## 修士論文

# TES型X線マイクロカロリメータの 放射線耐性と多素子化に関する研究

## 首都大学東京大学院 理工学研究科 物理学専攻 博士前期課程 宇宙物理実験研究室

### 榎島 陽介

指導教員:石崎 欣尚

平成25年2月28日

概要

我々はダークバリオン探査を目的とした次世代X線天文衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) 搭載へ向けた、X線撮像分光器 TES (Transition Edge Sensor) 型マイクロカロリメータの開 発を行っている。TES カロリメータは入射したX線光子のエネルギーによる素子の微小な温度上昇を、 超伝導遷移端における急激な抵抗変化を利用して測る検出器である。これまでの CCD などの半導体検 出器に比べ1桁以上優れた分光能力を持ち、100mK程度の極低温下で動作させることで数eVという 高いエネルギー分解能を達成することが可能である。TES の遷移温度(転移温度:Tc)は、冷凍機の能 力内で良いエネルギー分解能を得るために 100-120 mK の範囲が望ましく、我々のグループでは TES 温度計に超伝導金属 (Ti) と常伝導金属 (Au) の二層薄膜を使用することで、近接効果を利用して遷移 温度をコントロールしている。これまでにチーム内で自作した 200 μ m 角の単素子で 5.9 keV (Mn-K α)のX線に対して分解能 2.8 eV を達成している。また、16 × 16 アレイで 4.4 eV を達成している。 しかし、DIOS が要求する性能値は有効面積 1 cm 角で 400 ピクセル、1 ピクセル毎の分解能は 2 eV で ある。これを両立するには配線の省スペース化、クロストークの低減が必要である。このために我々は、 シリコン絶縁膜を挟み込む事で配線を折り返し構造にする基板デザインを開発し、これを TES へ加工 する技術を確立してきた。 本研究では、大きく分けて2つのことを行った。1つ目は、従来配線(単 層配線)を用いた、TES の放射線耐性に関する試験である。次に2つ目は、TES の多素子化によって 発生する問題を解決するために新たに採用した、折り返し配線(積層配線)型素子の開発に関する研究 である。 1つ目の放射線耐性についてだが、人工衛星へ搭載するような宇宙応用を考える際、 数年単 位の使用を想定しているため、宇宙線の影響を評価する必要がある。超伝導薄膜を利用した素子である TES の性能に直結すると考えられる放射線損傷として、放射線の種類によらない累積エネルギー(吸収 線量)で影響を表す電離損傷があげられる。電離損傷はトータルドーズ効果の一種で、超伝導/常伝導 二層薄膜の界面を変化させ、近接効果の振る舞いが変わることにより超伝導転移特性 (R-T 曲線) を変 える可能性がある。つまり転移温度、 臨界電流、温度計感度の変化が予想される。さらに、これらの値 が変化することによるエネルギー分解能の劣化も予想される。 放射線耐性の試験には、グループ内で 最高性能を得た素子と同形状の素子である TMU193 を使用し、150 MeV の陽子を約 10 krad 分照射し た。これは、約10年運用して被爆するとされる累積線量である。そして私は、照射前後の性能評価結果 を比較し、R-T 曲線(転移温度=前:164 ± 5.0 mK → 後:158 ± 5.0 mK)とエネルギー分解能(前: 5.1 ± 0.3 eV → 後: 5.6 ± 0.4 eV) に目立った変化はなく、放射線損傷による影響が小さいことを確認 次に2つ目の多素子化に関する研究について述べる。私は、確立されたプロセス技術に従って した。 製作された積層配線型の4×4アレイ素子である TMU284 について性能評価を行い、超伝導転移特性 (R-T 曲線、臨界電流)が良質な事を確認した。さらにX線照射実験を行い、5.9 keV のX線に対して、 本基板デザインで初めて信号の取得に成功した。 TMU284 の良質な超伝導転移特性の結果を受け、同 様の製作プロセスで 20 × 20 の大規模アレイである TMU293 の製作がなされた。私はこの素子の性能 評価を行った。しかし結果として良質な転移特性を得られず、X線信号の取得もできなかった。これを 受けて、素子の表面と断面の観察を行い、原因を調査した。これにより、上部配線が傷ついていたり剥 がれている箇所や、一部は下部配線にまで傷が達している箇所を見つけた。こうした箇所では配線の断 線やショートが起きていることが分かった。また、二層薄膜の膜厚の均一性や密着性に問題はないもの の、Au が一部で薄くなっていることが分かった。 どの製作段階が原因となっているのかを知るため、 別に 20 × 20 アレイを製作していく上で、各段階ごとに超伝導転移特性の調査と電子顕微鏡による表面 4

