

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247022

研究課題名(和文) サブミリ波2000画素カメラの開発

研究課題名(英文) Development of submillimeter-wave 2000 pixel camera

研究代表者

関本 裕太郎 (Sekimoto, Yutaro)

国立天文台・先端技術センター・准教授

研究者番号：70262152

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、広視野ミリ波天体観測を目的として超伝導MKIDカメラを開発した。MKIDは、ミリ波によってクーパー対が準粒子に壊される時の超伝導インピーダンスの変化を、超伝導LC共振器を用いて読み出す。ミリ波を受信するダブルスロットアンテナとシリコン基板レンズアレイを組み合わせることで集光効率を高めている。天体観測に必要な、FFT型多素子データ取得システムや大口径シリコンレンズを冷却したコンパクトな極低温冷却光学系の開発を並行した。モジュールあたり600画素のMKIDカメラを開発し、4モジュールで2000画素をカバーすることが可能となった。野辺山45m鏡に搭載し、観測システムとしての成立性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have developed a superconducting MKID (microwave kinetic inductance detector) camera for wide field-of-view millimeter/submillimeter-wave astronomical observations. MKIDs composed of superconducting LC resonators sense the change in superconductive impedance when Cooper pairs are broken into quasi-particles by millimeter waves. A double slot antenna for receiving submillimeter waves and silicon substrate lens-array are combined to increase light collection efficiency. We have also developed a new FFT based MKID readout system and a compact cryogenic system consisted of large diameter silicon lenses (4K objective lens) and 1K eyepiece). The MKID camera covers 2000 pixels with 4 modules of 600 pixels. To confirm the feasibility as an observation system, a demonstration of the camera was carried out at Nobeyama 45 m telescope.

研究分野：電波天文学

キーワード：広視野カメラ ミリ波天文学 超伝導検出器 冷却光学系 極低温100mK

## 1 研究開始当初の背景

電波天文学では、超低雑音超伝導ヘテロダイン受信機と高精度アンテナ・干渉相関技術や最適なサイトを集積した欧米日の国際協力事業 ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) によって、高角度分解能・高感度でのミリ波観測に一定の完成形が得られた。今後、ALMA による天文観測は想像を超える成果を得るであろう。

一方、ALMA の弱点は、視野が狭い (20 秒角 at 300 GHz) ことである。よって、広視野電波カメラにより、価値のある観測対象を探すことが重要となる。可視赤外では広視野観測・高感度観測が進行している。すばる望遠鏡の広視野可視観測装置 Hyper Suprime Cam が稼働している。低い温度の星間物質をトレースするサブミリ波においても、広視野観測・高感度観測は、新たな革新を生み出す機会であり、世界的な競争が始まっている。広視野サブミリ波望遠鏡に、多素子電波カメラを搭載することで、拮がった天体に対して、ALMA 以上の感度が得られる。

## 2 研究の目的

上記の背景を鑑みて、サブミリ波天体の広視野観測を行うため多素子超伝導カメラの開発を行う。天文観測においては、高感度のカメラが必要となり、多くは超伝導体が使われている。極低温の冷却システムが必要となり、検出器と望遠鏡からの天体信号を効率良く結合する冷却光学系が必要となる。また、多素子検出器からの信号を読み出すデータ収集回路も必要である。

超伝導共振器を用いた検出器 Microwave Kinetic Inductance Detector: MKID とアンテナ結合技術を使って超伝導カメラを開発する。MKID は 2003 年 Caltech の J. Zmuidzinas のグループで発案された方式 (Day+2003 Nature) で、ALMA で使われている SIS 受信機と親和性の高い技術である。我々の研究グループがこれまで培ってきたアンテナ結合および超伝導検出器の技術により、超伝導 MKID カメラを開発する。

