

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01115

研究課題名(和文) 極低温Siレンズを用いた広視野CMB 偏光望遠鏡の開発

研究課題名(英文) Wide field CMB polarization telescope with cryogenic Si lenses

研究代表者

関本 裕太郎 (Sekimoto, Yutaro)

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・教授

研究者番号：70262152

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,990,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光観測によって、インフレーションによって生じた原始重力波の痕跡(B-mode 偏光)の観測が可能である。CMB 偏光観測するのに適した広視野かつコンパクトなミリ波望遠鏡を開発した。広帯域かつ広視野にて観測することで、前景放射である銀河面内の星間ダストからの偏光を効率的に差し引くことができる。高い屈折率を持ちかつ低損失の高純度シリコン(Si)レンズに、広帯域反射防止膜を加工することに成功した。近傍解測定による広視野望遠鏡の遠方サイドローブを含めたビーム形状や交差偏波特性を高精度にて測定する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では広視野CMB偏光望遠鏡やその広角サイドローブの測定が実現した。これらは今後のCMB偏光実験や広視野ミリ波望遠鏡にも応用可能となる。高い屈折率かつ低損失のシリコンは、ミリ波光学系としてとても有望である。本研究による広帯域反射防止構造による大型のシリコンレンズは今後様々な分野で利用が可能となる。広視野CMB偏光望遠鏡の開発やその評価手法は、ミリ波天文学や大容量通信分野への発展につながる。

研究成果の概要(英文)：Cosmic microwave background (CMB) polarization observations can trace primordial gravitational waves with B-mode polarization pattern caused by cosmic inflation. We have developed a wide-field millimeter-wave telescope suitable for CMB polarization observation. By observing broadband and wide field of CMB, it is possible to efficiently separate the foreground radiation from interstellar dust in the galactic plane. We have developed a broadband anti-reflection structure on a silicon (Si) lens which has a high refractive index and low loss. We have also succeeded a precise near-field beam pattern measurement of a wide-field telescope including a cross-polarization pattern.

研究分野：宇宙物理学実験

キーワード：宇宙マイクロ波背景放射 ミリ波光学系 広視野偏光観測 極低温望遠鏡 反射防止加工

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光観測により、インフレーションによって生じた原始重力波の痕跡(B-mode 偏光)を検出することが期待されている。ESAプランク衛星・NASA WMAP衛星により宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎが精密に計測されて、宇宙を6つのパラメータで記述する Λ CDM標準理論が確立した。が、宇宙地平線問題や平坦性問題の解決には宇宙インフレーションが必要とされる。宇宙インフレーションが作り出す原始重力波をCMB B-mode偏光から検出する観測が期待されている。そのためには、広視野の極低温望遠鏡が必要となる。高い屈折率を持ちかつ低損失のシリコン(Si)に、広帯域反射防止膜を加工することにより、CMBを観測する広視野かつコンパクトな望遠鏡が可能となる。観測周波数100 - 400 GHz をカバーし、星間ダスト放射を効率的に差し引く。本研究により広視野のCMB望遠鏡を実現し、宇宙インフレーションを探究する道を切り開く。

2. 研究の目的

本研究は、高い屈折率かつ低損失の大口径のシリコンのレンズを用いることにより、広視野かつ広帯域のミリ波望遠鏡を開発する。また、低周波望遠鏡を組み合わせることにより広帯域かつ広視野にてCMB偏光を観測し、前景放射である銀河面内の星間ダストからの偏光を効率的に差し引くことができる。CMB偏光観測は、前景放射を高精度にて差し引くためには、広角サイドローブについて高精度(-60 dBレベル)で知る必要がある。そのためには、迷光や多重反射を抑えた望遠鏡の設計のみならず、高精度での望遠鏡広角サイドローブや偏光角の測定を行う必要がある。

3. 研究の方法

3-(1) シリコンへの広帯域反射防止加工

シリコンへの広帯域反射防止構造加工に関しては、1) 大面積を高速に加工する機械加工 2) 高精度にて加工する技術深掘反応性イオンエッチング(DRIE)加工の2つの手法を追求した。

3-(2) 屈折式望遠鏡の開発

シリコンレンズを用いて、広視野かつコンパクトなCMB屈折式望遠鏡の設計開発を行なった。衛星搭載可能な屈折式望遠鏡の設計開発をフランスのチームと協力して行なった。シリコンレンズは、極低温(4K)環境での使用が想定されており、そのための熱収縮の違いを緩和しかつ低温での熱伝達の良い保持機構の開発をおこなった。

