

平成 31 年 4 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K13491

研究課題名(和文)超伝導転移温度特性を利用した多帯域マルチモード電波検出器の開発研究

研究課題名(英文)Development for multimode radio-detector based on technologies to control a superconducting transition temperature

研究代表者

田島 治 (Tajima, Osamu)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80391704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：全ての電波検出器には「高統計」と「多帯域性」が求められる。本研究ではコンパクトかつ安価に、それらを実現する検出器の開発に挑戦した。超伝導転移温度( $T_c$ )特性を利用して周波数応答を決定することで、アンテナを一切持たないシンプルな構成とする。「周波数応答性はアンテナで定義するもの」という従来の常識を覆す斬新なアプローチと、1素子で従来の100倍もの高統計を実現するアイデアの融合により「高感度でもコンパクトかつ安価」な検出器を目指した。感度帯域を定義するために超伝導膜の転移点をコントロールする手法を確立し、また、検出器信号を読み出す回路と制御・解析ソフトウェアを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導素子は従来の半導体素子と比較して千分の一もの細かな目盛りで計測出来る技術である。超伝導素子を使った検出器により、近年活発に産業応用されているミリ波をはじめとした種々の計測技術が高感度化する。そして、本研究成果はミリ波に対する有感帯域をコントロールする新たな手法を確立した。また、その読み出しエレクトロニクスもまた、超伝導技術を用いた量子コンピュータのビット数を増やす基礎技術となっている。

研究成果の概要(英文)：A compatibility of "high statistics" and "large frequency coverage" is important for any application by using radio detection devises. We have developed a novel multimode detector based on technologies to control a superconducting transition temperature ( $T_c$ ). A principle of the multimode detector satisfies both the "high statistics" and the "large frequency coverage". However, it is difficult to define a sensitive frequency band without any antenna. This research suggest to define the sensitive band with a control of the  $T_c$  because a lower edge of sensitive band depends on the transition temperature of the superconducting material. We established methodology to control  $T_c$  based on technology forming multi-layer films. We also developed a readout electronics and its software.

研究分野：宇宙・素粒子物理学実験

キーワード：超伝導検出器 ミリ波

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

全ての電波検出器には「高統計」と「多帯域性」が求められると言っても過言ではない。現在、主流のアンテナ結合検出器は、1素子で1モードしか検出できないため多素子化が必須となる。しかも、周波数帯域毎にアンテナが異なる。結果として、高統計・多帯域性の追求には複雑さと多額の経費を伴う。

### 2. 研究の目的

上記の背景を打破することを目的とし、本研究はコンパクトかつ安価に、高統計・多帯域性を実現する検出器の開発を目指した。超伝導転移温度特性を利用して周波数応答を決定するため、アンテナを一切持たないシンプルな構成となる。しかも、圧倒的な数のモード数を実現する(150 GHz帯では1素子で100モード)。「周波数応答性はアンテナで定義するもの」という従来の常識を覆す斬新なアプローチと、1素子で従来の100倍もの高統計を実現するアイデアの融合により、「高感度でもコンパクトかつ安価」な検出器の開発を目指した。

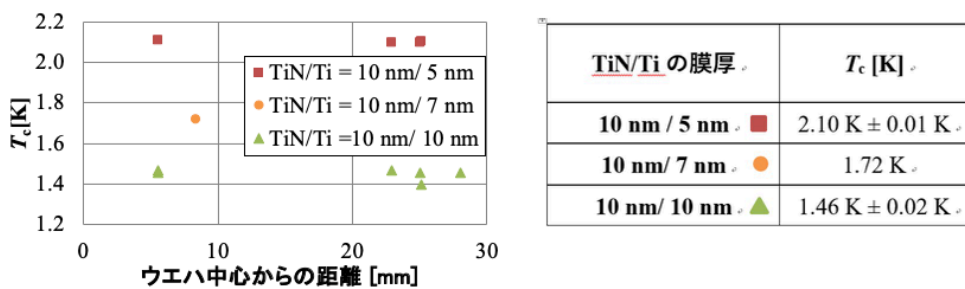
### 3. 研究の方法

超伝導膜の大面積パターンと転移点コントロールにより、高統計と多帯域性を実現する検出器を開発する。初年度は、本研究のアイデアの原理検証を最優先とし、設計・製作、評価という一連のサイクルをこなし、そこからデザインフィードバックをかけることに注力した開発をおこなう。次年度以降は、製作条件を確立し、シンプルかつ高性能を安定して供給できることを、評価装置を使って示す。初年度で原理検証が十分に達成されなかった場合、その原因は製作条件のチューニングが問題になる可能性が高い。条件確立という地道な努力は避けて通れない。そして3年度目以降には、検出器を読み出すエレクトロニクスの開発も行った。