## 3 研究の方法

広視野の超伝導カメラを開発は、以下のような要素技術の開発を行い、組み合わせて総合試験を行う。

### 3.1 超伝導 MKID カメラ

#### 3.1.1 超伝導 MKID 素子

MKID は、超伝導薄膜中の準粒子数の変化を検知する量子型超伝導検出器であり、ミリ波からガンマ線の検出器として応用が可能である。原理的な雑音は準粒子数の

ゆらぎによってきまる。超伝導転移温度より十分に低温でつかうことにより、周囲温度の変化には鈍感となる。MKID は、超伝導薄膜共振器をもちいており、周波数多重化が容易であるという優れた特徴をもつ。超伝導薄膜共振器の  $Q$  は  $1 \times 10^6$  程度が可能である。例えば 4 - 8 GHz のマイクロ波帯に 2MHz 間隔で共振器を並べることで、 $2 \times 10^3$  素子を同時に読み出す周波数多重化が可能となる。また、超伝導転移端センサー Transition Edge Sensor: TES に較べて、ダイナミックレンジが  $> 10^4$  と高いというメリットをもつ。

高純度 Si 基板 (3 インチ) 上に超伝導アルミニウムによる MKID を開発する。超伝導アルミニウムは厚み 50 nm であり、3 インチウエハー上での均一なかつ高品質の超伝導薄膜を成膜する。MKID にはダブルスロットアンテナを組み合わせるにより、直線偏光を受信する素子となる。ダブルスロットアンテナとシリコンレンズを組み合わせて、サブミリ波のビームを形成する技術は、ハーシェル望遠鏡の HIFI 検出器にて単一素子として実証されている。

#### 3.1.2 Si Lens array

集光効率を高めるために シリコンレンズアレイを開発する。高純度シリコンは、サブミリ波の屈折率や透過率が高く理想的な材料である。一方、屈折率が高いために、反射防止膜が無い場合は、最大で 30% の入力パワーを損失する。反射防止膜は、 $n_{AR} = \sqrt{n_{Si}} = 1.84$  の屈折率をもつ誘電体を厚み  $t = \lambda / (4n_{AR})$  で塗布すればよい。

#### 3.1.3 OMT-MKID

ミリ波の偏光を高感度かつ高精度にて観測するために、広帯域コルゲートホーンアレイ及び平面 OMT(偏波分離器)、周波数分離 フィルター、MKID を組み合わせた開発を行う。

### 3.2 広視野サブミリ波冷却光学系

天体の弱い信号を検出するには、高効率かつ冷却された光学系が重要である。超伝導検出器の性能を引き出すには、200mK 以下が理想である。一方、多素子のカメラを小さくつくるためには、F#の明るい光学系を作ると良い。レンズをもちいた屈折式光学系は、反射鏡をもちいた光学系に較べてコンパクトという長所とともに、ロスが増えるという短所をもつ。高感度の超伝導カメラは、超伝導ギャップ周波数以上の周波数 (AI の場合は 80GHz) に感度を持つため、迷光対策が鍵を握る。バッフル等の設計を行う。

### 3.3 広帯域読出装置

多素子の MKID カメラを読み出す広帯域読み出し装置の開発を行う。周波数マルチプレクスされた多素子の MKID を読み出すためには、高速の AD/DA 回路を用いて帯域 500 MHz 以上を開発する。このボードを複数並べて 2000 チャンネルを読み出す。

### 3.4 総合試験

サブミリ波の広視野観測をするために、MKID カメラを冷却光学系にインストールして 0.1K にて、ミリ波を導入して、広帯域読み出し回路を用いて総合試験を行う。主な試験項目は、雑音性能や歩留まりやビームパターンである。

## 4 研究の成果

### 4.1 超伝導 MKID カメラ

#### 4.1.1 超伝導 MKID 素子

低雑音化のために、自作の MBE 装置を用いた高品質の Al 超伝導薄膜の成膜を行った。デバイスの改良や迷光の対策により等価雑音 (NEP) を  $2 \times 10^{-18} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$  に到達した [Karatsu+2016]。

