

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 14 日現在

機関番号： 62616  
 研究種目： 基盤研究（A）  
 研究期間： 2009～2012  
 課題番号： 21244023  
 研究課題名（和文） サブミリ波 SIS 256 画素イメージングアレイ検出器の試作  
 研究課題名（英文） Prototyping of a submillimeter 256 pixel imaging array detector  
 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

研究成果の概要（和文）：テラヘルツ領域を含むミリ波帯の広視野高感度天文観測用のイメージングアレイを実現するため、サブミリ波超伝導検出器の試作・開発を行った。宇宙創成のまもないころの低温の天体形成の研究を進める上で、宇宙背景放射を含むミリ波からサブミリ波の広視野高感度観測は極めて重要である。我々は、ALMA 超伝導受信機の開発を通して得た低雑音化や高精度ビームパターン計測の手法を駆使し、極低温 0.1 K にて NEP  $6 \times 10^{-18}$  W/rHz を達成する超伝導 2 次元アレイ検出器 (500 画素) の開発をおこなった。

研究成果の概要（英文）：To realize wide field of view (FoV) and high sensitive observations in the millimeter wavelengths to terahertz, superconducting detector array has been developed. To investigate galaxy formation after the big-bang, submillimeter observations are extremely important. With our heritage of low noise ALMA superconducting detector developments, we demonstrated 500 pixel submillimeter camera with NEP of  $6 \times 10^{-18}$  W/rHz at low temperature of 0.1 K.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	12,700,000	3,810,000	16,510,000
2010 年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2011 年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2012 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
年度			
総計	36,200,000	10,860,000	47,060,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 天文学・天文学

キーワード： 電波カメラ、超伝導検出器、ミリ波・サブミリ波、初期宇宙、テラヘルツ波、極低温装置

## 1. 研究開始当初の背景

サブミリ波天文学の革新をもたらすには、可視光 CCD のようなサブミリ波イメージングアレイ検出器が必要だと考え、ALMA の受信機開発で得た技術的資産を活かして、超伝導イメージングアレイ検出器を開発する着想を得た。

世界的にはアタカマ大型ミリ波サブミリ波 (ALMA) の建設と並行して、ミリ波サブミリ波や X 線用のアレイ検出器の開発が米・欧を中心にすすんできた。おもに Transition Edge Sensor (TES) ボロメータとその読み出し用の SQUID 検出器の進歩によって、ミリ波帯では 1000 素子レベル・NEP 雑音  $10^{-17}$  W/Hz $^{1/2}$  at 100 mK がターゲットとなっている。

今後は、サブミリ波への高周波化、NEP の低減による高感度化、偏波を含む光学性能の改良などの数多くの開発課題が存在する。さらに、将来の 1 万ピクセルへの増加や衛星搭載用低消費電力化などの課題がある。

## 2. 研究の目的

テラヘルツ領域を含むサブミリ波帯の広視野高感度のイメージングアレイを実現するため、超伝導サブミリ波検出器の試作を行う必要がある。宇宙創成のまもないころの低温の天体形成の研究を進める上で、サブミリ波の広視野高感度観測は極めて重要である。

今後、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光を観測する衛星 (LiteBIRD) や遠方銀河の広視野観測をおこなう南極テラヘルツ望遠鏡に搭載することを目指している。LiteBIRD は KEK がリードするプロジェクトで、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の B モード偏光を検出し、宇宙初期にあったと考えられているインフレーションの物理を探る。CMB B モード偏光の観測に特化した小型衛星計画であり、tensor-to-scalar ratio (r) を約 0.001 の精度で測定することを目指している。このような高感度な観測を達成するために、LiteBIRD の焦点面には 2000 素子規模の超伝導体検出器が搭載される計画となっている。

南極テラヘルツ望遠鏡は、筑波大学がリードするプロジェクトで、テラヘルツ帯に大気の窓を持ち、サブミリ波から赤外線において地上で最高の観測環境にある南極高地のドームふじ基地に口径 10m テラヘルツ望遠鏡を設置して南天の高感度広視野検出器をもちいた掃天観

