

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03523

研究課題名（和文）三次元位置検出型マイクロカロリメータの開発

研究課題名（英文）Development of 3-D position-sensitive microcalorimeters

研究代表者

伊豫本 直子（Iyomoto, Naoko）

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：40508173

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,400,000円

研究成果の概要（和文）：ガンマ線検出用の超伝導転移端温度計（TES）型マイクロカロリメータを開発した。体積1 mm x 1 mm x 0.7 mmのビスマス吸収体を使用した単ピクセル素子で1.17 MeVのガンマ線に対して0.88 keVのエネルギー分解能を得た。19 mm x 0.5 mm x 0.5 mmの鉛吸収体を使用した位置検出型素子で662 keVのガンマ線に対して1 mm程度の位置分解能を実現した。20 mm x 1 mm x 1 mmのビスマス吸収体を使用した位置検出型素子で両端読み出しに成功した。シミュレータを開発して、実測の信号パルス波形をよく再現する結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では従来のガンマ線検出器のエネルギー分解能を1桁程度改善することを目指すとともに、TES型マイクロカロリメータでの位置検出を試みている。ガンマ線分光・撮像は基盤技術であり、その高度化は多くの分野へ波及する。

研究成果の概要（英文）：We developed transition-edge-sensor (TES) microcalorimeters for gamma rays. The energy resolution of a single-pixel device with a 1 mm x 1 mm x 0.7 mm bismuth absorber was 0.88 keV for 1.17 MeV gamma rays. We fabricated position-sensitive TES devices with a 19 mm x 0.5 mm x 0.5 mm lead absorber and obtained 1 mm position resolution for 662 keV gamma rays. We also fabricated a position-sensitive TES device with a 20 mm x 1 mm x 1 mm bismuth absorber. We modeled the position-sensitive devices and the actual and simulated pulses were in good agreement.

研究分野：放射線計測

キーワード：放射線 分光 超伝導

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

マイクロカロリメータは放射線のエネルギーを温度上昇として測定する熱計測型の放射線検出器であり、図1のように、放射線を吸収して熱に変換する吸収体、温度測定のための温度計、測定後の熱を熱浴へ捨てるためのメンブレンからなる。マイクロカロリメータは優れた分光性能(エネルギー分解能)を持ち、特に温度計として超伝導体の超伝導と常伝導の転移端を利用する方式のTES (Transition-Edge Sensor) 型では、原理的には半導体検出器などの電荷計測型の放射線検出器に比べて1~2桁優れた分光性能が得られる。研究開発当初、TES型マイクロカロリメータはX線用や数百keV程度までのガンマ線用では優れた性能が得られていたが、それより高いエネルギーではそれほど開発が進んでいなかった。



図1 単ピクセルTES型マイクロカロリメータの(a)概念図と(b)(c)写真

### 2. 研究の目的

本研究では、数百keVから数MeVのガンマ線に対する分光性能を従来の検出器から1桁向上させることを目的として位置検出型のTES型マイクロカロリメータの開発を行なった。高エネルギーのガンマ線に対して十分な検出効率を得るには大きな体積を持つガンマ線吸収体が必要であるが、吸収体のサイズが大きくなるとガンマ線が吸収体のどの位置に入射したかで熱が温度計に伝わるまでにかかる時間が異なり、出力信号波形が入射位置によって異なる位置依存性が現れる。マイクロカロリメータの通常信号処理では信号波形が一定であると仮定しているためこれでは本来の分光性能が達成できない。本研究ではあえて細長い吸収体を使用した上で入射位置の特定をまず行ない次に位置ごとに信号処理することでこの問題を回避する。図3(a)(b)のように吸収体の両端に1つずつ温度計を取り付けて2つの温度計からの出力を比較することで1次元の位置検出が可能となる。さらにこの検出器を2次元アレイ状に並べれば3次元の位置検出能力が得られる。

### 3. 研究の方法

マイクロカロリメータ素子のうち吸収体以外の温度計などの部分は微細加工により製作して、その後、温度計の上に低温用の接着剤で吸収体を接着することで素子を製作した。製作した素子を無冷媒希釈冷凍機を使用して100mK程度の極低温に冷却して、熱的特性や電気的特性を測定し、ガンマ線を照射して性能評価した。製作した素子の動作を理解し設計を改善することを目的としてシミュレータを開発した。

### 4. 研究成果

#### (1) 単ピクセル素子の開発

まず構造が単純な図1のような単ピクセル素子で開発を行い、その結果を位置検出型素子へ適用した。図1(b)(c)は本研究で製作した単ピクセル素子である。吸収体はX線用のTES型マイクロカロリメータで実績があるビスマスを0.7mm×1mm×1mmに切り出して使用した。