図 1 は、開発した 220GHz 600 画素 MKID カメラである [Sekimoto+2014]。超伝導 Al 薄膜 ( $t = 50 \text{ nm}$ ) の Coplanar waveguide (CPW) の  $1/4 \lambda$  超伝導共振器をシリコン基板の上に配置している。600 画素 MKID の共振周波数 ( $f_0$ ) は 3 - 8 GHz 帯に並んでいる。歩留まり 95% を達成している。MKID に結合したダブルスロットアンテナと Si レンズの組み合わせ、ガウス形状のビームパターンが得られる [Nitta+2014]。

#### 4.1.2 Si lens array

サブミリ波の焦点面検出器の光学結合効率を高めるために、デバイスの基板にレンズアレイを接合する。拡張球面レンズと平面 double slot antenna の組み合わせは、ビーム形状が良く、製作が比較的容易なため、多画素のカメラに適している。Si 拡張球面レンズをアレイ化し、超伝導薄膜をもちいた double slot antenna と Al 薄膜の CPW の  $1/4 \lambda$  超伝導共振器を組み合わせたカメラを開発した。限られた焦点面にできるだけ画素を密に並べて光学結合効率を高めるために、電磁界シミュレーションを駆使して設計をおこなった。その結果 F#2 の光学系に  $1 F \lambda$  の直径をもつレンズアレイによって、きれいなビームを受信し、高密度な焦点面検出器の設計解を得た。総合試験によって、シミュレーション結果を実測によって確認した。

国立天文台 先端技術センターのメカニカルエンジニア

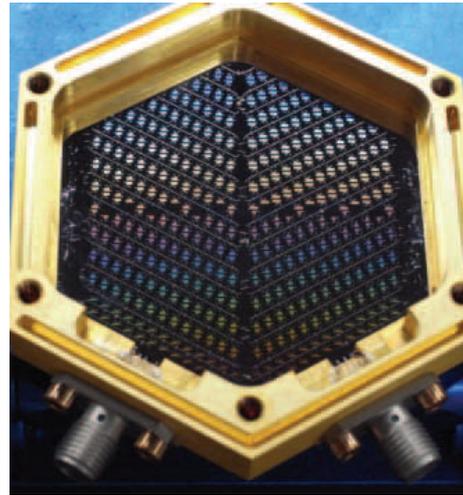


図 1: 220GHz 600 画素の MKID カメラ [Sekimoto+2014]。超伝導共振器に平面 double slot antenna を組み合わせたものが 1 画素で、それが 609 画素ある。基板は Si。大きさは 50mm である。

リング (ME) ショップにて、超精密加工装置をもちいて、Si レンズアレイの切削加工に成功した [Mitsui+2015]。レンズアレイ用の反射防止膜については、Epoxy 系 Stycast1266/2850 を混合し、その割合によって誘電率を最適化する。厚みは、切削による機械加工で  $1/4$  波長になるように制御する。試作では、設計と  $1 \mu\text{m}$  精度で厚みを制御することに成功している [Mitsui+2015]。

また、レーザーによる Sub-Wavelength Structure (SWS) 加工で、表面の等価誘電率を下げる方法にも成功した [Nitta+2014]。こちらは、熱膨張の違いによるストレスが無く、エポキシ等誘電体損失が大きい物を使わないで良いという利点を持つ。

#### 4.1.3 OMT-MKID

図 1 に、ミリ波平面 OMT 及び MKID の概念図を示す [Shu+2016]。コルゲートホーンから入力したミリ波の信号は根元の円形導波管を通り、4つのプローブで直交 2 偏波が平面回路に入力される。4つのプローブは SOI ウェハを深掘りした Si メンブレン  $6 \mu\text{m}$  厚の上の Nb 薄膜 ( $t = 200 \text{ nm}$ ) からなる。Si 裏彫り加工により、バックショートを作った。プローブからの信号はインピーダンスを  $50 \Omega$  に変換した後に 180 度ハイブリッドカプラーに入力される。ここで円形導波管の基本モードとなる TE11 モードのみが、次の周波数分離フィルターに伝送される。円形導波管の高次モードは、この 180 度ハイブリッドによって、除去される。周波数分離フィルターは、マイクロストリップ回路で、80 - 110 GHz と 130 - 160 GHz の 2 バンドを選択する設計である。選択された信