3-(3) 広視野CMB望遠鏡のアンテナパターン

広視野・広帯域のCMB望遠鏡のビームパターンの高精度測定法の開発を行なった。広帯域かつ広視野にて観測することで、近傍解測定による広視野望遠鏡の遠方サイドローブを含めたビーム形状測定や交差偏波特性測定法を開発した。

4 . 研究成果

研究の主な成果

4-(1) シリコン広帯域反射防止構造の開発

高い屈折率を持ちかつ低損失のシリコン(Si)は、広帯域反射防止膜が課題である。機械加工によりシリコンレンズに広帯域反射防止構造の加工に成功した。特殊な形状の刃物を高速で回転することにより、図1に示す反射防止構造を効率的に大面積に加工することが可能となった。

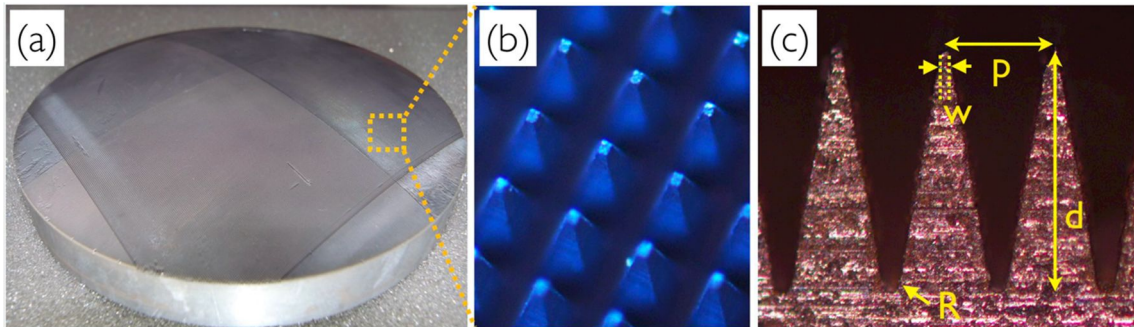


図 1 シリコンレンズへの広帯域反射防止構造 [T. Nitta + 2018]

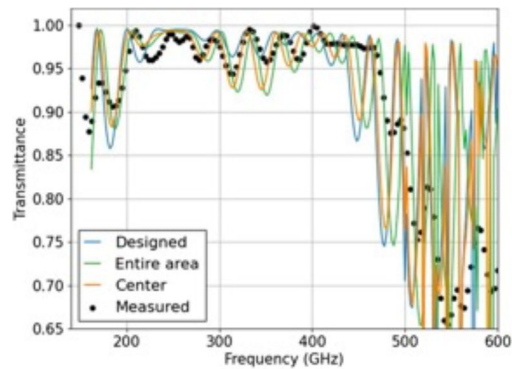


図 2 (左図)シリコンへの深掘り反応性イオンエッチング(DPIE)加工の走査型電子顕微鏡(SEM)写真と(右図) その透過率の測定結果 [T. Hasebe+2021]

シリコンレンズの反射防止膜の高周波化を進めるために、深掘り反応性イオンエッチング(DRIE: deep reactive ion etching)を用いてシリコンに反射防止加工を行う開発を行なった [T. Hasebe+2020, T. Hasebe+2021]。図2に走査型電子顕微鏡(SEM)の写真を示すように、3段の深掘加工を行い200GHz - 450GHzにおいて95%以上の透過率を持つ、高性能の反射防止構造を開発した。この反射防止構造は、CMBの高周波側を観測するのに適している。

4-(2) 屈折式 CMB 望遠鏡の設計開発

シリコンレンズを用いた広視野 CMB 屈折式望遠鏡の設計を行なった [T. Hasebe + 2018]。F/#2.2 の直径 300mm のシリコンレンズを 2 枚用いて広視野 24 度を達成した。屈折式望遠鏡は、反射式望遠鏡に比べて、コンパクトかつ広視野を確保しやすい。一方で、広帯域を確保するのが難しいため、2 つのコンパクトな望遠鏡で、所望の観測帯域 100 - 400 GHz を確保した(図 3)。2 つの望遠鏡 (100GHz - 250GHz, 200 GHz - 450GHz) を組み合わせることにより衛星上で 150 kg 以下にて、固有振動数 50 Hz 以上、30K インターフェースから 5K への熱流入 5 mW 以下という設計解を得た [L. Montier+2020]。