観察を行った。その結果、二層薄膜の成膜段階では問題なかったが、パターニング後に常伝導抵抗が数 Ωと高くなる事が分かった。温度 T=107 mK(@T/Tc=0.47)での臨界電流も 10 μ A 以下であった。 今後は、積層配線型の大規模アレイを製作する上で発生する問題の解決をしていく予定である。

目 次

#### 概要

第1章	序論	1
1.1	X 線天文学	1
	1.1.1 X線天文学の展開	1
	1.1.2 X線観測の意義	2
1.2	放射線検出器	2
	1.2.1 エネルギー分解能	4
1.3	X 線検出器	5
	1.3.1 ガス検出器	5
	1.3.2 マイクロチャンネルプレート	6
	1.3.3 半導体検出器	7
	1.3.4 CCD カメラ	7
	1.3.5 超伝導トンネル接合検出器	8
	1.3.6 回折格子	8
	1.3.7 X線マイクロカロリメータ	9
1.4	次世代の X 線分光器に要求される性能	11
	1.4.1 ミッシングバリオン問題	11
	1.4.2 DIOS $\exists \forall \flat \exists \flat \dots \dots$	12
第2章	<b>TES</b> 型 X 線マイクロカロリメータ	17
2.1	X 線マイクロカロリメータの構造	17
	2.1.1 吸収体	17
	2.1.2 温度計	18
2.2	X 線マイクロカロリメータの原理	18
2.3	超伝導遷移端温度計 (TES: Transition Edge Sensor)	20
2.4	ノイズとエネルギー分解能....................................	20
2.5	電熱フィードバック (ETF: Electro-Thermal Feedback)	22
	2.5.1 電熱フィードバック下の温度変化に対する応答	22
2.6	SQUID を用いた読み出し系 ....................................	24
	2.6.1 dc-SQUID	24
2.7	世界の開発状況	25
	2.7.1 開発の歴史	25
	2.7.2 世界の開発状況	26
第3章	これまでの開発状況	31
3.1	単層配線型 TES の開発	31
	3.1.1 TES に用いる金属の必要条件と選定	31
	3.1.2 製作プロセス	31

 $\mathbf{2}$ 

\_\_\_\_\_

	3.1.3 自作した単素子の最高性能	32
	3.1.4         自作した多素子の最高性能         1	34
	3.1.5 課題と解決方法	35
3.2	着層配線多素子 TFSの開発	35
0.2	391 製作プロセス	35
		00
第4章	実験装置と性能評価方法	37
4.1	首都大希釈冷凍機	37
4.2	超伝量子干渉計 (SQUID)	40
4.3	放射線源	42
4.4	Pb 超伝導磁気シールド	42
4.5	ローパスフィルタ	43
4.6	カロリメータの組み込み	48
1.0	(2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2)	10
1.1		<u>т</u> ј 40
		49 50
	4.1.2 <sup>-</sup>	50
	4.7.5 SQUID に按机されていない場合	50
	$4.1.4$ $I-V$ 付任 $\ldots$	50
	4.7.5 X線ハルス特性とノイス特性	51
第5章	TESの放射線耐性の測定	53
5.1	TES の宇宙応用する上での課題	53
5.2	放射化実験セットアップ	54
	5.2.1 用いた素子:TMU193-4d	55
	5.2.2 試験場所	56
	5.2.3 ビーム   確   度   と   コンフィグレーション	57
	5.2.5 こ 二点反こ $(-)$	58
53		50
0.0	天映柏木 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	50
	9.9.1 IV-1 四称	59
	0.0.2 - 瞳介电肌	09 60
	0.3.3 エイルイー刀件記	00
- 1	5.3.4 インビーダンズ性能	62
5.4		62
	5.4.1 <b>以</b> 射線損傷の有無	62
	5.4.2 TES 以外への影響の有無	62
第6章	積層配線を用いた 4 × 4 素子の性能評価	65
6.1	TMU 284 の製作	65
6.2	室温下での性能評価	67
0.2	6.2.1 配線抵抗	67
	6.2.9 歩留まりの評価	68
63	0.2.2 シ 田 & ノ ジ 田 岡	60
0.0		00
	U.O.1	09
	0.3.2	09
~ .	b.3.5 ムイルモープ 解 E	70
6.4	まとめと課題	79