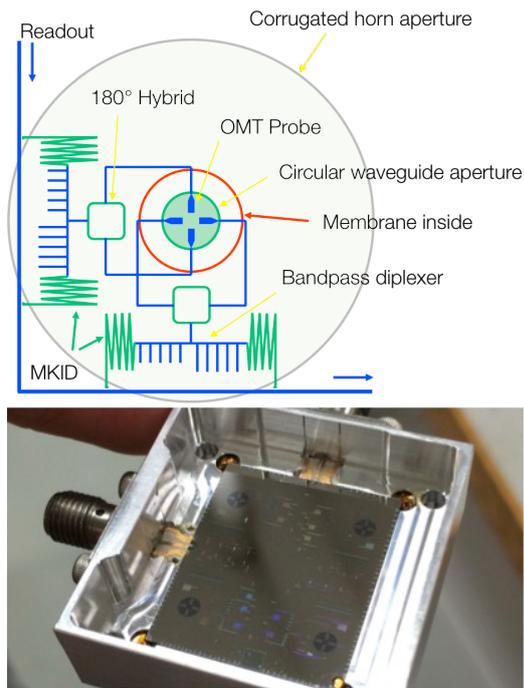


図 2: ミリ波 OMT-MKID 設計図と作成された OMT-MKID 図

号は CPW AI MKID によって検出される。

コルゲートホーンは、先端技術センターで切削加工で製作したオクターブバンドを超える広帯域を持ち、かつ、交差偏波の少ないビームを持つ [Sekiguchi+2017]。広帯域コルゲートホーン (120 - 270 GHz, 80 - 160 GHz) を切削加工で試作し、測定した。その結果、電磁界シミュレーションと  $-40$  dB レベルで一致している。

OMT-MKID と広帯域コルゲートホーンを組み合わせ、コンパクト 0.1K 冷却システム [Sekiguchi+2015] 内にインストールした後に、ビームパターンや偏波測定を行った。

#### 4.2 サブミリ波冷却光学系

ミリ波からテラヘルツの多画素の MKID イメージセンサーを活用するには、高効率かつ広視野の光学系が必要になる。多画素 MKID カメラと望遠鏡を効率よく結合する広視野冷却光学系を開発した [Sekiguchi+2015]。図 3 は、220GHz 用の広視野冷却光学系の断面図である。希釈冷凍機は、大陽日酸社製で、冷凍能力は 100 mK に対して  $20 \mu\text{W}$  を持つ。真空バルブ操作系が自動化されており、試験の効率はよい。広視野を実現するために、低損失の真空窓や赤外線の熱輻射を減らす IR ブロックフィルター、迷光を抑える冷却バッフル等から構成されている。MKID 検出器は、超伝導体のギャップ周波数を超える電磁波はすべて検出するため、周波数制限フィル

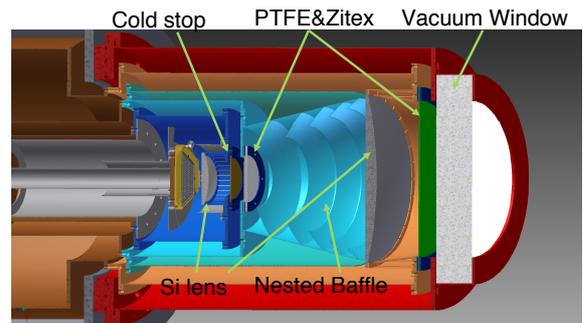


図 3: 広視野冷却光学系の断面図 [Sekiguchi+2015]。真空窓の直径は 150 mm である。低損失の真空窓や赤外線の熱輻射を減らす IR ブロックフィルター、迷光を抑える冷却バッフル、磁場シールドから構成されている。MKID カメラは 0.1K に冷却される。

