

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

## 【隔月連載記事】

### 超電導センサ (その6) - 超電導遷移端型センサの原理と応用

首都大学東京 大学院  
理工学研究科 物理学専攻  
准教授 江副 祐一郎

本特集の第6回では、超電導遷移端での急激な抵抗変化を温度計として利用するセンサ、いわゆる TES (Transition Edge Sensor) の原理と応用について紹介する。

#### 1. 原理と利点

TES は光や粒子を熱量測定によって捉える検出器の一種である<sup>1,2)</sup>。原理を図1に示す。一つ一つの光子や粒子のエネルギー量子  $E$  を検出するものをカロリメータ、一つ一つを区別せず吸収したパワー  $P$  を計測するものをボロメータと呼ぶ。温度計として超電導遷移端の抵抗変化を用いるものが TES であり、温度増加はカロリメータの場合には  $E/C$ 、ボロメータの場合には  $P/G$  となる。吸収された熱は熱浴へと一定の時定数で逃げて行く。カロリメータの場合の温度変化を図1に示した。

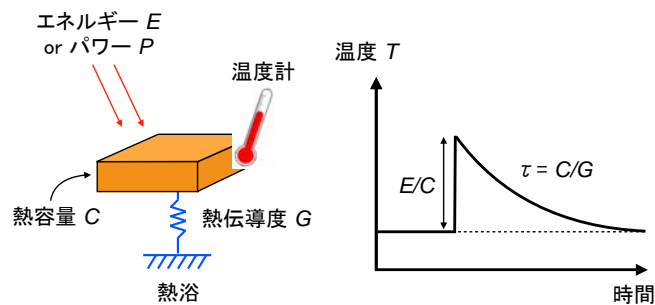


図1. センサの原理とカロリメータの温度変化。

TES の温度抵抗特性の例を図2に示す。温度計感度  $\alpha = d \log R / d \log T$  は 10~1000 程度と大きい。転移温度は近接効果を使って、超電導金属と常伝導金属の二層薄膜 (Ti/Au, Mo/Au など) の膜厚比を変えることで制御する。 $\alpha$  の制御はより困難であるが、近年、米 NIST による研究で TES 上に常伝導金属のバー構造を付けて、電流の流れ方を制限することで制御できることが分かってきた<sup>3)</sup>。

超電導遷移端上に状態を維持するため、TES は擬似的な定電圧バイアスをかけて動作させる (図2)。光や粒子との相互作用によって、素子の温度が上昇すると、TES を流れる電流が減少しジュール発熱が減ることで元の温度に戻るため、安定的に使用できる。これを電熱フィードバックと呼ぶ。温度変化の減衰の時定数は、カロリメータでもボロメータでも、実効的に  $\tau_{\text{eff}} \sim C/G * n/\alpha$  となる。ただし  $n$  は熱伝導度の温度依存性 ( $G \propto$

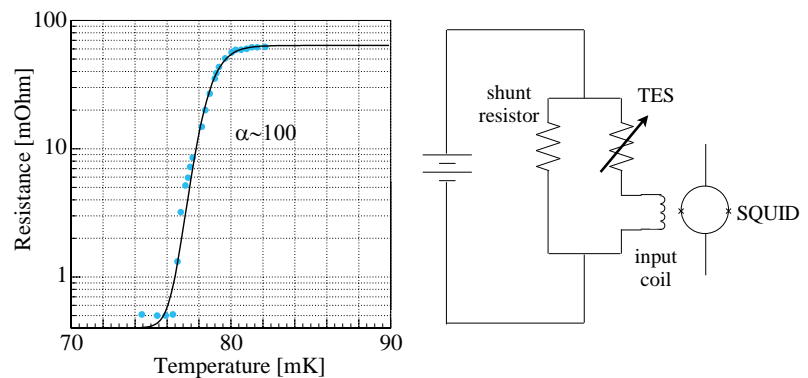


図2. TES の温度抵抗特性と電熱フィードバック。

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

$T^n$ ) による項であり 3~5 程度である。つまり電熱フィードバックによって信号は速くなる。たとえば  $C = 1 \text{ pJ/K}$ 、 $G = 1 \text{ nW/K}$ 、 $\alpha = 50$  では  $\sim 80 \text{ } \mu\text{s}$  であり、高速計数が可能である。

