

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610065

研究課題名(和文) CMB偏光望遠鏡のための偏光感度変調超伝導TESボロメータシステムの開発

研究課題名(英文) Development of superconducting TES bolometer system with polarization sensitivity modulation for CMB polarization telescope

研究代表者

都丸 隆行 (Takayuki, TOMARU)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・准教授

研究者番号：80391712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導TESボロメータのバイアスに交流電気変調をかけ、信号帯域を高周波域に移行させることで、宇宙マイクロ波背景放射偏光望遠鏡の低周波域で問題となる $1/f$ ノイズの影響を低減するアイデアの実証実験を実施した。まず、TESボロメータの電流電圧特性(IVカーブ)を計測し、TESボロメータが安定に動作しうる印加バイアスの中央値と交流変調の振幅を決定した。その後、150GHzのミリ波をTESボロメータに入射し、交流バイアス変調で確かにミリ波信号が高周波域に移行出来ることを確認した。また、変調周波数はボロメータの時定数と同程度の1300Hzまで可能な事が分かった。以上より、本提案を実証することが出来た。

研究成果の概要(英文)：We performed experimental verification of an idea that reduction of  $1/f$  noise effect in CMB polarization telescope by using AC modulated bias for superconducting TES bolometer to move signal band to high frequency range. In first, we measured IV curve of TES bolometer and decided best operation bias and modulation amplitude to operate TES bolometer in stable. In the condition, 150GHz millimeter wave was irradiated into the TES bolometer and we confirmed that millimeter wave signal was moved to high frequency range. And we also confirmed that the highest modulation frequency to operate TES in stable was 1300Hz, which is comparable with bolometer time constant. Therefore, we verified this measurement idea.

研究分野：宇宙物理

キーワード：超伝導センサー 宇宙マイクロ波背景放射

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 超伝導転移端を用いた高精度の光センサーは 1940 年代にはすでに提案されていたが、その急峻過ぎる転移端をうまく活用出来るようになったのは 1990 年代に伝熱フィードバックが開発されてからである。この発明により超伝導転移端ボロメータ (TES ボロメータ) は飛躍的に発展し、現在ミリ波・テラヘルツ分野の先端研究で利用が広がりつつある。

(2) TES ボロメータは、宇宙マイクロ波背景放射観測の焦点面検出器としても主役になっている。宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は、宇宙誕生から僅か 38 万年後に放射された黒体輻射の名残であり、その中心周波数は 160GHz 付近である。160GHz 帯では、TES ボロメータがもっともノイズの低い検出器の一つであり、多くの CMB 望遠鏡に搭載されている。特に、近年 CMB の偏光観測からインフレーション宇宙論を検証しようとする実験が注目を集めており、偏光アンテナを搭載した TES ボロメータが開発されている。また、本格的な CMB 偏光観測のために、いくつかの観測衛星も計画されている。

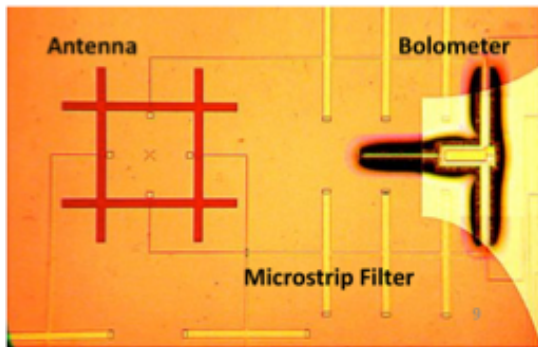


図 1: 宇宙マイクロ波背景放射偏光望遠鏡 POLARBEAR-1 で用いられているアンテナカップル超伝導 TES ボロメータの写真

(3) TES ボロメータや読み出しに用いる SQUID では、低周波域が  $1/f$  の周波数特性を持つノイズにより制限されることがある。特に地上望遠鏡を用いた CMB の偏光観測では、この  $1/f$  ノイズが主要なノイズになる。このため、検出器や半波長板を機械的に回転させる事により CMB 偏光方向に変調をかけ、低周波の  $1/f$  ノイズ低減を図るテクニックが必須となっている。しかし、これらの機械的変調方法は、変調周波数を高くすることが難しく、 $1/f$  ノイズの影響を完全に除去するのは容易ではない。また、機械式変調方法では将来計画されている観測衛星などに採用するにはリスクが大きいという問題もある。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、従来の機械式変調方法とは全く異なる電気的変調方法で  $1/f$  ノイズの低減を試みる。TES ボロメータは安定な動作点を維持するため、弱いバイアス電圧 ( $100\mu\text{V}$  程度) をかけて用いられる。超伝導転移端では僅かに抵抗が残っているためこのバイアスによりジュール熱を生じるが、冷えすぎると抵抗が増えてジュール熱が増加し、反対に暖まりすぎると抵抗が増えてジュール熱が低下するため安定に動作点を固定することが出来る (電熱フィードバック)。