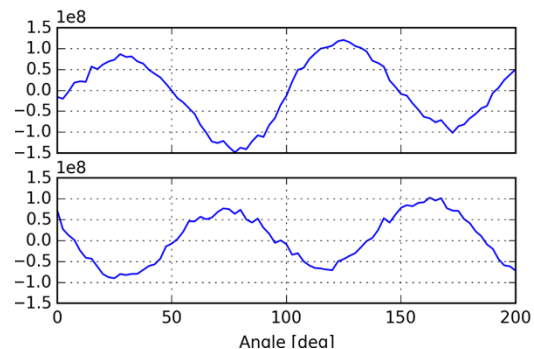
研究グループの電波検出器開発に関する実績と設備を生かして開発を進めてきた。特に、本研究に応用する超伝導材の成膜技術に関する実績を生かした。装置開発の3要素(設計、製作、評価)と要素間のフィードバックを、研究チームが相互に協力して行い、効率的に開発を進めた。

### 4. 研究成果

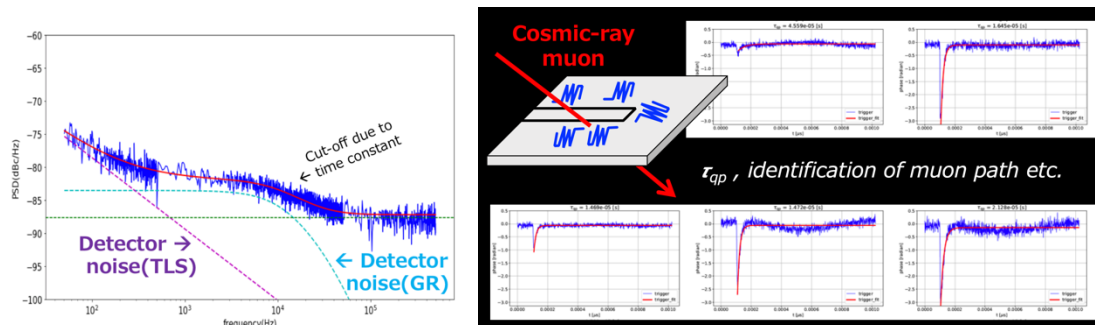
- (1) CMB観測周波数帯に $T_c$ をチューニングできることが要求される(例えば150 GHz帯の検出器用には $T_c=1.8$  K)。本研究に先立ち、TiN/Ti積層薄膜の層数を変えることにより、超伝導膜の $T_c$ をコントロールする手法の開発に着手していた。本研究によってこの技術を確立した。さらに、基盤上での一様性(3インチ基盤上で $\pm 0.1$  K以内)を保証することの2点を追求し達成した。



- (2) 既存のアルミニウム単層の検出器を製作し、それを用いた偏光応答性等の試験環境を開発した。検出器を0.23ケルビンに冷却し、外部から偏光信号を照射する試験も行い、偏光信号の変調を確認した。なお、受信機内部の冷却に際しては、先行研究で開発した特許技術(特許第6029079号)を利用することにより、冷却性能の向上に成功した。右図はその一例である。偏光の向きを変える変調によって検出器の応答が期待通りに変化していることがわかる。



- (3) 作成した超伝導素子の評価実験を効率的に行うために、読み出しエレクトロニクスの機能の整備とそれを用いた測定ソフトウェアの開発を行なった結果、素子の周波数特性を自動で測定し、個々の素子に対してそのノイズスペクトルを測定可能となった（下図左側）。また、トリガー機能も新たに追加開発することにより、ミリ波だけでなく放射線に対する時間応答性も測定可能になった。下図右側は、宇宙線ミュオンを計測した例である。トリガー機能の実装により、本研究の成果が電波計測のみならず、可視光や放射線計測という新用途の開拓を積極的に行えるようになった。



