

我々は次世代 X 線天文衛星搭載を目指し、TES (Transition Edge Sensor) を用いたマイクロカロリメータの研究開発、試作を行っている。

X 線マイクロカロリメータとは、入射した X 線光子 1 個 1 個のエネルギーを素子の微小な温度変化として測定することにより、入射 X 線のエネルギーを精密に検出することができる検出器である。そのエネルギー分解能は入射エネルギーに依存せず、素子の有するフォノン数の揺らぎで制限される。そのため、電離された 1 次電子の数の揺らぎでエネルギー分解能が制限される比例係数管や CCD に比べ桁以上も良い分解能を有することとなる。さらに、回折格子などの分散系検出器と比較して遥かに高い検出効率を有するという、高分解能かつ高検出効率を実現可能な検出器である。一般にカロリメータ素子のエネルギー分解能 (FWHM) はボルツマン定数 k_B 、検出器の熱容量 C 、温度計の感度 $\alpha = \left| \frac{d \ln R}{d \ln T} \right|$ を用いて、 $\Delta E_{FWHM} \propto \sqrt{k_B T^2 C / \alpha}$ の式で表される。熱容量 C は温度に強く依存することから動作温度を ~ 100 mK の極低温にすること、それから温度計感度 α を大きくすること、が優れた分光性能を発揮するために本質的である。

TES とは金属薄膜の超伝導 - 常伝導遷移時の急激な抵抗 R の変化を利用した高感度の温度計である。一般に超伝導遷移端は数 mK と非常に狭いが、TES はその温度領域内にて動作させる必要がある。ETF (Electro-Thermal Feedback = 電熱フィードバック) という負のフィードバックを用いることで、TES を超伝導遷移端にて安定に動作させることが可能となる。強い ETF をかけることで、得られる X 線パルスの時定数を実効的に短くすることが可能で高い計数率にも耐えことができ、かつ、熱雑音を抑制することもできるという利点がある。TES の温度計の感度は $\alpha \sim 1000$ を達成することも可能であり、ASTRO-E2 に搭載される $\alpha \sim 3$ の半導体温度計を利用したカロリメータよりもさらに桁以上も高いエネルギー分解能が期待できる。ただし TES からの出力電流信号は微弱 (数百 pA) であるので、低インピーダンスかつ低ノイズである読み出しシステムが必要となる。上記のようにカロリメータの性能を十分に発揮するには、100 mK 以下に冷却可能である冷凍機と、高感度低雑音の読み出し系の構築が必要不可欠である。

本論文では昨年度まで使用していた、近接効果を利用した Ti/Au 二層薄膜の TES 型 X 線マイクロカロリメータの性能を向上させるために、TES を Si ビームで支えるという構造を継承し、TES のデザインを新たにしたカロリメータの製作を行った。製作は昨年度同様早稲田大学 (WSD) の協力のもと行い、昨年度よりも真空度の高い環境で TES の製作に取り組み、新しい素子でも X 線の検出に成功した。また、将来のマルチピクセル化を睨んで、これまで手作業で接着していた X 線吸収体をスズめっきで成形したカロリメータ素子の試作を行なった。この素子を使用しての X 線検出にも成功したので合わせて報告を行なう。それと同時に SII (Seiko Instruments Inc.) との共同研究により、TES を Si_3N_4 膜で支えるという、新しい構造のカロリメータの試作を行った。TES にはこれまでの研究同様、Ti/Au 二層薄膜を用いており、この SII の素子でも X 線の検出に成功を修めた。

本論文で取り上げるのは、同時にプロセスを行った WSD#61、WSD#62 という素子についての実験である。前者は手作業にてスズ箔を吸収体として取り付け、後者は吸収体をスズめっきで成形し

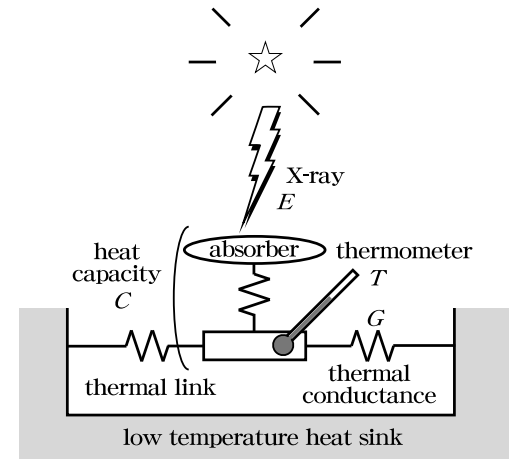


図 1: カロリメータの模式図

たものである。また、超伝導遷移温度 $T_c \sim 100$ mK を達成することができた素子 SII#6 と、温度計感度 $\alpha > 1000$ を達成できた素子 SII#10 について行った実験も合わせて述べる。

これらの素子を希釈冷凍機に組み込み、TES の抵抗値 R の温度 T に対する依存性を調べるために冷却実験を行った。表 1 にそれぞれの素子の TES のパラメータを示す。

次に、希釈冷凍機に読み出しに用いる SQUID AMP とカロリメータ素子を組み込み、X 線照射実験を行った。表 1 にそれぞれの素子に対する X 線照射実験から得られたベースラインの揺らぎとエネルギー分解能

素子の名前		WSD#61b	WSD#62d	SII#6a	SII#10a
TES の 膜厚 [nm]	Ti	120	120	40	50
	Au	100	100	120	60
スズ吸収体		有 (手作業)	有 (めっき)	有 (手作業)	無
超伝導遷移温度	T_c [mK]	243.2	220.0	119.0	290.1
超伝導遷移幅	ΔT_c [mK]	3.2	4	3.1	0.04
残留抵抗	R_r [m Ω]	93	50	108	230
温度計感度	α	250	250	100	2×10^4
ベースラインの揺らぎ	ΔE_0 [eV]	122.1	127.2	44.4	19.7
エネルギー分解能	ΔE [eV]	117.3	–	215.1	45.6

表 1: 実験で使用したカロリメータのパラメータ (上) と実験結果 (下)

ルギー分解能 (FWHM) を示す。それぞれ、X 線照射実験に用いた線源である Mn $K\alpha$ (5.9 keV) に対する値を示している。それぞれの素子について実験結果の特徴を挙げて以下に示す。

- WSD#61b
昨年度からの課題である再現性の問題をクリア。ベースラインの揺らぎがエネルギー分解能を制限。見積もりよりも遥かに大きい、超伝導に関する超過ノイズの影響が大きい。
- WSD#62d
Sn メッキ吸収体を用いて世界で初めて X 線の検出に成功。しかし、ビーム構造がしっかりと形成できていないなど、熱化の過程に問題があり入射 X 線を分光できず。
- SII#6a
SII 製の新しい形状のカロリメータで X 線の検出に成功。また、TES の超伝導遷移温度は ~ 100 mK を達成したが、エネルギー分解能はカロリメータ製作過程で残留物があり、TES の熱化の過程に影響を与え分解能を劣化。
- SII#10a
転移温度は高いものの、上記残留物は存在せず分解能 $\Delta E < 50$ eV を達成。ただし、吸収体が無いので TES で X 線の吸収が生じる。TES の超伝導領域で吸収するか、常伝導領域で吸収するかで熱の伝播過程が異なることが分解能に制限を与える。

エネルギー分解能の改善は進んではいるが、新たな問題点も生じている。これらの実験から得られた結果を比較検討することで、さらにエネルギー分解能の良いカロリメータ作製に必要と考えられることについて提言する。