ターや迷光の対策が重要である。

#### 4.3 高速 FFT 読出回路

MKID は、 $Q$  の大きい超伝導共振器を用いることにより、周波数多重化が容易である。そのメリットを活かすために、多素子読み出し FFT 回路の開発を進めた。読み出し周波数を FFT に同期してスイープするというアイデアを着想し、実現した [Kiuchi+2015]。ADC/DAC は、4Gbps - 10 bit をもちいて、帯域 1000 MHz の複素 FFT 回路を開発した。ボード 1 枚で 500 画素の MKID を読出すことが可能となった。このボードを 4 枚並べ 2000 チャンネルを読み出す。広いダイナミックレンジで多素子の MKID を読み出すことが可能となった。

#### 4.4 まとめ

本研究費にて上記の MKID カメラ及び周辺機器の開発に成功し、総合試験を行った。雑音や歩留まりやビームパターンの測定を行った。

このシステムを野辺山 45m 望遠鏡に搭載し 1 週間程度の試験観測を行った。MKID カメラは 80mK に冷却され、天体観測が行えることを確認した。野辺山 45m 望遠鏡の既存のソフトウェアによって同期した MKID カメラを読み出すシステムを構築し、その性能を月の観測によって確認した。

これを 7 モジュール並べることにより 4000 画素のサブミリ波カメラを南極テラヘルツ望遠鏡に実現することを計画している。

### 5 主な発表論文等

(雑誌論文) (計 32 件)

1. S. Sekiguchi, M. Sugimoto, S. Shu, Y. Sekimoto, K. Mitsui, T. Nishino, N. Okada, K. Kubo, T. Takahashi, and T. Nitta, "Broadband Corrugated Horn Array with Direct Machined