	6.4.1R-T 曲線	79 79 79
第7章	積層配線を用いた 20 × 20 素子の性能評価	81
7.1	TMU 293 の製作	81
	7.1.1 制作方法	
	7.1.2 4 × 4 TES との違い	
	7.1.3 外観	
7.2	室温下での性能評価	
	7.2.1 配線抵抗	
	7.2.2 バルク抵抗との比較	
	7.2.3 歩留まりの評価	
7.3	低温下での性能評価	
	7.3.1 R-T 曲線、	
	7.3.2 臨界電流	
	7.3.3 エネルギー分解能	
7.4	断面の詳細観察....................................	
	7.4.1 SEM 画像	
	7.4.2 SEM 画像観察まとめ	100
	7.4.3 FIB 画像	101
	7.4.4 FIB 画像観察まとめ	106
7.5	まとめと課題	110
	7.5.1 R-T 曲線	110
	7.5.2 臨界電流	110
	7.5.3 エネルギー分解能	110
7.6	TMU294 の製作	111
7.7	TMU313 の製作	112
	7.7.1 製作の意図と TMU293 との違い	112
	7.7.2 二層薄膜成膜前の SEM 観察	112
	7.7.3 二層薄膜成膜後の低温測定	114
	7.7.4 二層薄膜パターニング後の低温測定	115
	7.7.5 吸収体付け失敗	116
	7.7.6 吸収体付け失敗後の低温測定	117
7.8	本章のまとめと今後	118
付録 A		121

125

## 第1章 序論

#### 1.1 X 線天文学

[32]

#### 1.1.1 X線天文学の展開

宇宙から X 線がやってくることは、1962 年にアメリカの B. Rossi や R. Giacconi らによる観測ロケットにより、全天で最も明るい X 線源である Sco X-1 が偶然発見されたものである。この時代になって初めて観測された理由は、宇宙からの X 線は地上に届かないからである。地上に 100% 近く到達する可視 光に対し、宇宙から地球にやって来る X 線は地球大気に吸収され地上に届くことはなく、上空ないし大 気圏外に出なければ観測できないが、20 世紀半ばからは気球やロケット、人工衛星等の技術の向上によ りそれが可能になった (図 1.1)。



図 1.1: 宇宙空間からの電磁波が到達できる高度。

これを受けて、1960年代には小型の観測ロケットにより X 線天体について断片的な知識が集められ 始めたが、1970年に世界初の X 線天文衛星 Uhuru (米) が登場し、全天走査の結果約 400 個の X 線天体 をリストアップすることで研究は大きく飛躍した。その後は各国のそれぞれ特徴を持った観測器が次々 に打ち上げられ、それらの幅広い活躍により X 線という波長は宇宙物理学にとって不可欠な窓として確 立されてきた。