(2) したがって、この電熱フィードバックの時定数 (通常 kHz 程度) よりも遅い変調をバイアス電圧にかければ、ボロメータの動作点を振動させる事が出来る。転移端は極めてシャープなため、バイアス変調によるボロメータ感度の変調はサイン波的にはならないが、変調振幅を適切に設定することにより Dicke switch のように感度を ON/OFF 動作させることができる。このような ON/OFF 動作によりミリ波信号を変調周波数の高周波域に移行させる事が出来、低周波の  $1/f$  ノイズの影響を除去することが可能となる。

(3) この方法は純粋な電気的変調であるため、故障の確率が低く、容易に  $1/f$  ノイズの及ばない高周波域へ信号を移行することが出来る。本研究では、実験的にこのアイデアの原理検証を行うことを目的としている。

### 3. 研究の方法

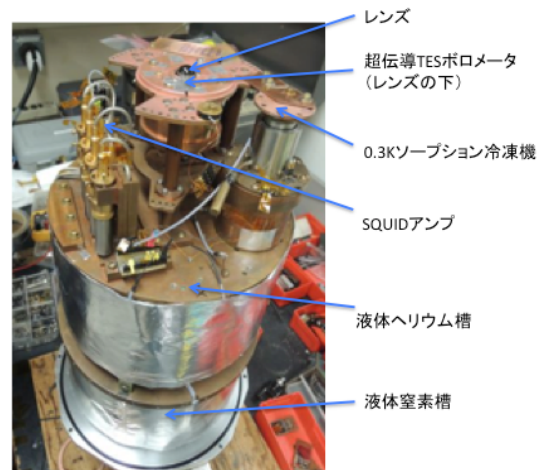


図 2: TES ボロメータおよび読み出し用 SQUID アンプ、冷却系のセットアップ。

(1) 実験ではまず、超伝導 TES ボロメータのセットアップを行った。図 2 はセンサー部のセットアップ写真である。センサーの基本構成は図 1 と同様である。この実験で用いた超伝導 TES ボロメータは Al-Ti bilayer で出来ており、超伝導転移温度は約 0.5K、センサーチップの最適温度 (ノイズが最小となる温度) は約 0.3K である。0.3K の超低温は冷却

自身が容易ではない。本実験では、小型の液体ヘリウムデュワーに  $^3\text{He}$  ソープション冷凍機を搭載することで 0.3K を実現した。ソープション冷凍機はワンショット型冷凍機であり、冷却の持続時間は約 10 時間であった。ボロメータの読み出しには SQUID アンプを用いた。また、このセンサーの感度の中心周波数は 150GHz であり、シリコン製の集光レンズを介して外部から入射するミリ波を受光出来るようになっている。

(2) 図 3、図 4 は光学系の実験セットアップである。150GHz 帯のミリ波光源にはあまり良いものが無く、我々のこれまでの研究で高温仕様の小型セラミックヒーターの黒体放射を用いるのがよいことが分かっている。本実験でもこのセラミックヒーターを光源に用いた。光源の前にはチョッパーを設置し、300K とヒーター（およそ 1000K 程度）の温度差  $\Delta T$ （それぞれに輻射率がかかるので、実際の温度差は 200K 程度と推定される）の信号を入射するようになっている。この写真では分光器がセットされているが、分光器は反射に用いているだけである。入射光は超高分子ポリエチレン製のレンズで集光し、デュワー下部の光学ウィンドウを通して TES ボロメータセンサーへ入射するようになっている。