- Fabrication," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 7, 36 - 41 (2017). 査読有
2. T. Nitta, Y. Sekimoto, K. Noda, S. Sekiguchi, S. Shu, H. Matsuo, A. Dominjon, M. Naruse, N. Kuno, and N. Nakai, "Broadband Pillar-Type Antireflective Subwavelength Structures for Silicon and Alumina," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 7, 295 - 301 (2017). 査読有
  3. S. Shu, S. Sekiguchi, M. Sekine, Y. Sekimoto, T. Nitta, A. Dominjon, T. Noguchi, M. Naruse, and W. Shan, "Development of octave-band planar ortho-mode transducer with kinetic inductance detector for LiteBIRD," *Proc. SPIE 9914*, 99142C-6 (2016). 査読無
  4. Y. Sekimoto, S. Sekiguchi, S. Shu, M. Sekine, T. Nitta, M. Naruse, A. Dominjon, T. Hasebe, W. Shan, T. Noguchi, A. Miyachi, M. Mita, and S. Kawasaki, "Design of corrugated-horn-coupled MKID focal plane for CMB B-mode polarization," *Proc. SPIE 9914*, 99142A-7 (2016). 査読無
  5. H. Ishino, et al. "LiteBIRD: lite satellite for the study of B-mode polarization and inflation from cosmic microwave background radiation detection," *Proc. SPIE 9904*, 99040X-8 (2016). 査読無
  6. H. Sugai, S. Kashima, K. Kimura, T. Matsumura, M. Inoue, M. Ito, T. Nishibori, Y. Sekimoto, H. Ishino, Y. Sakurai, H. Imada, and T. Fujii, "Optical designing of LiteBIRD," *Proc. SPIE 9904*, 99044H-7 (2016). 査読無
  7. T. Matsumura, et al. "LiteBIRD: Mission Overview and Focal Plane Layout," *J. Low Temp. Phys.* (2016). 査読有
  8. K. Karatsu, A. Dominjon, T. Fujino, T. Funaki, M. Hazumi, F. Irie, H. Ishino, Y. Kida, T. Matsumura, K. Mizukami, M. Naruse, T. Nitta, T. Noguchi, N. Oka, S. Sekiguchi, Y. Sekimoto, M. Sekine, S. Shu, Y. Yamada, and T. Yamashita, "Radiation Tolerance of Aluminum Microwave Kinetic Inductance Detector," *J. Low Temp. Phys.* 184, 540 (2016). 査読有
  9. M. Naruse, T. Nitta, K. Karatsu, M. Sekine, S. Sekiguchi, Y. Sekimoto, T. Noguchi, T. Taino, and H. Myoren, "Dual-double slot antennas fabricated with single superconducting film for millimeter wave camera," *Int. J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* 37, 128-136 (2016). 査読有
  10. A. DOMINJON, M. Sekine, K. Karatsu, T. Noguchi, Y. Sekimoto, S. Shu, S. Sekiguchi, and T. Nitta, "Study of superconducting bi-layer for Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKID) for Astrophysics," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 26, 2400206 (2016). 査読有
  11. W. Shan, Y. Sekimoto, and T. Noguchi, "Parametric Amplification in a Superconducting Microstrip Transmission Line," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 26, 1801209 (2016). 査読有
  12. S. Oguri, J. Choi, T. Damayanthi, M. Hattori, M. Hazumi, H. Ishitsuka, K. Karatsu, S. Mima, M. Minowa, T. Nagasaki, C. Otani, Y. Sekimoto, O. Tajima, N. Tomita, M. Yoshida, and E. Won, "GroundBIRD: Observing Cosmic Microwave Polarization at Large Angular Scale with Kinetic Inductance Detectors and High-Speed Rotating Telescope," *J. Low Temp. Phys.* (2015). 査読有
  13. K. Mitsui, T. Nitta, N. Okada, Y. Sekimoto, K. Karatsu, S. Sekiguchi, M. Sekine, and T. Noguchi, "Fabrication of 721-pixel silicon lens array of a microwave kinetic inductance detector camera," *J. Astron. Telesc. Instruments, Syst.* 1, 25001 (2015). 査読有
  14. T. Tsuzuki, T. Nitta, H. Imada, M. Seta, N. Nakai, S. Sekiguchi, and Y. Sekimoto, "Design of wide-field Nasmyth optical system for a submillimeter camera," *J. Astron. Telesc. Instruments, Syst.* 1, 25002 (2015). 査読有
  15. W. Shan, Y. Sekimoto, and T. Noguchi, "Microwave loss of DC sputtered NbTiN microstrip lines," *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 90303 (2015). 査読有
  16. K. Karatsu, S. Mima, S. Oguri, J. Choi, A. Dominjon, N. Furukawa, H. Ishino, H. Ishitsuka, A. Kibayashi, Y. Kibe, H. Kiuchi, K. Koga, M. Naruse, T. Nitta, T. Noguchi, T. Okada, C. Otani, S. Sekiguchi, Y. Sekimoto, M. Sekine, S. Shu, O. Tajima, K. Takahashi, N. Tomida, H. Watanabe, and M. Yoshida, "Development of Microwave Kinetic Inductance Detector for Cosmological Observations," *IEICE Trans Electron.* 98-C, 207-218 (2015). 査読有
  17. S. Sekiguchi, T. Nitta, K. Karatsu, Y. Sekimoto, N. Okada, T. Tsuzuki, M. Sekine, T. Okada, S. Shu, M. Naruse, A. Dominjon, T. Noguchi, S. Kashima, M. Sekine, T. Okada, S. Shu, M. Naruse, A. Dominjon, T. Noguchi, and H. Matsuo, "Development of a Compact Cold Optics for Millimeter and Submillimeter Wave Observations," *IEEE Transactions terahertz Sci. Technol.* 5, 49 (2015). 査読有
  18. H. Kiuchi, T. Okada, K. Karatsu, and Y. Sekimoto, "A Frequency Sweeping Readout System for Kinetic Inductance Detectors Based on Submillimeter Radio Astronomy," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 5, 456-463 (2015). 査読有
  19. T. Tamura, T. Noguchi, Y. Sekimoto, W. Shan, N. Sato, Y. Iizuka, K. Kumagai, Y. Niizeki, M. Iwakuni, and T. Ito, "Performance and Uniformity of Mass-Produced SIS Mixers for ALMA Band 8 Receiver Cartridges," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 25, 2400305 (2015). 査読有
  20. Y. Sekimoto, A. Dominjon, T. Noguchi, O. Norio, K. Mitsui, Y. Obuchi, M. Sekine, S. Sekiguchi, S. Shu, T. Nitta, and M. Naruse, "Design of MKID focal plane array for LiteBIRD," in *ESA Antenna Workshop (esa, 2015)*. 査読無
  21. Y. Sekimoto, T. Nitta, K. Karatsu, M. Sekine, S. Sekiguchi, T. Okada, S. Shu, T. Noguchi, M. Naruse, K. Mitsui, N. Okada, T. Tsuzuki, and H. Matsuo, "Developments of wide field-of-view MKID cameras for millimeter and submillimeter astronomy," in *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014) (IEEE, 2014)*, pp. 2407-2408. 査読無
  22. Y. Sekimoto, T. Nitta, K. Karatsu, M. Sekine, S. Sekiguchi, T. Okada, S. Shu, T. Noguchi, M. Naruse, K. Mitsui, N. Okada, T. Tsuzuki, A. Dominjon, and H. Matsuo, "Developments of wide field submillimeter optics and lens antenna-coupled MKID cameras," in *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*, W. S. Holland and J. Zmuidzinas, eds. (International Society for Optics and Photonics, 2014), p. 91532P. 査読無
  23. T. Matsumura, et al. "LiteBIRD: mission overview and design tradeoffs," in *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*, J. M. Oschmann, M. Clampin, G. G. Fazio, and H. A. MacEwen, eds. (International Society for Optics and Photonics, 2014), p. 91431F. 査読無
  24. T. Matsumura, et al. "Mission Design of LiteBIRD," *J. Low Temp. Phys.* 176, 733-740 (2014). 査読有
  25. K. Karatsu, M. Naruse, T. Nitta, M. Sekine, S. Sekiguchi, Y. Sekimoto, Y. Uzawa, H. Matsuo, and H. Kiuchi, "Measurement of MKID Performance with High-speed and Wide-band Readout System," *J. Low Temp. Phys.* 176, 459-464 (2014). 査読有

