浮かぶドローンを光源として用いることで、精密な較正手法を確立することを目的とする。また、これらの手法を通じて、二台の CMB 偏光望遠鏡の高感度化を目指す。

3. 研究の方法

- (1) 本研究の開始時点では、GroundBIRD 望遠鏡は予定していた検出器ウエハの7枚のうち、1枚しか実装されていない状況であったため、この検出器の拡充を行った。SRON の協力のもと、独自設計の超伝導センサーアレイを製作し、2023年5月に望遠鏡へのインストールを行った。検出器は Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID) と呼ばれる、超伝導共振器をベースとしたセンサーを採用した。MKID は一対の線で複数のセンサーを読み出す「多重化」が容易というメリットを持つ。
- (2) 本研究ではこの MKID の多重化リードアウトシステムの開発も行った。MKID の共振周波数はそれぞれ異なる周波数に調整されており、それぞれの共振周波数に適合する波を入力し、出力を見ることでその複素透過率を測定し、センサーの応答を得る。リードアウトシステムはこの入力信号の生成、および複素透過率の測定を行う。多重化には大規模な並列処理が必要なことから、FPGA を用いた処理を行う。この FPGA のファームウェアの開発を行った。

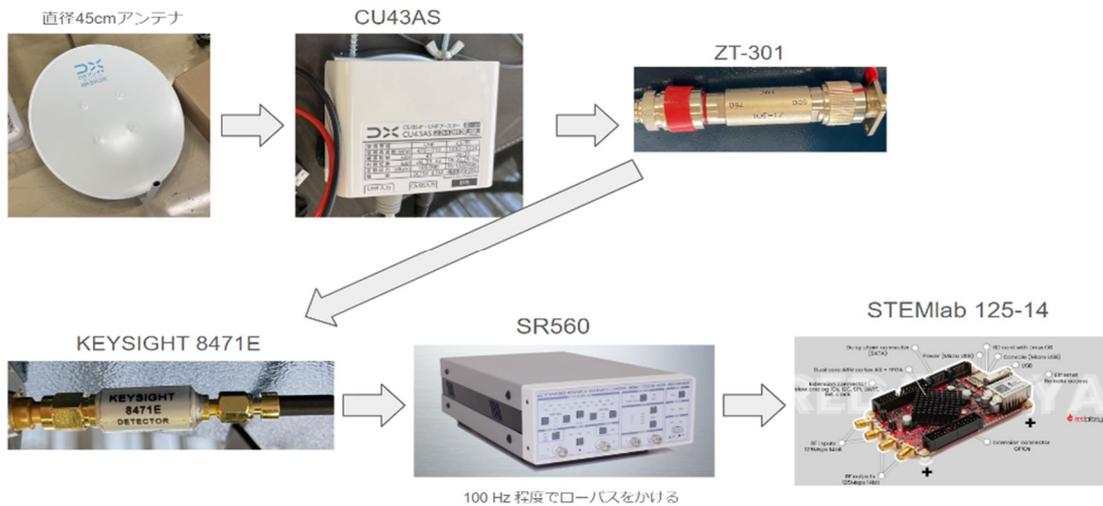


図 1 ドローン較正手法の確立に用いた簡易望遠鏡のセットアップ

- (3) GroundBIRD 望遠鏡のアップデートと並行し、国内にて、ドローンを光源とした望遠鏡の較正手法の開発を行った。すでに望遠鏡はスペインに設置されていたため、BS アンテナを用いた自作の望遠鏡を作成し、その望遠鏡のビーム測定を行った。
- (4) 測定に用いたセットアップを図 1 に示す。集光のためのアンテナは市販の BS アンテナをそのまま使い、特性インピーダンスを 50 オームに変換して KEYSIGHT 社製の検波器で DC 信号にした。その後、100Hz のローパスフィルターをかけ、Red Pitaya 社の STEMLab 125-14 でデジタル化した。
- (5) 被写体には、DJI 社のドローン Matrice 350 RTK を用いた。BS アンテナを建物の屋上に設置し、そこから 30m 離れたところを、プログラム飛行させた。0.5m 刻みで高度を変えながら、アンテナの視野を横断するように左右に飛行させた。ドローンの位置は、ドローン自体が記録している GPS のログ情報から再構成し、STEMlab で取得した時系列の応答データとの突合せを行った。この組み合わせたデータを用いて、BS アンテナのビームマップを作成した。