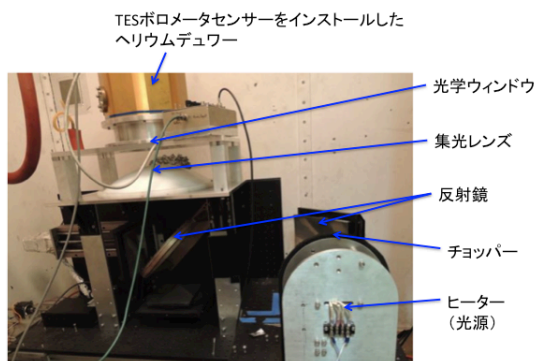


図 3 : 光学系セットアップ

(3) 図 4 はセットアップと測定系の模式図である。ボロメータへ加えるバイアスは、DC 電源とシンセサイザーを直列に繋ぎ、DC バイアスのオフセットに交流変調を加える形にした。また、ヒーター光源の 150GHz ミリ波には、チョッパーで強度変調をかける。したがって、TES ボロメータセンサーは、チョッパーの光学的な変調と TES ボロメータへのバイアス変調による感度の ON/OFF 変調の 2 つの変調を受けて信号出力をする。この 2 つの変調が掛け合わされることで、出力信号には光学変調、TES 感度変調、これら 2 つのビートが現れるはずであり、スペクトラムアナライザーでこれらの信号解析を行う。

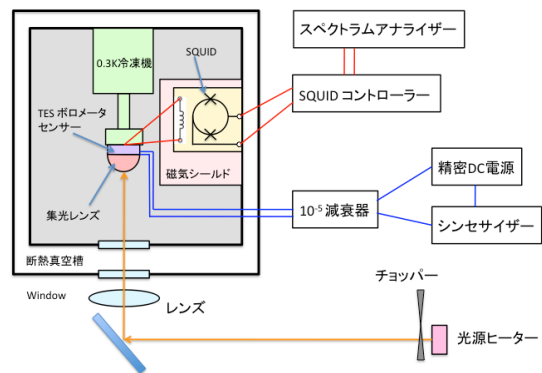


図 4 : セットアップと測定系の模式図

#### 4. 研究成果

(1) まず最初に TES ボロメータに印加する最適な DC バイアスおよび交流バイアスの大きさを決定する必要がある。そこで、用いた TES ボロメータの電流電圧特性 (IV カーブ) を測定した。図 5 は測定した IV カーブである。ボトム右側直線部分が TES の常伝導状態、ボトムの左側カーブ部分が転移端、一番左の急激に電流値が発散している部分が超伝導状態を表す。超伝導状態になってしまうと、電熱フィードバックを作動させる事が出来なくなってしまうため、本実験で目指す感度 ON/OFF 変調実現のためには、IV カーブのボトム付近を中心に常伝導状態と転移端内でバイアスの設定を行う必要がある。この測定結果から、TES ボロメータへの DC バイアスオフセットは 10.77V、交流バイアスの振幅は  $\pm 1.30\text{V}$  を用いる事に決定した。これは DC 電源とシンセサイザーの値であり、TES ボロメータに実際に印加されるのは減衰器で  $10^{-5}$  倍された値である。

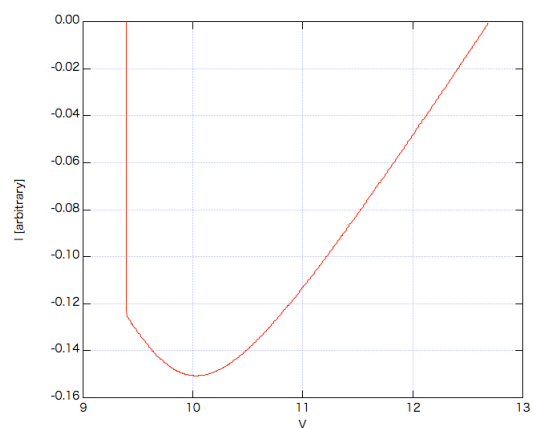


図 5 : 超伝導 TES ボロメータの電流電圧特性

(2) 決定したバイアス条件で TES ボロメータを駆動させ、チョッパーで強度変調をかけたミリ波信号を入射した場合の出力信号のスペクトラム解析結果が図 6 である。この実験では、Chopper によるミリ波強度変調周波数を 12Hz、TES ボロメータへの交流バイアス周



波数、つまり TES ボロメータの感度の ON/OFF 変調周波数を 35Hz とした。図 6 で明らかなように、Chopper によるミリ波強度変調の 12Hz および TES 交流バイアスの 35Hz に対応したピークに加え、これらのビート（サイドバンド）信号が 23Hz と 47Hz に現れている。このサイドバンドは TES ボロメータの感度変調により光学信号が高周波へ移行させることが出来たことを表している。