- (4) エレクトロニクスとその制御ソフトウェアを開発した副産成果として、素子の周波数特性を自動で測定することが可能になった。この機能を生かし、検出器の応答性能をシンプルかつ短時間で測定する手法を考案した。本研究グループが実際に作成した超伝導検出器を使用して、実データに基づきこの新手法の正しさと有用性を確認した。本成果は間も無く論文投稿予定である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① T. Nagasaki, J. Choi, R. T. Genova-Santos, M. Hattori, M. Hazumi, H. Ishitsuka, K. Karatsu, K. Kikuchi, R. Koyano, H. Kutsuma, K. Lee, S. Mima, M. Minowa, M. Nagai, M. Naruse, S. Oguri, C. Otani, J. A. Rubine-Martín, T. Taino, O. Tajima, M. Yoshida, “GroundBIRD: Observation of CMB Polarization with a Rapid Scanning and MKIDS”, Journal of Low Temperature Physics. 193. (2018).  
査読有り、DOI: 10.1007/s10909-018-2077-y.
- ② H. Kutsuma, M., Hattori, K. Kiuchi, S. Mima, T. Nagasaki, S. Oguri, J. Suzuki, O. Tajima, Journal of Low Temperature Physics. 193. (2018).  
査読有り、DOI: 10.1007/s10909-018-2036-7.
- ③ J. Suzuki, H. Ishitsuka, K. Lee, S. Oguri, O. Tajima, N. Tomita, Journal of Low Temperature Physics (2018) 193: 562.  
査読有り、DOI: <https://doi.org/10.1007/s10909-018-2033-x>
- ④ H. Watanabe, S. Mima, S. Oguri, M. Yoshida, M. Hazumi, H. Ishino, H. Ishitsuka, A. Kibayashi, C. Otani, N. Sato, O. Tajima, N. Tomita, “Development of an Optical Coupling with Ground-side Absorption for Antenna-coupled Kinetic Inductance Detectors”, IEICE TRANS. ELECTRON, E100-C, No. 3, pp. 1-7 (2017)  
査読有り、DOI: 10.1587/transele.E100.C.298
- ⑤ O. Tajima, K. Araki, H. Ishimoto, T. Nagasaki, “Sensing of the Atmospheric Water Vapor with Millimeter Wave Spectrometer - KUMODES”, Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), 巻なし, 4157-4161 (2016).  
査読なし、DOI:10.1109/PIERS.2016.7735564

[学会発表] (計 17 件)

- ① O. Tajima, “GroundBIRD”, CMB foregrounds for B-mode studies, Tenerife, Spain, 2018. 10. 15-18. (招待講演)
- ② O. Tajima and R. G. Santos, “CMB Polarization at Canary Islands - QUIJOTE and GroundBIRD,” Large Infrastructures for Astrophysics Synergies and Cooperation between Spain and Japan, Tokyo, 2018. 3. 7. (招待講演)
- ③ S. Mima, J. Choi, R. Génova-Santos, M. Hattori, M. Hazumi, H. Ishitsuka, F. Kanno, K. Karatsu, K. Kiuchi, R. Koyano, H. Kutsuma, K. Lee, M. Minowa, M. Nagai, T. Nagasaki, M. Naruse, S. Oguri, C. Otani, R. Rebolo Lopez, J. Rubiño-Martín, Y. Sekimoto, M. Semoto, J. Suzuki, T. Taino, O. Tajima, N. Tomita, T. Uchida, E. Won, M. Yoshida, “Performance evaluation of MKIDs on a high-speed rotating system for CMB telescope: GroundBIRD”, SPIE Astronomical Telescopes+Instrumentation, Austin, USA, 2018. 6.