4 . 研究成果

- (1) GroundBIRD では、新開発の MKID とリードアウトシステムを用いることで、161 ピクセルでの観測が可能となった(図 2 左)。これを用いて 2023 年に観測を開始し、現在データを蓄積している。
- (2) リードアウトシステムの構築では、120 個のセンサーを同時に読み出すシステムの開発に成功し、安定的に運用することができた(図 2 右)。リードアウトシステムは独自開発のアナログボードと市販の FPGA ボードを組み合わせるが、組み合わせ部分の微妙な差も吸収できるようクロックや高速データ線にネットワーク経由で調整可能な遅延回路を組み込み、複数台を安定的に運用できるファームウェア・ソフトウェアを構築することに成功した。また、このファームウェアとソフトウェアを GitHub で公開した。

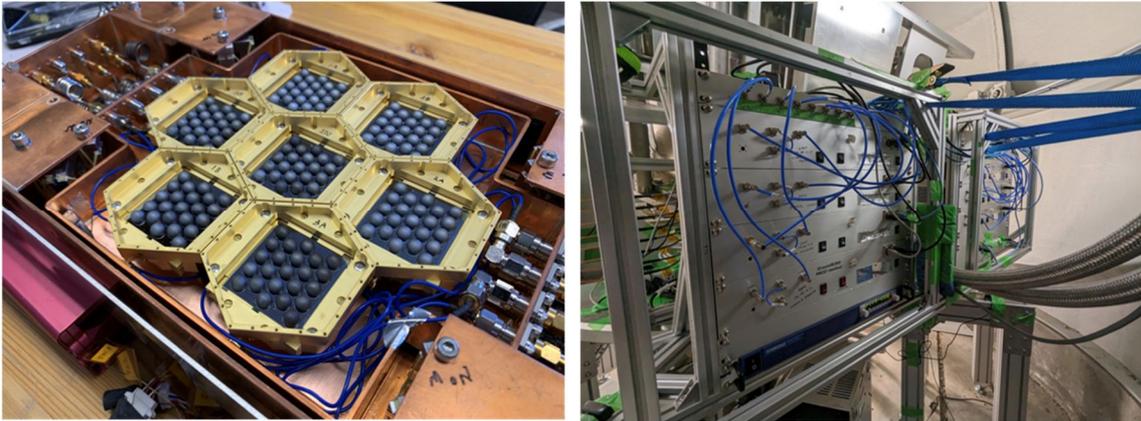


図 2 : GroundBIRD に搭載した新開発の MKID アレイ (左) とそのリードアウトシステム (右)

- (3) また、GroundBIRD 望遠鏡で取得したデータを用いて、月を用いた較正手法の開発も行った。インフレーション由来の原始重力波に特化した CMB 望遠鏡は角度分解能が低いため、放射強度の低い通常天体を用いた較正にはデータを蓄積する必要がある。月は木星などの天体に比べて圧倒的に高い強度を持つが、強度が高すぎて信号の飽和を起こす点と、月の大きさを考慮しなくてはならないという点で、これまで利用が進んでこなかった。本研究では、信号の飽和に比較的強い MKID 検出器を利用し、月の満ち欠けなどの影響も考慮したモデルを構築することで、月を用いた検出器の位置較正を行った。この結果をまとめて論文を発表した (図 3)。