日本のX線観測は小田稔が考案した「すだれコリメータ」によって、さそり座X1の位置を同定する ことに成功したことから始まった。このコリメータは、2層のすだれ状のコリメータを検出器の上に置く ことで、入射X線の角度による強度変化を感知し、方向を知るという仕組みであり、X線撮像の難しい > 10 keV以上の太陽X線観測でもこの原理に基づく装置が今も使われている。すだれコリメータは1979 年に打ち上げられた日本の第1機目のX線天文衛星「はくちょう」に世界で初めて搭載され、次々と新 しいX線源の位置を決定することに貢献した。「はくちょう」を皮切りに、1983年に「てんま」、1987 年に「ぎんが」、1993年に「あすか」と続き、2005年に5機目のX線衛星である「すざく(ASTRO-E2) 」の打ち上げに成功した (図 1.2)。現在「すざく」に続く新たな宇宙X線天文衛星「ASTRO-H」の開 発が進行中であり、2014年に打ち上げ予定である。



図 1.2: 世界の宇宙 X 線観測衛星の歴史。

#### 1.1.2 X線観測の意義

今日の宇宙観測は主に電磁波を用いて行われている。宇宙に存在する物質や現象は、ミクロからマク ロまで、低温から高温までと実に幅広い。そのため、電波・赤外線・可視光・X 線・ $\gamma$ 線を用いた多波長 による複合的な観測により宇宙の本質を探る研究がなされている。その中で宇宙における X 線や $\gamma$ 線領 域の放射は非常に多く、銀河間に存在する超高温ガスからの熱放射、超相対論的電子による逆コンプト ン散乱、超新星残骸や $\gamma$ 線バーストからのシンクロトロン放射、X 線パルサーからのサイクロトロン共 鳴などが挙げられる。また 10 keV 以上のエネルギーをもつ硬 X 線・ $\gamma$ 線領域では、高エネルギー天体 から放出される非熱的な放射や高温の熱放射を観測することが可能である。従って、宇宙における高エ ネルギー、高温現象を捉えるのに適した電磁波である。また、0.1 ~ 10 keV の X 線エネルギー帯 (軟 X 線帯)には、炭素、窒素、酸素、ネオン、マグネシウム、シリコン、硫黄、アルゴン、カルシウム、鉄、 ニッケル等の宇宙に存在する主要な重元素の K、L 輝線が存在する。X 線・ $\gamma$ 線による天体観測は、宇 宙におけるこれらの重元素の量や物理状態を知る上でも重要な手段のひとつである。

X線を放射する天体は多岐に渡り、それぞれ異なった特徴のX線を放射している。例えば、白色矮星、 中性子星、活動銀河核のブラックホール等の高密度天体と恒星(伴星)との連星系では、伴星からの質量 降着によって高温の降着円盤が形成され、そこからの黒体放射や熱制動放射によるX線が観測される。 中心星の自転や伴星の公転によってX線強度が周期的に変化するX線パルスが観測されることもある。 また、銀河や銀河団からはそれらに付随する高温プラズマによる熱制動放射のX線が見られる。最近で は、太陽系惑星周辺の中性原子と太陽風の電離プラズマによる電荷交換反応によってX線輝線が放射さ れることも分かってきた。X線を通して見ると宇宙は高エネルギー、高温現象で満ちあふれていること が分かる。こういった情報をより正確に捉えるために、X線検出器の撮像能力やエネルギー分解能、時 間分解能等を向上させることは重要である。

#### 1.2 放射線検出器

放射線の検出器には様々なものが存在する。そのどれもが、放射線により物質中に与えられたエネル ギーが電子・原子・分子の相互作用の多数回の繰り返しを通じて、多くの原子・分子に分配されていく 物理過程、または結果を利用して放射線を検出するものである。以下に主な検出方法と検出器の種類を 分類する (表 1.1)。



図 1.3: おおぐま座の渦巻き型銀河の各波長でのイメージ (青: X線 (*Chandra*衛星)、黄: 可視光 (*Hubble*宇宙望遠鏡)、赤: 赤 外線 (*Spitzer*宇宙望遠鏡)。

表 1.1: 放射線の検出方法と測定器の種類。

検出方法	検出器
気体の電離を利用	電離箱、比例計数管、GM 計数管
固体の電離を利用	半導体検出器
蛍光作用を利用	シンチレーション検出器、熱ルミネセンス線量計
写真作用を利用	ガラスバッチ