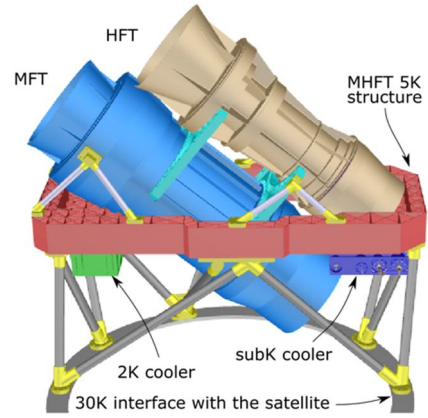


図 3 屈折式 CMB 望遠鏡の設計

シリコンレンズは、極低温(4K)環境での使用が想定されており、そのための図 4 に示すような保持機構の開発を行なった [T.Nitta+2020]。これは研究代表者のグループが ALMA カートリッジ型受信機用に開発した冷却機構 [M. Sugimoto + 2003 Cryogenics 43, 435] を応用した技術で、銅にスリットを入れたバネによる保持構造である。これによりシリコンとアルミニウムとの熱膨張係数の違いを吸収し、かつ、効率的に冷却が可能となった。

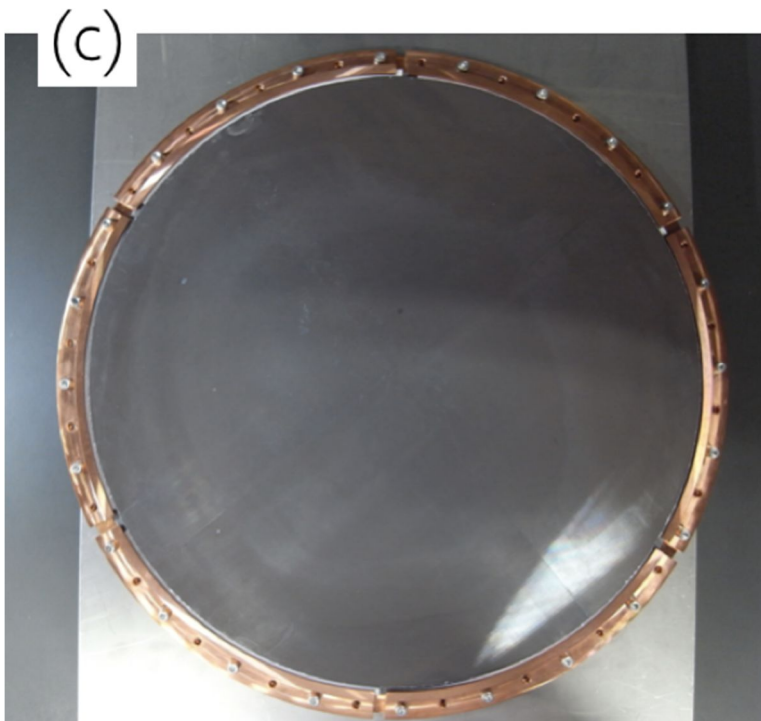


図 4 直径 30cm の反射防止構造シリコンレンズとその保持構造 [T. Nitta+2020]

4-(3) CMB 望遠鏡の広角サイドローブ測定

CMB 偏光観測において天の川銀河からの前景放射を高精度にて差し引くためには、広角サイドローブについて高精度(-60 dB レベル)で知る必要がある[Sekimoto+2020]。本研究にて、広視野 CMB 望遠鏡の広角サイドローブを測定するためのベクトル近傍界測定システムを開発した。これは研究代表者が ALMA 受信機カートリッジのアンテナパターン測定に開発したベクトル近傍解測定システム[M. Naruse+2009 Exp.Astr. 24, 89]をもとに、広視野望遠鏡の広角サイドローブ測定のために改良したものである。図 5 に示した広角サイドローブは、本研究によって開発した測定システムによって得られた広角サイドローブ測定の結果である。視野 ± 10 度、ダイナミックレンジ 70dB にて、-60 dB レベルの広角サイドローブの測定に成功した[H. Takakura et al. 2019]。これは CMB 望遠鏡の開発において重要な成果の一つである。