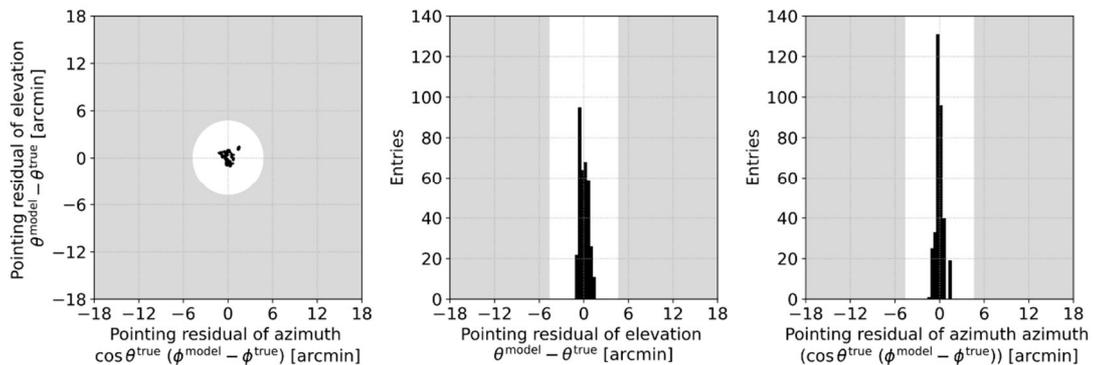


図 3 : 月のデータを用いて ± 1.6 分角の精度で検出器の位置較正を行い、要求性能(網掛でない領域)を達成した (Y.Sueno, et al. PTEP Vol. 2024, Issue 2, 2024)

- (4) ドローンを用いた較正のデモンストレーション実験は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の長谷川氏、長崎氏の協力のもと、KEK 敷地内で実施した。飛行場所と、GPS から取得した飛行経路を図 4 に示す。
- (5) 取得した時系列データと、GPS ログから取得した東西位置のデータを比較し、両者の突合せを行った。まず、測定開始・終了時に BS アンテナの受信機を電波吸収体で覆い、そのチョップのタイミングを用いて、おおまかな時刻調整を行った。そのあと、東向きに飛行しているデータと西向きに飛行しているデータのピークの位置が重なるように、0.1 秒精度で微調整を行った (図 5)。

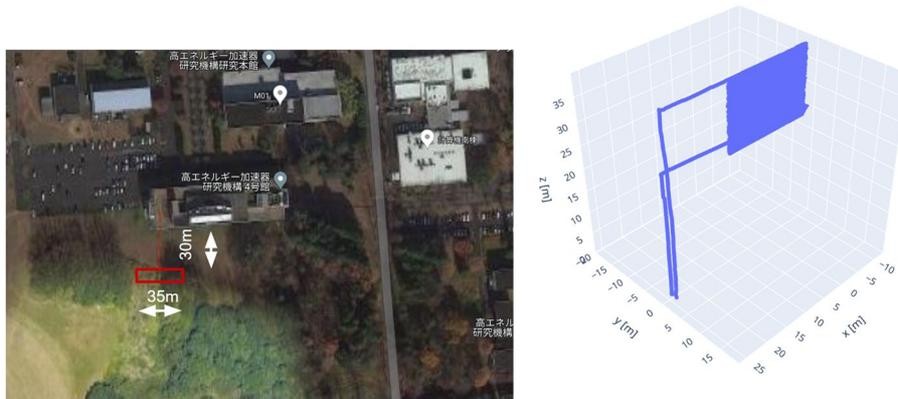


図4：ドローンの飛行場所（Google Map 上の赤四角）(左) と GPS から取得した飛行経路 (右)