$\tau_{\text{eff}}$  の逆数で決まる周波数帯域  $\omega < 1/\tau_{\text{eff}}$  において、TES のノイズ等価雑音 (NEP) は原理的に、熱リンクを通したランダムな熱入出力、いわゆるフォノン雑音が支配的となる。これは  $(4 k_B T_B G \gamma)^{1/2} [\text{W/Hz}^{1/2}]$  (ただし  $\gamma \sim 1$ 、 $\omega < 1/\tau_{\text{eff}}$ ) と書ける。つまり低温かつ小さな  $G$  とすることで超低雑音となる。たとえば  $T_B = 300 \text{ mK}$ 、 $G = 10 \text{ pW/K}$  では NEP は  $\sim 1 \times 10^{-17} [\text{W/Hz}^{1/2}]$  である。特筆すべきは  $G$  を小さくしても、 $\alpha$  が大きいため、 $\tau_{\text{eff}}$  は小さく、高速な応答が可能であることである。これは TES ボロメータの大きな利点となっている。

カロリメータとして用いる場合、原理的なエネルギー分解能は  $2.35 \xi (4k_B T_B^2 C)^{1/2} [\text{J}]$  (ただし  $\xi \propto 1/\alpha^{1/2}$ ) と書ける。たとえば  $T_B = 100 \text{ mK}$ 、 $C = 1 \text{ pJ/K}$ 、 $\alpha = 50$  では  $\sim 2 [\text{eV}]$  となる。5.9 keV X線に対するエネルギー分解能と比較すると、これは半導体検出器より約 70 倍優れている。また TES よりも早くから開発されてきた半導体温度計型カロリメータと比べても約 2 倍優れている。ただし、超電導遷移端を超えるとエネルギー分解能は上の式よりも悪くなるため、最大エネルギーには  $E_{\text{sat}} \sim CT/\alpha$  という条件が課される。上のパラメータでは  $E_{\text{sat}} \sim 13 [\text{keV}]$  である。

読み出し回路からの利点として、TES は低インピーダンスであり、初段の増幅器として SQUID を利用できることが上げられる。TES の信号帯域幅は典型的に数 ~ 数十 kHz であり、SQUID の帯域幅  $\sim \text{GHz}$  と比べて十分小さい。そのため時分割、周波数分割など様々な手法で信号を多重化して読み出すことが可能である。よって、1000 pixel を超えるような巨大なアレイも、読み出し配線を過度に増やさず、現実的な冷凍機リソースで実現することができる。

TES に対して、半導体温度計型カロリメータやボロメータでは高インピーダンスのため、JFET を使った 1 pixel 毎の読み出しが必要である。2015 年度打ち上げの日本の X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載される半導体温度計型カロリメータは 6x6 pixel であり、5.9 keV でのエネルギー分解能は 5 eV 程度である<sup>4)</sup>。これは従来の半導体検出器と比べて画期的であるが、TES はさらにその先の性能、たとえば  $\sim 1000 \text{ pixel}$ 、 $\sim 2 \text{ eV}$  を実現しうるデバイスであることが分かる。

## 2. 応用

TES の代表的な応用例を表 1 にまとめた。近赤外線から可視光、X 線、 $\gamma$  線までの単一光子検出器、mm・sub mm 波に対するエネルギー流量検出器、さらには暗黒物質探査まで、非常に幅広く活用されている、もしくは活用されようとしていることが分かるであろう。

表 1. TES の代表的な応用例

方式	応用例
カロリメータ	天文 (X線), 量子暗号 (可視光, 赤外線), 微量分析 (X線), 核物質分析 ( $\gamma$ 線)
ボロメータ	天文 (sub-mm, mm 波), 宇宙マイクロ波背景放射 (mm 波), 暗黒物質 (粒子)

これらの応用例において、TES センサの性能は理論値に近づきつつある。例として図 3 に米 NASA GSFC がまとめた X 線用 TES カロリメータの単一 pixel での 5.9 keV X 線に対するエネルギー分解能の変遷を示す。現在の世界記録は NASA GSFC が達成した 1.6 eV であり、ほぼ理論通りの性能が出ている。一方、我々首都大、JAXA 宇宙研を中心とするグループの記録は 2.8 eV であり<sup>6)</sup>、世界記録に迫っているが、まだ改善の余地がある。アレイとしては、将来 X 線天文衛星用のもので  $\sim 1000 \text{ pixel}$  が開発されている。読み出しとしては、米 NIST の時分割信号多重化 SQUID を用いた 16 pixel 同時読み出しで 2.9 eV が達成されている。