測を行う。それにより、可視光近赤外線では宇宙再電離に必要な銀河の 3 割しか見つかっておらず、残り 7 割が行方不明である「暗黒銀河」の探査を行う。

## 3. 研究の方法

我々は ALMA プロジェクトで開発した超伝導技術・電波光学技術を生かして 1000 素子規模の 2 次元アレイ検出器の開発を目指している。既存の TES ボロメータに比べ、感度が優れたイメージングアレイを開発する。これにより、将来の衛星による超高感度のサブミリ波イメージングが可能となる。

平成 21 年から平成 24 年にかけて、(1) 超伝導膜の高品質化 (2) 入力光学系の設計・試作 (3) 信号多重読出回路の開発をおこない、超伝導カメラシステムの総合評価をおこなった。

## 4. 研究成果

本研究費により、0.1K で動作する 500 素子のサブミリ波超伝導電波カメラを開発した。

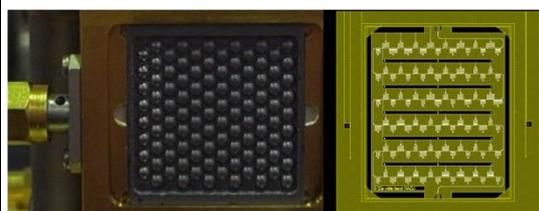


図 1 (左) 内作した 100 画素シリコンレンズアレイ (右) Al 超伝導膜をもちいた 100 素子超伝導検出器

我々の開発した電波カメラは、入射した光子がクーパー対を壊すことによる超伝導薄膜の表面インピーダンスが変化、つまり力学的インダクタンスと抵抗の変化を読み出す。多素子化の際に鍵を握る多重読出には、周波数 2 - 12 GHz に中心周波数をもつ超伝導共振器をもちいる。CPW (co-planar waveguide) という単純な構造をもち、高い歩留まりが期待できる。

電波カメラは、効率よく集光するために、レンズアレイと超伝導平面アンテナが組み合わせられている (図 1)。

レンズの材料には、誘電率が大きく、損失の少ない高純度シリコンが理想的であるが、加工が難しいため、つかわれていなかった。が、高速スピンドルによるシリコン

を切削加工をおこない、電波用シリコンレンズアレイの開発に成功した。

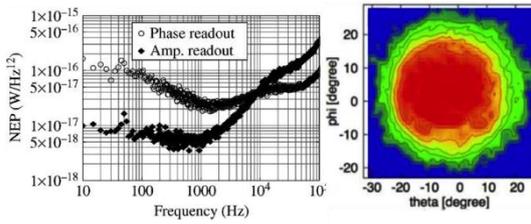


図 2 (左) 開発した電波カメラの dark NEP (M. Naruse + 2013) 振幅雑音は  $NEP \approx 6 \times 10^{-18} \text{ W Hz}^{-1/2}$ , 位相雑音は一桁大きい (右) 超伝導電波カメラの 220 GHz ビームパターン (T. Nitta + 2013)

このシリコンレンズアレイと超伝導カメラを組み合わせ、ビームパターンの測定をおこない、設計値に近いサイドローブ-20 dB レベルの対称性の良いビームを確認した (図 2) (T. Nitta + 2013)。シリコンは、誘電率が大きいために、反射防止膜が必要となるが、この測定時は使われていない。

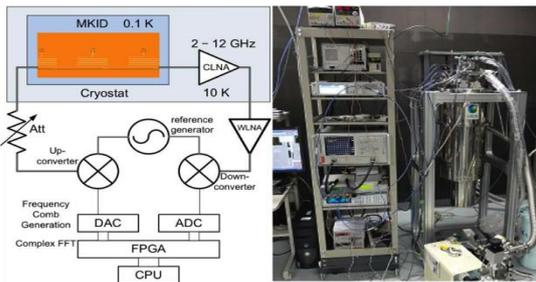


図 3 (左) 電波カメラの周波数多重化の概念図 (右) 電波カメラの 0.1 K 測定システム

野口等は、高品質の超伝導薄膜によりギャップエネルギーの複素成分を減少させ、雑音やロスを減らす研究を進めている (T. Noguchi+2012)。そのために MBE (Molecular Beam Epitaxy) 装置を導入し、Si (111) 基板上にエピタキシャル成長させた Al (111) を成膜した (M. Naruse + 2012)。この結晶 Al-MKID は、electrical NEP  $6 \times 10^{-18} \text{ W Hz}^{-1/2}$  と極めて低い雑音を達成した (図 2)