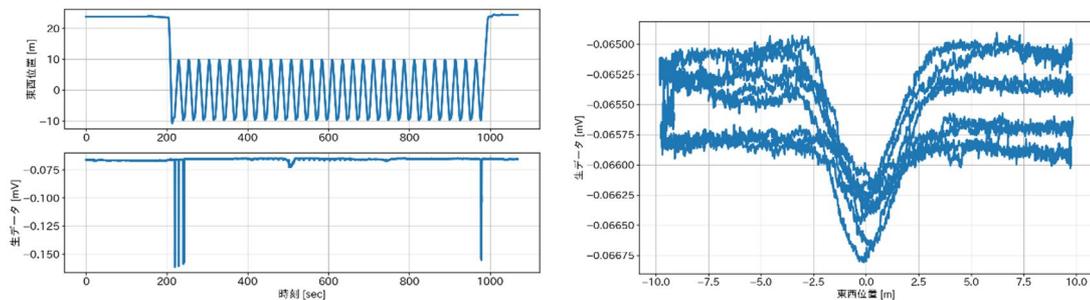


図5：GPS ログと応答の時系列データの突合せ。チョップしたデータをもとに大まかな時刻を合わせ(左)、東向き飛行時と西向き飛行時のデータを比較して0.1秒精度で調整した(右)

- (6) BS アンテナ信号のドリフト成分が大きかったため、等速飛行している間の最初と最後の信号を用いて、ゼロ点のドリフトを線形補完して、差し引いた(図6左)。最終的に得られたBS アンテナのビームマップを図6右に示す。BS アンテナのサイズと周波数から推測されるビーム径は数度レベルであり、コンシステントな結果となっている。

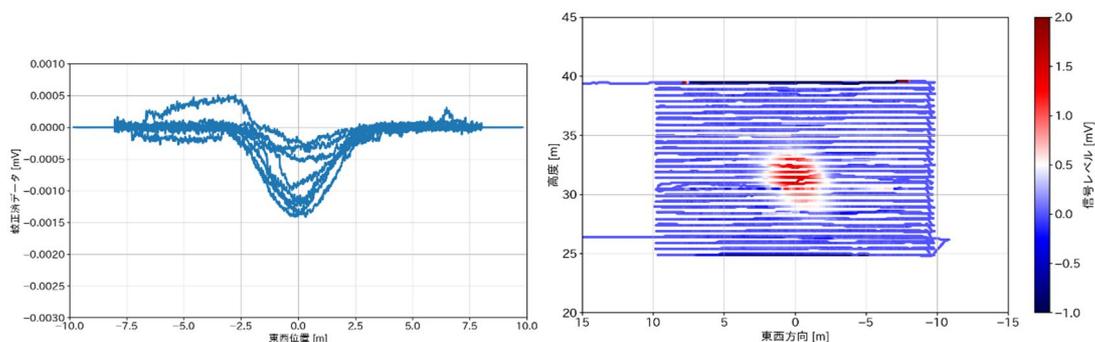


図6：ドリフト成分を差し引いたデータ(左)と、それをもとにマップ上にプロットしたもの(右)。ビームマップ上では、BS アンテナの感度の高い部分が円状になっていることが確認できる。