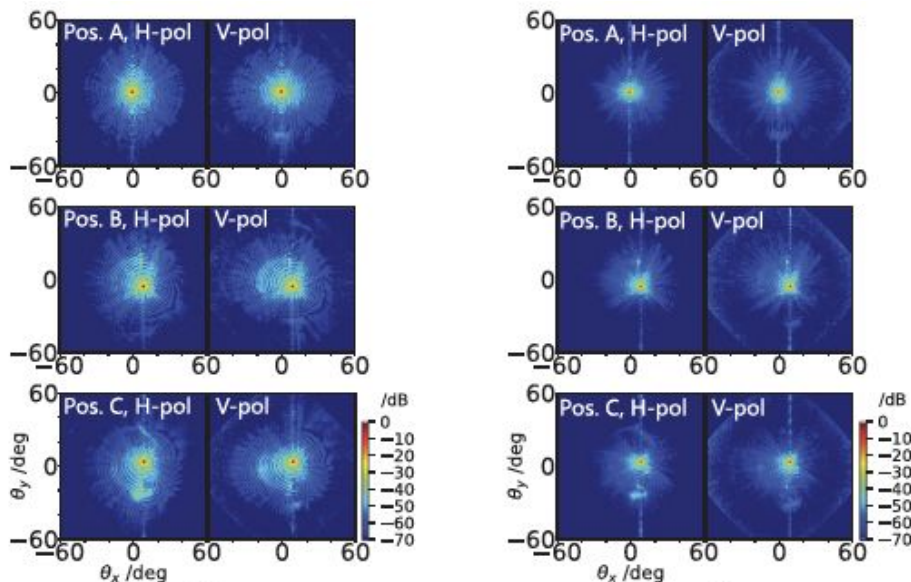


図 5 (左図)は 140 GHz における広角サイドローブ測定 (± 60 度) [H. Takakura+2019]。Pos A は、視野中心。 Pos. B は視野(+10 deg, -5deg)、 Pos. C は視野(+10 deg, +5 deg)の広角サイドローブである。(右図)は同様に 220 GHz における広角サイドローブ測定。

4-(4) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究費にて得られた研究成果 シリコンレンズの広帯域反射防止構造・広視野屈折式望遠鏡・広角サイドローブ測定は、国内外の CMB 望遠鏡の開発に大きな貢献となる。JAXA 主導の LiteBIRD 衛星計画に貢献する研究である。本研究費にて開発された広視野望遠鏡は、研究代表者が ALMA 受信機システムで開発した研究成果を更に発展させることができた。ミリ波の天文学においては、ALMA のような狭視野 (~ 1 分角)の望遠鏡と相補的な広視野ミリ波望遠鏡にも有用である。シリコンレンズはその鍵となる光学素子である。

4-(5) 今後の展望

得られた研究成果をもとに、2020 年代打ち上げの LiteBIRD 衛星にて、宇宙インフレーションの証拠となる CMB B-mode 偏光パターンを高精度にて測定する計画が進んでいる。シリコンの反射防止構造は、CMB のみならず、地上の天文観測望遠鏡においても適用が可能であり、今後の天文学・宇宙物理学の発展に資する。世界的には、ミリ波での広視野観測は CMB のみならず、CCAT=FYST など天体観測でも進められつつあり、本研究の意義は、国際的にも大きい。