大きな吸収体を支えるメンブレンには機械的強度が必要なため、SOI (Silicon-On-Insulator) 基板を利用して厚さ5μm程度のシリコンのメンブレンを作成した。このメンブレンについて、一般的に使用されている厚さ1μm程度の窒化シリコンのメンブレンと同様に熱伝導が距離によらないことを、メンブレンやTES温度計のサイズを変えた素子を作成して熱伝導度を測定することで確認した。

ガンマ線のエネルギーが高いと基板でのコンプトン散乱による温度揺らぎが原因となりエネルギー分解能が悪化することが事前の研究により明らかになっていたため、本研究開始前の素子に比べて基板の体積を2分の1にした素子(図1(b))と4分の1にした素子(図1(c))を製作して、基板でのコンプトン散乱の計数率を吸収体での計数率と比較し、エネルギー分解能への影響を調べた。その結果、基板でのコンプトン散乱の計数率が基板の体積に比例することと、現在の基板サイズではエネルギー分解能への影響は小さいことがわかった。図2は図1(b)の素子

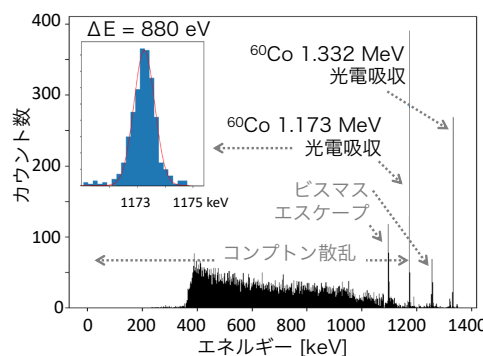


図2 単ピクセルTES型マイクロカロリメータのエネルギースペクトル

の測定結果である。Co-60 からの 1.17 MeV と 1.33 MeV のガンマ線に対するエネルギー分解能は 0.88 keV と 0.97 keV だった。この素子の動作温度は 171 mK であり、動作温度を 100 mK 程度まで下げることでエネルギー分解能を 3～4 倍程度改善できると考えられる。

## (2) 鉛を吸収体とした位置検出型素子の開発

図 3 (a) (b) のように 2 つの T E S 温度計素子を銅板に固定してその 19 mm × 0.5 mm × 0.5 mm のガンマ線吸収体を接着して位置検出型素子を製作した。吸収体はビスマスと同様に原子番号が大きく比熱が小さい一方でビスマスに比べ加工が容易な鉛を使用した。製作した素子を冷却して Cs-137 からの 662 keV のガンマ線を照射して位置検出実験を行ったところ、2 つの温度計 (温度計 1 と温度計 2) のうち温度計 2 からは信号が読み出せなかった。温度計 1 の出力を図 3 (c) (d) に示す。図 3 (c) は信号パルスの波高と立ち上がり時間の分布であり、温度計 1 に近い位置に入射したガンマ線ほど波高が高く立ち上がり時間が短い。図 3 (d) はガンマ線源と吸収体の各領域との距離から各領域での計数率の比を見積もり、長さ 1.9 mm の吸収体が仮想的に長さ 1 mm の 19 個の領域に分かれていると見なした場合の、各領域での平均パルス波形である。この結果から入射位置と温度計 1 との距離が吸収体の長さの 3 分の 2 程度までなら波形から入射位置を特定できること、一方でそれ以上離れると温度計 1 での位置検出は難しく温度計 2 による読み出しも必要であることが明らかになった。

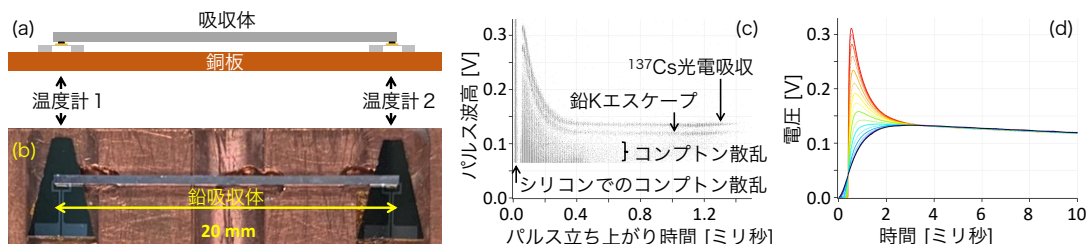


図 3 鉛を吸収体とした位置検出型 T E S 型マイクロカロリメータの(a)概念図と(b)写真、(c)信号パルスの立ち上がり時間と波高の分布の測定結果、(d)信号パルス波形の測定結果