- (7) 今回のデモンストレーションでは、ドローンに発信機等を載せず、あくまでドローン本体を300Kの黒体放射源とみなして測定した結果である。本ドローンは、数kg程度のものを積載して飛行することも可能で、発信機を積んで飛行すればかなりのS/N比の向上が期待できる。本研究では、弱い信号源にも関わらずビーム形状の測定に成功したことで、近い将来の評価試験実現に向け、確かな手応えを得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sueno Y, Baselmans J J A, Coppens A H M, Genova-Santos R T, Hattori M, Honda S, Karatsu K, Kutsuma H, Lee K, Nagasaki T, Oguri S, Otani C, Peel M, Suzuki J, Tajima O, Tanaka T, Tsujii M, Thoen D J, Won E	4. 巻 2024
2. 論文標題 Pointing Calibration of GroundBIRD Telescope Using Moon Observation Data	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 023F01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptae011	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 HONDA Shunsuke, SUENO Yoshinori, TANAKA Tomonaga, TSUJII Miku, KUTSUMA Hiroki, HATTORI Makoto, SUZUKI Junya, MIMA Satoru, TAJIMA Osamu, OTANI Chiko, MURAYAMA Yosuke, LEE Hosun, ISHIZAKI Yuji, NAGAI Makoto, KUNO Nario	4. 巻 59
2. 論文標題 Astronomical Observations with MKIDs	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 TEION KOGAKU (Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan)	6. 最初と最後の頁 34 ~ 42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2221/jcsj.59.34	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 Tomita N., Oguri S., Inoue Y., Minowa M., Nagasaki T., Suzuki J., Tajima O.	4. 巻 2020
2. 論文標題 Search for hidden-photon cold dark matter using a K-band cryogenic receiver	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 012 ~ 012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/09/012	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 Kutsuma H., Sueno Y., Hattori M., Mima S., Oguri S., Otani C., Suzuki J., Tajima O.	4. 巻 10
2. 論文標題 A method to measure superconducting transition temperature of microwave kinetic inductance detector by changing power of readout microwaves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 095320 ~ 095320
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0013946	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12件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 片岡敬涼, 末野慶徳, 鈴木惇也, 田島治
2. 発表標題 CMB望遠鏡GroundBIRDにおける望遠鏡DAQシステムの改良
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tomonaga Tanaka, Shunsuke Honda, Shugo Oguri, Junya Suzuki, et al
2. 発表標題 Development of MKIDs for CMB polarization observation experiment GroundBIRD
3. 学会等名 LTD20 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本多俊介, 小栗秀悟, 鈴木惇也, 他
2. 発表標題 CMB望遠鏡GroundBIRD - フルアレイでの本格運転に向けた準備状況
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中智永, 小栗秀悟, 鈴木惇也, 本多俊介, 他
2. 発表標題 CMB偏光観測実験GroundBIRD: 天体を用いた超伝導検出器MKIDの性能評価
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 末野慶徳, 小栗秀悟, 鈴木惇也, 本多俊介, 他
2. 発表標題 CMB望遠鏡GroundBIRD - フルアレイでの初期評価結果と現状について
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻井未来, 小栗秀悟, 鈴木惇也, 本多俊介, 他
2. 発表標題 CMB望遠鏡GroundBIRDのサイエンス観測に向けた全検出器インストール作業及び搭載された検出器の応答性能評価
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 本多俊介, 小栗秀悟, 鈴木惇也, 他
2. 発表標題 CMB望遠鏡GroundBIRDのサイエンス観測に向けた準備状況 - ワイヤーを用いた偏光応答特性の評価
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末野慶徳, 小栗秀悟, 鈴木惇也, 本多俊介, 他
2. 発表標題 CMB望遠鏡GroundBIRD - 天体を用いた望遠鏡の較正研究
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 末野慶徳, 小栗秀悟, 鈴木惇也, 本多俊介, 他
2. 発表標題 CMB望遠鏡GroundBIRD - 高速回転による大気放射揺らぎの抑制研究
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 沓間弘樹, 小栗秀悟, 鈴木惇也, 本多俊介, 他
2. 発表標題 CMB偏光観測実験GroundBIRD-天体を用いた観測地での性能評価-
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 末野慶徳, 田島治, 遠藤光, 唐津謙一, 成瀬雅人, 小栗秀悟
2. 発表標題 超伝導センサーを使った分光計の開発研究-MKID評価系の構築
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

research map https://researchmap.jp/shugo_oguri

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	鈴木 惇也 (Suzuki Junya) (90795014)	京都大学・理学研究科・助教 (14301)	
研究分担者	本多 俊介 (Honda Shunsuke) (30835020)	京都大学・理学研究科・特別研究員 (PD) (14301)	

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			
スペイン	IAC			
韓国	Korea University			