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

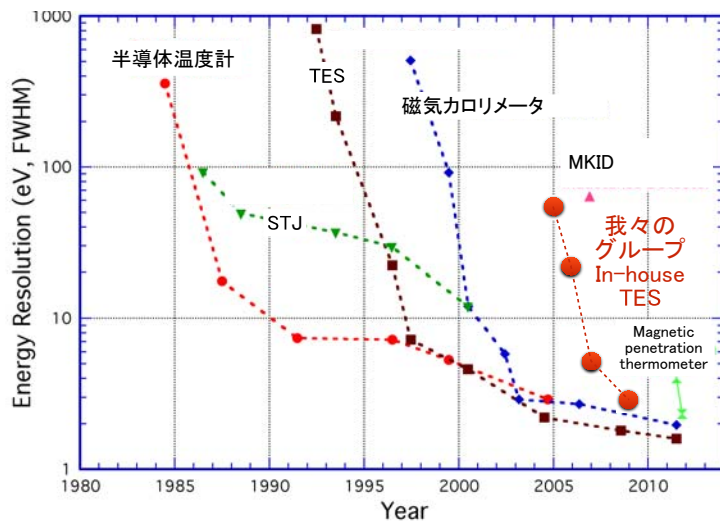


図3. X線用 TES カロリメータ等のエネルギー分解能の変遷<sup>5)</sup>。  
我々のグループの自作素子の変遷を重ねた。

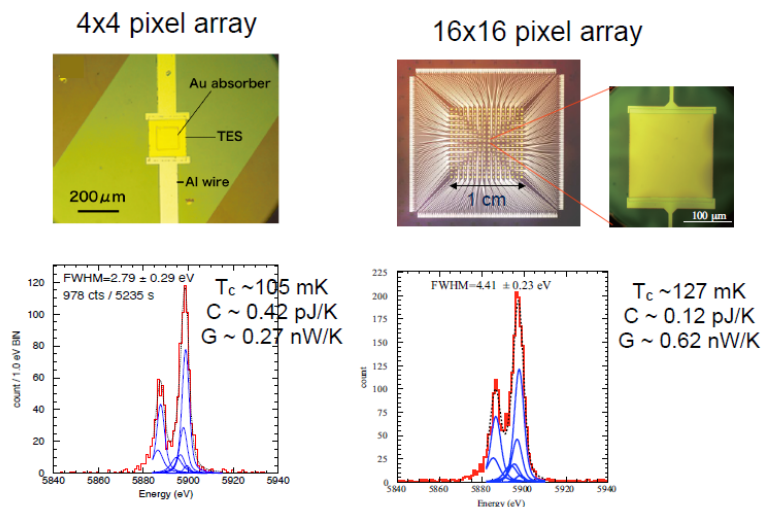


図4. 自作した X線用 TES カロリメータの例。

ダークバリオンの検出には 0.3-1.5 keV のエネルギー範囲で、優れたエネルギー分解能 ( $< 5$  eV) と大面積 (1 cm 角) を兼ね備えた検出器が必要であり、これらの要求を満たすことができるのが TES カロリメータである。

我々のグループでは首都大・宇宙研・産総研の装置を用いて、2004年から本格的にインハウスで素子製作を行ってきた。さらにセイコーや三菱重工、フォトプレジジョンなどにご協力頂いて、配線や吸収体技術等を共同で開発している。図4に例を示す。前述の通り、単一 pixel でのベストエネルギー分解能は 5.9 keV X線に対して 2.8 eV (TES 200  $\mu$ m 角, 吸収体 Au 120  $\mu$ m 角, 1.6  $\mu$ m 厚) であり<sup>5)</sup>、アレイでは 16x16 pixel 中の 1 pixel に対して 4.4 eV (TES 180  $\mu$ m 角, 吸収体なし) を達成している<sup>13)</sup>。