## (3) ビスマスを吸収体とした位置検出型素子の開発

(2) で温度計 2 の出力が読み出せなかった原因として、銅に比べて鉛の熱膨張率が大きいため冷却時の熱収縮により薄膜であるメンブレンが破損したことが考えられる。そこで、銅と熱膨張率がほぼ等しいビスマスを吸収体として (2) と同様にして位置検出型素子を製作した。ビスマスは鉛に比べて加工が難しいため吸収体は鉛より太い 1 mm × 1 mm × 20 mm とした。図 4 (a) は温度計 1 の出力パルスの波高と温度計 2 の出力パルスの波高の分布であり、図 4 (b) は (2) と同様にして出力を仮想的に 7 つの領域に分けて作成した平均パルスである。

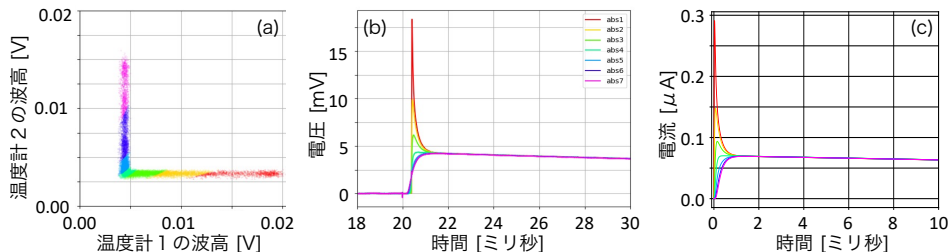


図 4 ビスマスを吸収体とした位置検出型 T E S 型マイクロカロリメータの(a)信号パルスの波高分布の測定結果、信号パルス波形の(b)測定結果と(c)シミュレーション結果

## (4) シミュレータの開発①

吸収体が仮想的に  $n$  個の領域 (熱ブロック) に分かれていると見なした場合に 2 個の T E S 温度計と合わせて  $n + 2$  個の熱ブロックの熱収支を表す  $n + 2$  個の微分方程式と、2 つの T E S 温度計の電気回路の応答を表す 2 個の微分方程式の、計  $n + 4$  個の微分方程式を連立して数値的に解くことで、位置検出型素子の熱的電気的応答を計算するシミュレータを開発した。  $n$  は可変である。図 4 (c) は (3) の素子の熱的パラメータや電気的パラメータの実測値や文献値を使用して  $n = 7$  で実施したシミュレーション結果であり、実測の信号パルス波形を比較的よく再現できている。