26. T. Nitta, K. Karatsu, Y. Sekimoto, M. Sekine, S. Sekiguchi, T. Noguchi, K. Mitsui, M. Seta, and N. Nakai, "Close-Packed Silicon Lens Antennas for Millimeter-Wave MKID Camera," *J Low Temp. Phys.* 176, 684-690 (2014). 査読有
27. T. Nitta, S. Sekiguchi, Y. Sekimoto, K. Mitsui, N. Okada, K. Karatsu, M. Sekine, H. Matsuo, M. Seta, and N. Nakai, "Anti-Reflection Coating for Cryogenic Silicon and Alumina Lenses in Millimeter-Wave Bands," *J Low Temp. Phys.* 176, 677-683 (2014). 査読有
28. T. Klein, M. Ciechanowicz, C. Leinz, S. Heyminck, R. Gusten, C. Kasemann, J. Wunsch, D. Maier, and Y. Sekimoto, "FLASH+ A Dual-Channel Wide-Band Spectrometer for APEX," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 4, 588-596 (2014). 査読有
29. S. Ishii, M. Seta, N. Nakai, Y. Miyamoto, M. Nagai, H. Arai, H. Maezawa, T. Nagasaki, N. Miyagawa, H. Motoyama, Y. Sekimoto, and L. Bronfman, "Development of a Transportable Telescope for Galactic Survey at 500 GHz in Antarctica," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 3, 15-24 (2013). 査読有
30. T. Nitta, M. Naruse, Y. Sekimoto, K. Mitsui, N. Okada, K. Karatsu, M. Sekine, H. Matsuo, T. Noguchi, Y. Uzawa, M. Seta, and N. Nakai, "Beam Pattern Measurements of Millimeter-Wave Kinetic Inductance Detector Camera With Direct Machined Silicon Lens Array," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 3, 56-62 (2013). 査読有
31. M. Naruse, Y. Sekimoto, T. Noguchi, A. Miyachi, K. Karatsu, T. Nitta, M. Sekine, Y. Uzawa, T. Taino, and H. Myoren, "Optical Efficiencies of Lens-Antenna Coupled Kinetic Inductance Detectors at 220 GHz," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 3, 180-186 (2013). 査読有
32. T. Noguchi, M. Naruse, and Y. Sekimoto, "Contribution of Quasiparticles in the Subgap States to the Surface Impedance of Superconductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 23, 1501404-1501404 (2013). 査読有