- ④ C. Otani, GroundBIRD collaboration, “CMB polarization experiment GroundBIRD,” in ‘Joint Workshop of 19th East Asia Submillimeter-Wave Receiver Technology Workshop and 5th RIKEN-NICT Joint Workshop of Terahertz Technology,’ Nishinomiya, 2018. 12. 11-13.
- ⑤ Q. Tajima and R. G. Santos, “CMB Polarization at Canary Islands - QUIJOTE and GroundBIRD”, Large Infrastructures for Astrophysics Synergies and Cooperation between Spain and Japan, 2018 Mar. 7, 東京・スペイン大使館 (招待講演)
- ⑥ Q. Tajima, “GroundBIRD - KIDs meet the cosmic inflation”, Exploring the Energetic Universe, the inaugural international conference of the Energetic Cosmos Laboratory (ECL), カザフスタン・アスタナ, Aug. 6-13 (2017). (招待講演)
- ⑦ M. Semoto, S. Mima, K. Kiuchi, M. Naruse, C. Otani, Q. Tajima, S. Oguri, J. Suzuki, R. M. T. Damayanthi, and T. Taino, “Development and evaluation of Multi-Layer Superconducting detectors for the CMB polarization observation,” 30<sup>th</sup> International Symposium on Superconductivity (ISS2017), イイノホール&カンファレンスセンター, 2017/12/15
- ⑧ 田島治, “GroundBIRD 実験と関連技術の動向・展望”, 宇電懇シンポジウム FY2017「未来を拓く技術開発とその将来展望」, 2018年3月20日 (招待講演)
- ⑨ 瀬本宗久, 美馬覚, 木内健司, 明連広昭, 成瀬雅人, 大谷知行, 田島治, 小栗秀悟, 鈴木惇也, 田井野徹, “Ti/TiN 積層膜を用いて CMB 偏光観測に最適化した KIDs の作製と評価,” 第 78 回応用物理学学術講演会, 福岡サンパレスホテル, 2017/9/6
- ⑩ 田島治, “簡単・便利な超伝導計測 - 100 倍精度の計測を非専門家の手で”, 第 1 回 TIA かけはし 成果報告会, 筑波大学 東京キャンパス文京校舎, 2017年7月4日 (招待講演)
- ⑪ Q. Tajima, “Quest for the origin of the Big Bang Universe by using cutting-edge superconducting detectors, KIDs”, International Workshop on Superconductivity and Related Functional Materials 2016 (IWS- RFM2016), 2016 12/20-22, 物質材料研究機構 (茨城県つくば市) (招待講演)
- ⑫ R. Koyano, K. Kiuchi, S. Mima, H. Myoren, M. Naruse, S. Oguri, C. Otani, M. Semoto, Q. Tajima, and T. Taino, “Development of large-scale array of superconducting detectors for the CMB polarization measurement,” 29<sup>th</sup> International Symposium on Superconductivity (ISS2016), 東京国際フォーラム, 2016/12/14
- ⑬ 瀬本宗久, 古谷野凌, 美馬覚, 木内健司, 明連広昭, 成瀬雅人, 大谷知行, 田島治, 小栗秀悟, 田井野徹, “CMB 偏光観測用検出器に用いる Nb-MKIDs の試作と評価,” 第 77 回応用物理学学術講演会, 新潟トキメッセ, 2016/9/15
- ⑭ 古谷野凌, 瀬本宗久, 美馬覚, 木内健司, 成瀬雅人, 明連広昭, 大谷知行, 田島治, 小栗秀悟, 田井野徹, “CMB 偏光観測に向けた超伝導検出器の大規模アレイの開発,” 第 77 回応用物理学学術講演会, 新潟トキメッセ, 2016/9/15
- ⑮ Q. Tajima, “GroundBIRD - KIDs meet the cosmic inflation”, 5th Workshop on the Physics and Applications of Superconducting Microresonators, 2016 6/22-24, ミラノ (イタリア)
- ⑯ Q. Tajima, “CMB Polarization - recent & future”, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEKPH2016), 2016. 02. 09-2016. 02. 12, 茨城県つくば市 (招待講演)
- ⑰ 古谷野凌, 美馬覚, 成瀬雅人, 明連広昭, 大谷知行, 田島治, 田井野徹, “Ti/TiN 積層膜を用いた力学インダクタンス検出器の性能評価”, 応用物理学会・第 76 回応用物理学学術講演会, 2015. 09. 15, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市)

〔図書〕 (計 1 件)

- ① 田島治、アドコム・メディア株式会社、OplusE 2017 年 6 月号 (第 451 号) 特集記事 “クモデス-ミリ波分光で竜巻・ゲリラ豪雨の「予兆の予兆」を捉える”

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 1 件)

名称：放射測定器

発明者：田島治、長崎岳人

権利者：大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

種類：特許

番号：特許第 6019508 号

取得年：2016 年 (2016 年に出願)

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/CMB/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：田井野 徹

ローマ字氏名：(TAINO, Tohru)

所属研究機関名：埼玉大学

部局名：大学院理工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：40359592

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：大谷 知行

ローマ字氏名：(OTANI, Chiko)

※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、研究者個人に帰属されます。