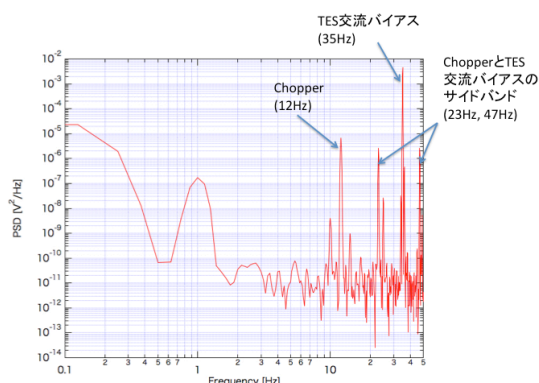


図 6：本実験の測定結果。Chopper による光学的強度変調と TES 交流バイアスによる感度変調のサイドバンドが確認できる。

(3) さらに、TES 交流バイアスの周波数を変化させて実験を試みた。この結果、交流バイアスの周波数が 1300Hz までは安定に動作させる事が出来る事が分かった。この周波数は TES ボロメータで電熱フィードバックが安定に動作する時定数に対応しており、TES ボロメータを動作させる原理的上限の周波数まで、変調運転出来る事が分かった。

(3) 以上のことから、本実験で提案した TES ボロメータ感度の電気的変調による信号の高周波側への移行は、原理的に実現出来る事が証明された。これにより 1/f ノイズを効率良く低減出来ると考えられる。このような方法での高感度化の試みは前例がなく、将来の観測衛星等信頼性が求められる機器では活躍出来る可能性がある。よって、本実験での萌芽的な研究は成功したと結論づけられる。

(4) 次のステップとしては、より実用的なレベルまで検出方法を深化させる必要があると考えている。具体的には感度の ON/OFF 変調で生まれる観測時間の減少や TES 素子のマルチチャンネル化などである。これらについても積極的に研究を継続したいと考えている。

##### 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 4 件)

- (1) P.A.R. Ade, T. Tomaru, et al.,

“Measurement of the Cosmic Microwave Background Polarization Lensing Power Spectrum with the POLARBEAR Experiment”, Phys. Rev. Lett. 113, 021301 (2014), DOI: 10.1088/0004-637X/794/2/171, 査読有り

- (2) P.A.R. Ade, T. Tomaru, et al., “Evidence for Gravitational Lensing of the Cosmic Microwave Background Polarization from Cross-Correlation with the Cosmic Infrared Background”, Phys. Rev. Lett. 112, 131302 (2014), 査読有り, DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.131302

- (3) POLARBEAR Collaboration, “A Measurement of the Cosmic Microwave Background B-Mode Polarization Power Spectrum at Sub-Degree Scales with POLARBEAR”, ApJ, 794, 171 (2014), DOI: 10.1088/0004-637X/794/2/171, 査読有り

- (4) Yuki Inoue, Takayuki Tomaru et al., (7 番目/8 人) “Cryogenic infrared filter made of alumina for use at millimeter wavelength”, Applied Optics 53 (2014), 1727-1733, 査読有り

[学会発表] (計 4 件)

- (1) 都丸隆行, “重力波天文学”, 電子情報通信学会宇宙航行エレクトロニクス研究会 (特別講演), 2014. 06. 19, 茨城県つくば市宇宙研究開発機構
- (2) 都丸隆行 他, “POLARBEAR-2 レシーバシステムの開発”, 日本物理学会秋季大会, 2013. 09. 20, 高知県高知市
- (3) Takayuki TOMARU, “The POLARBEAR-2 Experiment”, CMB2013 (招待講演), 2013. 06. 13, 沖縄県・沖縄科学技術大学院大学
- (4) 都丸隆行, “宇宙マイクロ波背景放射望遠鏡 POLARBEAR-2 の開発”, メカワークショッップ, 2013. 04. 12, 茨城県つくば市高エネルギー加速器研究機構

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

<http://cmb.kek.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

都丸 隆行 (TOMARU Takayuki)  
高エネルギー加速器研究機構・  
超伝導低温工学センター・准教授  
研究者番号：8211899922

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

- ① Toki Suzuki, University of  
California, Berkeley, Post  
Doctoral fellow
- ② 堀泰人, University of California,  
Berkeley, 海外特別研究員