雑音やビーム測定のための 0.1 K 測定システムの開発もおこなった (図 3) (Naruse 2012 東大 博士論文)。この測定システムは安定に動作している。さらに図 3 で示す

ような周波数多重化した超伝導検出器を読み出す回路も開発し、超伝導カメラ 100 素子同時読み出しを実証した (K. Karatsu + 2012)。

我々は、この超伝導検出器とシリコンレンズアレイを組み合わせ、500 素子規模の電波カメラの開発をすすめている (図 4)。

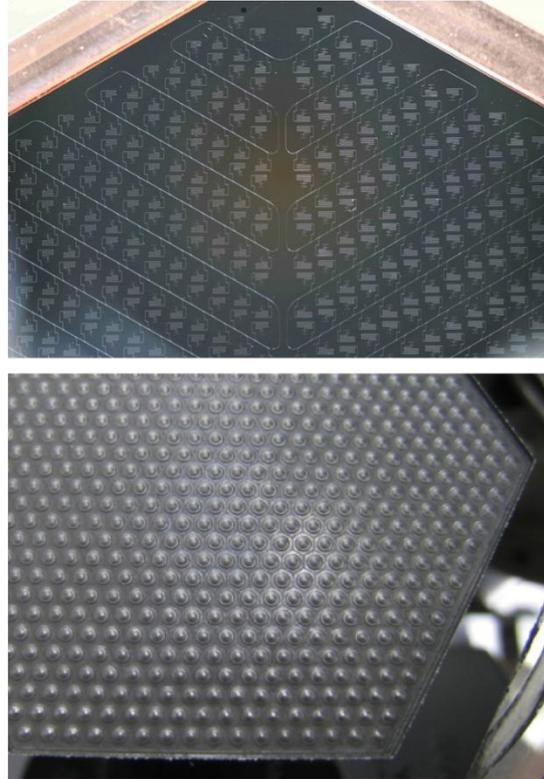


図 4 (上) 500 画素超伝導検出器 (下) 500 画素シリコンレンズアレイ

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- (1) Nitta, T, Naruse, M, Sekimoto, Y, Mitsui, K, Okada, N, Karatsu, K Sekine, M Matsuo, H, Noguchi, T Uzawa, Y Seta, M Nakai, N: 2013 “Beam Pattern Measurements of Millimeter-Wave Kinetic Inductance Detector Camera With Direct Machined Silicon Lens Array” IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 3, 56 - 62, DOI:10.1109/TTHZ.2012.2235123 査読有
- (2) Ishii, S., Seta, M., Nakai, N., Miyamoto, Y., Nagai, M., Arai, H., Maezawa, H., Nagasaki, T., Miyagawa, N., Motoyama, H., Sekimoto, Y., Bronfman, L: 2013 “Development of a Transportable Telescope for Galactic Survey at 500 GHz in Antarctica”, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 3, 15 - 24, DOI:10.1109/TTHZ.2012.2235912 査読有
- (3) Naruse, Masato Sekimoto, Yutaro Noguchi, Takashi Miyachi, Akihira Karatsu, Kenichi Nitta, Tom Sekine, Masakazu Uzawa, Yoshinori Taino, Tohru Myoren, Hiroaki, 2013 “Optical Efficiencies of Lens-Antenna Coupled Kinetic Inductance Detectors at 220 GHz”, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 3 - 2, 180 - 186, DOI:10.1117/12.926743 査読有
- (4) M. Naruse, Y. Sekimoto, T. Noguchi, A. Miyachi, T. Nitta and Y. Uzawa, Development of Crystal Al MKIDs by Molecular Beam Epitaxy, JOURNAL OF LOW TEMPERATURE PHYSICS, 167, 373 - 378 DOI:10.1007/s10909-011-0430-5 査読有
- (5) Y. Serizawa, Y. Sekimoto, M. Kamikura, W. Shan, T. Ito, T. Tamura and T. Noguchi, 2012, Development of a 385-500 GHz Sideband-Separating Balanced SIS Mixer, JOURNAL OF INFRARED, MILLIMETER AND TERAHERTZ WAVES, 33, 999-1017, DOI:10.1007/s10762-012-9917-7 査読有
- (6) Karatsu, Kenichi Naruse, Masato Nitta, Tom, Masakazu Sekine Yutaro Sekimoto Noguchi, Takashi Uzawa, Yoshinori