## (5) シミュレータの開発②

(4) のシミュレータでは、接着剤やメンブレンを熱容量を持たない熱リンクとして扱うが、実測結果との比較の際に接着剤の熱容量を無視することは不適切であると考えられる結果が得られた。また複数の位置検出型素子を並べて使用する場合には素子同士の熱的クロストークが問題となるがそのような複雑な形状を (4) の方法でシミュレーションすることは難しい。そこで、検出器の細かい構造まで反映できるように、有限要素法ソフトウェアを利用して T E S 型マイクロカロリメータの熱的応答と電気的応答を取り入れたシミュレータを開発した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Iyomoto Naoko, Asagawa Shinya, Tsuruta Tetsuya, Nishida Yoshiki, Hamamura Yukino, Kurume Yuta, Maehata Keisuke, Hayashi Tasuku, Mitsuda Kazuhisa	4. 巻 31
2. 論文標題 Development of Gamma-Ray Position-Sensitive Transition-Edge-Sensor Microcalorimeters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2021.3063649	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 Tsuruta Tetsuya, Iyomoto Naoko, Asagawa Shinya, Hamamura Yukino, Nishida Yoshiki, Maehata Keisuke, Mitsuda Kazuhisa, Hayashi Tasuku	4. 巻 31
2. 論文標題 Transition Edge Sensor Microcalorimeter With Bismuth Absorber for Gamma-Ray Measurement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2021.3074065	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 Iyomoto N., Kurume Y., Kuroiwa T., Asagawa S., Tsuruta T., Nishida Y., Hamamura Y., Maehata K., Hayashi T., Muramatsu H., Mitsuda K.	4. 巻 200
2. 論文標題 Development of Gamma-Ray Position-Sensitive Transition-Edge Sensor Microcalorimeters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 233~238
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-020-02518-y	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 Iyomoto Naoko, Yoshimine Ikumi, Shuto Yuki, Kuroiwa Takehiro, Maehata Keisuke, Hayashi Tasuku, Muramatsu Haruka, Nagayoshi Kenichiro, Mitsuda Kazuhisa, Takano Akira, Yoshimoto Shota, Kurume Yuta, Ishibashi Kenji	4. 巻 194
2. 論文標題 Development of Gamma-Ray Transition-Edge-Sensor Microcalorimeters on Thick Membranes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 412~417
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-018-2100-3	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14件(うち招待講演 0件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Naoko Iyomoto, Shinya Asagawa, Tetsuya Tsuruta, Yoshiki Nishida, Yukino Hamamura, Yuta Kurume, Keisuke Maehata, Tasuku Hayashi, and Kazuhisa Mitsuda
2. 発表標題 Development of Gamma-Ray Position-Sensitive Transition-Edge Sensor Microcalorimeters
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tetsuya Tsuruta, Naoko Iyomoto, Shinya Asagawa, Yukino Hamamura, Yoshiki Nishida, Keisuke Maehata, Kazuhisa Mitsuda, Tasuku Hayashi
2. 発表標題 Transition Edge Sensor Microcalorimeter with Bismuth Absorber for Gamma-Ray Measurement
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西田 佳樹, 伊豫本 直子, 鶴田 哲也, 濱村 雪乃, 河口 昌太郎, 中村 悠之介, 浅川 真矢, 前畑 京介, 山崎 典子, 林 佑, 紺野 良平, 八木 雄大, 満田 和久
2. 発表標題 有限要素法を用いたガンマ線検出用TES型マイクロカロリメータの熱伝導シミュレーション
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 濱村 雪乃, 伊豫本 直子, 鶴田 哲也, 西田 佳樹, 河口 昌太郎, 中村 悠之介, 浅川 真矢, 前畑 京介, 山崎 典子, 林 佑, 紺野 良平, 八木 雄大, 満田 和久
2. 発表標題 ビスマス吸収体を用いたガンマ線検出用TES型マイクロカロリメータの開発
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoko Iyomoto, Y. Kurume, T. Kuroiwa, S. Asagawa, T. Tsuruta, Y. Nishida, Y. Hamamura, K. Maehata, T. Hayashi, H. Muramatsu, K. Mitsuda
2. 発表標題 Development of Gamma-Ray Position-Sensitive Transition-Edge-Sensor Microcalorimeters
3. 学会等名 18th international workshop on Low Temperature Detectors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuya Tsuruta, Naoko Iyomoto, Shinya Asagawa, Yukino Hamamura, Yoshiki Nishida, Keisuke Maehata, Yuta Kurume, Tasuku Hayashi, Haruka Muramatsu, Kazuhisa Mitsuda
2. 発表標題 Development of Gamma-Ray Transition-Edge-Sensor Microcalorimeters on Thick Membranes
3. 学会等名 18th international workshop on Low Temperature Detectors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅川 真矢, 伊豫本 直子, 鶴田 哲也, 西田 佳樹, 濱村 雪乃, 久留米 勇太, 前畑 京介, 満田 和久, 林佑, 村松 はるか
2. 発表標題 ガンマ線検出用位置検出型TES型マイクロカロリメータの開発(5)
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鶴田 哲也, 伊豫本 直子, 浅川 真矢, 濱村 雪乃, 西田 佳樹, 前畑 京介, 満田 和久, 林 佑, 村松 はるか
2. 発表標題 高エネルギーガンマ線用TES型マイクロカロリメータの開発
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ビスマス吸収体を用いたガンマ線用TES型マイクロカロリメータの開発
2. 発表標題 鶴田 哲也, 伊豫本 直子, 浅川 真矢, 西田 佳樹, 濱村 雪乃, 前畑 京介, 林 佑, 満田 和久
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoko Iyomoto, Takehiro Kuroiwa, Yuta Kurume, Shinya Asagawa, Tetsuya Tsuruta, Keisuke Maehata, Tasuku Hayashi, Haruka Muramatsu, Keisei Maehisa, Kazuhisa Mitsuda
2. 発表標題 Development of gamma-ray Position-Sensitive Transition-edge sensor microcalorimeters
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久留米勇太、伊豫本直子、黒岩健宏、浅川真矢、鶴田哲也、首藤祐輝、前畑京介、満田和久、林佑、村松はるか、前久景星
2. 発表標題 ガンマ線検出用位置検出型 TES型マイクロカロリメータの開発 (3)
3. 学会等名 2018年第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久留米勇太、伊豫本直子、浅川真矢、鶴田哲也、西田佳樹、濱村雪乃、黒岩健宏、前畑京介、満田和久、林佑、村松はるか、前久景星、紺野良平
2. 発表標題 ガンマ線検出用位置検出型TES型マイクロカロリメータの開発 (4)
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Iyomoto et. al.
2. 発表標題 Development of gamma-ray position-sensitive transition-edge-sensor microcalorimeters
3. 学会等名 17th international workshop on Low Temperature Detectors (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 黒岩健宏
2. 発表標題 ガンマ線検出用位置検出型TES型マイクロカロリメータの開発(2)
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------