また、ヨーロッパ宇宙機関 ESA の Voyage 2050 という 2050 年に向けた計画の一つとして、CMB の 2.7K 黒体放射からのズレ (10^{-7}) spectrum distortion 測定が候補となっている。本研究によるミリ波望遠鏡の広視野化やアンテナパターンの高精度測定は、CMB の spectrum distortion の研究にも役立つと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 11件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nitta Tom, Nagai Makoto, Murayama Yosuke, Hikawa Ryotaro, Suzuki Ryuji, Sekimoto Yutaro, Takakura Hayato, Hasebe Takashi, Noda Kazufusa, Saeki Satoshi, Matsuo Hiroshi, Kuno Nario, Nakai Naomasa	4. 巻 11453
2. 論文標題 Anti-reflection structures for large-aperture cryogenic lenses and vacuum window in 100-GHz band	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE proceedings	6. 最初と最後の頁 114534C-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2560900	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 Sekimoto Y., ..., Dotani, T., Hasebe, T., Takakura, H. ..., LiteBIRD collaboration	4. 巻 11453
2. 論文標題 Concept design of low frequency telescope for CMB B-mode polarization satellite LiteBIRD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE proceedings	6. 最初と最後の頁 1145310-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2561841	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 L. Montier, B. Mot, P. de Bernardis, B. Maffei, G. Pisano, ..., Hasebe, T., Dotani, T., Takakura, H., Y. Sekimoto, ..., and LiteBIRD collaboration	4. 巻 11443
2. 論文標題 Overview of the medium and high frequency telescopes of the LiteBIRD space mission	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE proceedings	6. 最初と最後の頁 114432G-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562243	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 Hasebe Takashi, Hayashi Tasuku, Shohmitsu Yoshinori, Nitta Tom, Matsuo Hiroshi, Sekimoto Yutaro	4. 巻 60
2. 論文標題 Fabrication of three-layer silicon antireflection structures in 200-450 GHz using deep reactive ion etching	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 10462 ~ 10467
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.441969	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 Takakura Hayato, Sekimoto Yutaro, Inatani Junji, Kashima Shingo, Imada Hiroaki, Hasebe Takashi, Kaga Toru, Takeda Yoichi, Okada Norio	4. 巻 9
2. 論文標題 Far-Sidelobe Antenna Pattern Measurement of LiteBIRD Low Frequency Telescope in 1/4 Scale	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology	6. 最初と最後の頁 598 ~ 605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/THZ.2019.2937497	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 Takashi Hasebe, Tasuku Hayashi, Hayato Takakura, Yutaro Sekimoto, Kumi Ishikawa, Yoshinori Shohmitsu, Kazuhisa Noda, Satoshi Saeki, Yuichiro Ezo, Tom Nitta	4. 巻 199
2. 論文標題 Development of Multi-Layer Anti-Reflection Structures for Millimeter-Wave Silicon Optics Using Deep Reactive Ion Etching Process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 339-347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-019-02286-4	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 Sekimoto Y., ..., Hasebe, T., Takakura, H., Dotani, T., ... and LiteBIRD collaboration	4. 巻 10698
2. 論文標題 Concept design of the LiteBIRD satellite for CMB B-mode polarization	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SPIE proceedings	6. 最初と最後の頁 106981Y-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2313432	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 Nitta T., Sekimoto Y., Hasebe T., Noda K., Sekiguchi S., Nagai M., Hattori S., Murayama Y., Matsuo H., Dominjon A., Shan W., Naruse M., Kuno N., Nakai N.	4. 巻 193
2. 論文標題 Design, Fabrication and Measurement of Pyramid-Type Antireflective Structures on Columnar Crystal Silicon Lens for Millimeter-Wave Astronomy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 976 ~ 983
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-018-2047-4	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 Hasebe T., Kashima S., ... , Sekimoto, S., ... , Dotani, T. ... et al.	4. 巻 193
2. 論文標題 Concept Study of Optical Configurations for High-Frequency Telescope for LiteBIRD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 841 ~ 850
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-018-1915-2	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 Nitta Tom, Sekimoto Yutaro, Noda Kazufusa, Sekiguchi Shigeyuki, Shu Shibo, Matsuo Hiroshi, Dominjon Agnes, Naruse Masato, Kuno Nario, Nakai Naomasa	4. 巻 7
2. 論文標題 Broadband Pillar-Type Antireflective Subwavelength Structures for Silicon and Alumina	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology	6. 最初と最後の頁 295 ~ 301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TTHZ.2017.2692045	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9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 関本裕太郎
2. 発表標題 CMB偏光観測衛星 LiteBIRD 極低温広視野望遠鏡の概念設計
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関本裕太郎
2. 発表標題 極低温ミリ波観測システムで探るビッグバン以前の宇宙
3. 学会等名 超伝導科学技術研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関本裕太郎
2. 発表標題 CMB偏光観測衛星LiteBIRD概念設計 II
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関本裕太郎
2. 発表標題 極低温ミリ波観測システムで探るビッグバン以前の宇宙
3. 学会等名 日本未踏学会
4. 発表年 2018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
研究協力者	長谷部 孝 (Hasebe Takashi)		
研究協力者	新田 冬夢 (Nitta Tom)		
研究協力者	高倉 隼人 (Takakura Hayato)		

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	堂谷 忠靖 (Dotani Tadayasu)		

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		
フランス	IRAP	IAS	