TES ボロメータでも sub-mm 波天文用で理論限界に迫る NEP が実現できており<sup>7)</sup>、アレイとしても 数百~10000 pixel が製作されてきている<sup>7-8)</sup>。X線用と比べ、時定数が比較的遅く ( $\sim$ ms)、信号多重化がより容易であることが、X線用よりも巨大なアレイが先に実現された主な理由と思われる。また極低雑音が必要な宇宙マイクロ波背景放射の観測でも巨大アレイが求められていることから、TES ボロメータが近年、多く採用されてきている<sup>9)</sup>。

天文だけでなく地上向けにおいても TES の応用例は枚挙にいとまがない。たとえば微量分析用に電子顕微鏡の EDS<sup>10)</sup>や、近赤外線領域での量子暗号通信<sup>11)</sup>などである。

特筆すべきは、こうした分野で日本のさまざまなグループが世界と肩を並べて、TES 開発を行っていることである。そのような中、恐縮ではあるが、以下では紙面の都合から我々、首都大・JAXA 宇宙研が中心となって開発している X線天文用の TES カロリメータを紹介させて頂きたい。

我々の目標の一つが、宇宙の大規模構造に沿って存在すると考えられる未発見の通常物質 (ダークバリオン) の解明を目指した日本の将来衛星計画 DIOS である<sup>12)</sup>。

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

これらの経験と実績に基づき、我々は現在 DIOS に向けたアレイ製作のため必要な要素技術、配線<sup>14</sup>と吸収体<sup>15</sup>の開発を進めている。図5に試作品を示す。

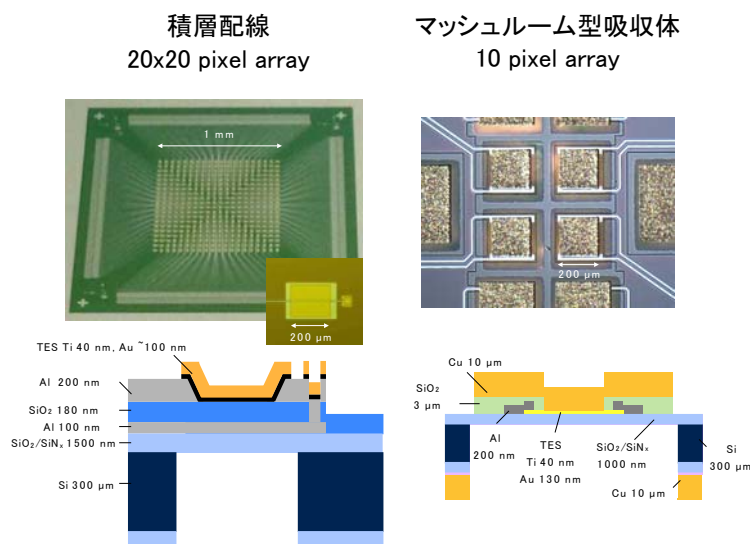


図5. 積層配線およびマッシュルーム吸収体の試作品と断面図。断面図の数字は厚みを表す。

鍵となる技術の一つが配線である。エネルギー分解能と面積を両立するため、DIOS では 20x20 pixel アレイを採用することを考えており、TES サイズは 250  $\mu\text{m}$ 、TES pixel 間の間隔は 500  $\mu\text{m}$  である。ここに多数の配線を並べると相互インダクタンスによる cross talk によってエネルギー分解能が劣化する。そこで Hot と Return の配線が正確に上下に重なった積層配線が必要となる。我々は産総研 CRAVITY を利用させて頂いて、共同で試作を進めており、転移特性の良好な配線の形成に成功してきている。現在は TES を配線上に形成して、転移特性やエネルギー分解能を調べる段階に来ており、完成まであと少しである。

もう一つの鍵技術が吸収体である。DIOS で要求されるこれまでにないエネルギー分解能と面積を両立するためには、できるだけ熱容量を抑えつつ、吸収体の受光面積を増やす必要がある。そこで TES (250  $\mu\text{m}$  角) よりも 2 倍大きなマッシュルーム吸収体を目指して、電析 Cu や電析 Bi を使った吸収体の製作をフォトプレジジョンなどと協力して進めており、目処を付けつつある。

これらの要素技術を組み合わせて製作した TES カロリメータアレイを、JAXA 宇宙研で開発中の周波数分割方式の読み出し回路と合わせることで、世界最高感度の X 線天文用 TES カロリメータを完成し、2020 年代前半に打ち上げを目指す予定である。