(学会発表) (計 9 件)

1. Y. Sekimoto "Design of corrugated-horn-coupled MKID focal plane for CMB B-mode polarization" *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2016 June 26 - July 01, Edinburgh, UK*
2. 関本裕太郎 "CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD" 宇宙電波懇談会 2017-02-22 国立天文台 (東京都・三鷹市)
3. 関本裕太郎 "広視野 MKID カメラの開発" 日本赤外線学会 2016-11-17~18 国立天文台 (東京都・三鷹市)
4. 関本裕太郎 "CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD フェーズ A1 に向けて" 日本天文学会 2016-09-14~16 愛媛大学 (愛媛県・松山市)
5. 関本裕太郎 "LiteBIRD MKID 焦点面検出器の設計" 日本天文学会 2016-03-14~17 首都大学東京 (東京都・八王子市)
6. Y. Sekimoto "Broadband and wide-field focal plane with MKID" *East Asia Submm Receiver Technologies*, 2015-11-22~25 Nanjing, China
7. Y. Sekimoto "MKID focal plane array for LiteBIRD" *B-mode from Space 2015-12-10~16, Univ. of Tokyo Kavli IPMU, Kashiwa, Chiba*
8. Y. Sekimoto "Design of MKID focal plane array for LiteBIRD" *International Symposium on Space Terahertz*, 2015-03-14~16, Harvard University, USA
9. Y. Sekimoto "Developments of wide field-of-view MKID cameras for millimeter and submillimeter astronomy" *European Conference on Antenna and Propagation (EuCAP)*

2014-04-07~11, Den Haag, Netherland

(産業財産権) ○出願状況 (計 1 件) 名称: サブ波長構造素子 発明者: 新田冬夢、関本裕太郎、野田一房、権利者: 国立天文台、雄島試作研究所 種類: 特許 番号: 特願 2015-36092 出願年月日: 2015 年 2 月 26 日 国内外の別: 国内

## 6 研究組織

### (1) 研究代表者

関本裕太郎 (SEKIMOTO YUTARO)

国立天文台・先端技術センター・准教授

研究者番号: 70262152

### (2) 研究分担者

成瀬真人 (NARUSE MASATO)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号: 10638175

### (3) 連携研究者

新田冬夢 (NITTA TOM)

筑波大学・数理物質科学研究科・助教

研究者番号: 40759354

木内等 (KIUCHI HITOSHI)

国立天文台・チリ観測所・准教授

研究者番号: 90358911

野口卓 (NOGUCHI TAKASHI)

国立天文台・先端技術センター・教授

研究者番号: 90237826

松尾宏 (MATSUO HIROSHI)

国立天文台・先端技術センター・准教授

研究者番号: 90192749

岡田則夫 (OKADA NORIO)

国立天文台・先端技術センター・主任研究技師

研究者番号: 20311178