- Matsuo, Hiroshi Kiuchi, Hitoshi, 2012, Development of 1000 arrays MKID Camera for the CMB Observation, SPIE, 8452, 84520Q doi:10.1117/12.925775 査読無
- (7) T. Noguchi, M. Naruse, Y. Sekimoto, 2012, “RF Conductivity and Surface Impedance of a Superconductor Taking into Account the Complex Superconducting gap Energy”, Physics Procedia, 36, 318-323  
Doi:10.1016/j.phpro.2012.06.166  
査読有

[学会発表] (計 8 件)

- (1) 関本裕太郎 Submillimeter 10k pixel Camera and Imaging Spectroscopy 第13回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ 2013年02月27日~2013年02月28日 名古屋大学 (愛知県)
- (2) Y. Sekimoto: Submillimeter Camera Dome-Fuji Telescope, East Asia Submillimeter Workshop, 2013/01/11, Purple Mountain Observatory (China)
- (3) Nitta, T., : 2012 Beam Pattern Measurements of Millimeter-wave MKIDs Camera with Direct Machined Silicon Lens Array 23rd International Symposium on Space Terahertz Technology 2012 (Tokyo, Japan, Apr. 2-4, 2012).
- (4) Karatsu, K., :2012 Development of 1000 arrays MKID Camera for the CMB Observation 23rd International Symposium on Space Terahertz Technology (Tokyo, Japan, April 2-4, 2012)
- (5) 唐津謙一、宇宙背景放射偏光観測のための多素子超伝導共振器カメラの開発と実験室での実証試験、日本物理学会春季大会、2012年3月24日、関西学院大学 (兵庫県)
- (6) 成瀬雅人、エピタキシャル Al 膜を用いた Kinetic Inductance Detectors の作成と雑音特性評価、応用物理学会、2011年8月29日、山形大学
- (7) 新田冬夢、超伝導共振器を用いたミリ波帯アレイ型検出器の評価、日本天文学会秋季年会、2011年9月15日、鹿児島大学

- (8) 関本裕太郎、MKID-ミリ波サブミリ波検出器で拓く宇宙観測、応用物理学会、2011年8月29日、山形大学

[図書] (計1件)

岡村 定矩 編集、日本評論社、天文学辞典 (シリーズ現代の天文学)、2012、400

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称：超伝導膜表面抵抗推測方法、超伝導膜表面インピーダンス推測方法、超伝導薄膜共振回路Q値推測方法、超伝導膜表面抵抗推測装置、及び、超伝導検出器製造方法  
発明者：成瀬雅人、野口卓、関本裕太郎  
権利者：大学共同利用機関法人自然科学研究機構

種類：特許

番号：特許出願2009-205379

出願年月日：2009年9月5日

国内外の別：国内

○取得状況 (計1件)

名称：超伝導膜表面抵抗推測方法、超伝導膜表面インピーダンス推測方法、超伝導薄膜共振回路Q値推測方法、超伝導膜表面抵抗推測装置、及び、超伝導検出器製造方法  
発明者：成瀬雅人、野口卓、関本裕太郎  
権利者：大学共同利用機関法人自然科学研究機構

種類：特許

番号：特許公開2011-60793

取得年月日：2011年3月24日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<http://atc.mtk.nao.ac.jp/~sekimoto/>

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

該当なし

(3) 連携研究者

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

鵜澤 佳徳 (UZAWA YOSHINORI)

国立天文台・先端技術センター・准教授

研究者番号：00359093

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

唐津 謙一 (KARATSU KEN' ICHI)

国立天文台・先端技術センター・研究員

研究者番号：80624783

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

成瀬 雅人 (NARUSE MASATO)

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：10638175