最後に TES は応用性の広さから米では NIST と NASA GSFC が協力して開発を進めるなど、地上・天文を超えた共同研究が進んでおり、世界的な競争が激しさを増している。日本でもこうした分野を超えた共同研究の動きは既に始まっているが、この流れをさらに加速させ、目的とする応用をいち早く実現してゆくことが鍵になるかと思われる。

なお TES の先を目指した開発も始まっていることも追記しておきたい。mm, sub-mm 波天文では Microwave Kinetic Inductance Detector (通称 MKID, 2014 年 2 月号の有吉さん他による解説を参照<sup>16</sup>) を使った  $\sim 1$  Mpix を目指した新たな開発が進められている。また X 線天文でも TES や磁気カロリメータを MKID と同様に microwave resonator と結合させ、さらに GHz 周波数分割 SQUID と組み合わせて、より巨大なアレイを実現する動きが出てきており、こうした二歩先にも目を向けて開発を推進してゆくことが大事になるかと考えている。



# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

## 参考文献：

- 1) K.D. Irwin and G.C. Hilton, "Transition-Edge Sensors", chapter in Cryogenic Particle Detection, C. Enss (Ed.), Topics in Applied Physics, vol. 99, p.63 (2005).
- 2) 江副 祐一郎, 篠崎 慶亮, 竹井洋, "進化する X 線マイクロカロリメータ -X 線分光で解き明かす宇宙の大規模構造-", 日本物理学会誌, 実験技術, 8 号, p.611 (2009).
- 3) J.N. Ullom, *et al.*, "Characterization and reduction of unexplained noise in superconducting transition edge sensors", Appl. Phys. Lett., vol. 84, p. 4206 (2004).
- 4) 石崎 欣尚, "宇宙用 X 線マイクロカロリメータ検出器", 応用物理学会放射線分科会誌「放射線」, vol. 37, p.217 (2011).
- 5) S. Bandler, "Large-Format High Resolution X-ray Microcalorimeter Arrays", Astrophysics Roadmap Town Hall Meeting (2013).  
<https://scienceworks.hq.nasa.gov/web/astrophysics-roadmap/home>
- 6) H. Akamatsu, *et al.*, "Impedance measurement and excessnoise behavior of a Ti/Au bilayer TES calorimeter", AIP Conf. Proc., vol. 1185, p.195 (2009).
- 7) W.S. Holland, *et al.*, "SCUBA-2: the 10000 pixel bolometer camera on the James Clerk Maxwell Telescope", MNRAS, vol. 430, p.2513 (2013).
- 8) T. Oshima, *et al.*, "Development of TES Bolometer Camera for ASTE Telescope: I. Bolometer Design", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, 2101004 (2013).
- 9) D. Benford, H. Moseley, and J. Zmuidzinas, "Direct Detectors for the Einstein Inflation Probe", J. of Phys., Conf. Series, vol. 155, 012001 (2009).
- 10) T. Hara, *et al.*, "Microcalorimeter-type energy dispersive X-ray spectrometer for a transmission electron microscope", J. Electron Microscopy, vol. 59, p.17 (2010).
- 11) D. Fukuda, *et al.*, "High speed photon number resolving detector with titanium transition edge sensor", J. Low. Temp. Phys., vol. 151, p.100 (2008).
- 12) T. Ohashi, *et al.*, "DIOS: the dark baryon exploring mission", SPIE, vol. 9144, 91442Q, (2014).
- 13) Y. Ezoe, *et al.*, "Large arrays of TES Xray Microcalorimeters for Dark Baryon Search", AIP Conf. Proc., vol. 1185, p. 60 (2009).
- 14) Y. Ezoe, *et al.*, "Tapered Edge Readout Wiring for Transition Edge Sensor Calorimeter Arrays Using Ion Milling", IEEE Trans. Appl. Supercond., in press.
- 15) 永吉賢一郎, "検出効率の飛躍的向上を目指したマッシュルーム型吸収体 TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発", 修士論文, 東京大学 大学院 理学系研究科 物理学専攻 (2013).
- 16) 有吉誠一郎ほか, "特集:超電導マイクロ波・テラヘルツ波デジタルデバイス 「MKIDs イメージングの最新動向」", 超電導 Web21, 2014 年 2 月号.

[超電導 Web21 トップページ](#)