一般に 40 eV~20 keV (30~0.05 nm) のエネルギー (波長) 領域における X 線の検出には光電効果が 利用され、硬 X 線から γ 線の領域ではコンプトン効果や電子対生成が有効となる。上に挙げたような検 出器の中から、X 線の検出に適したものを選択する必要がある。また、天体からの X 線を観測する際に は地球大気による X 線の吸収があるために地上での観測は不可能である。そのため人工衛星に搭載して の観測が現在では主流であり、これらの検出器には、大きさ・寿命・耐久性などの制限が与えられること となる。また、X 線以外の成分 (バックグラウンド)、例えば紫外線、荷電粒子、宇宙線にも感度を持っ ているため微弱な X 線を検出する場合には、これらの除去も重要な機能となる。

#### 1.2.1 エネルギー分解能

ここでエネルギー分解能について一般論を述べる。エネルギー分解能とは X 線光子のエネルギーの決 定精度のことで、決定した X 線光子のエネルギーの頻度分布を X 線エネルギースペクトルと呼ぶ。エ ネルギー E<sub>0</sub> の単色の X 線が入射した際に得られるエネルギースペクトルを図 1.4 に示す。キャリアの



図 1.4: 単色 X 線入射時の計測スペクトル。

揺らぎや読み出しシステムによるノイズなどの影響により、単色 X 線を入射した場合であっても得ら れるエネルギースペクトルは必ず有限の幅を有する。この分布の高さが半分になるところの幅を半値幅 (FWHM: Full Width Half Maximum) とよび、検出器のエネルギー分解能の指標として用いられる。半 値幅が小さいほど分解能は高い。一般に X 線検出器では、X 線入射時の検出器との相互作用によって生 じる電子、イオン、正孔、フォノンなどのキャリアを収集して入射エネルギーを測定する。検出器に1 つの光子が入射し、生成した情報キャリアが N 個であったとする。ここで、キャリアの生成は ポアソン (Poisson) 統計に従うとし、情報キャリア生成に必要なエネルギーは入射 X 線光子のエネルギー  $E_0$  に比 べて充分に小さく、情報キャリア数 N が充分に大きい場合には、図 1.4 に示す応答関数はガウス (Gauss) 分布となる。その標準偏差は  $\sigma = \sqrt{N}$  であり、半値幅は FWHM =  $2.35\sqrt{N}$  で表されることとなる。こ れより、情報キャリア数の統計揺らぎによって決まるエネルギー分解能  $\Delta E$  は、

$$\Delta E_{\rm FWHM} = \frac{2.35E_0}{\sqrt{N}} \tag{1.1}$$

と表される。しかし、実際には情報キャリアの生成はポアソン分布に完全には従わないので、実際のエ ネルギー分解能の限界は、

$$\Delta E_{\rm real} = 2.35 E_0 \sqrt{\frac{F}{N}} \tag{1.2}$$

と表される。ここで *F* は Fano 因子と呼ばれるポアソン統計からのずれを定量化するために導入された 係数であり一般に *F*  $\leq$  1 である。

#### 1.3 X線検出器

X線は物質との相互作用等を利用して検出することができる。これまで様々な種類のX線検出器が開発され、X線天文学の発展に貢献してきた。ここでは、代表的なX線検出器を紹介し、その原理や特徴 等について簡単に述べる。

#### 1.3.1 ガス検出器

比例係数管 (PC: Propotional Counter) は円筒または角筒を陰極とし、細い芯線を陽極として高電圧 を印加し前置増幅器を通してパルス信号を取り出す検出器である。放射線がガス中を通過する際に、ガ スを電離して一次電子とイオンを生成する。それぞれ電場により加速されるが、質量の違いから電子の 方がより速く移動する。加速を受けた一次電子がガスのイオン化ポテンシャルを超えるエネルギーを得 ると、一次電子によるガスののイオン化が生じ二次電子をイオンの対ができる。これを繰り返すことで 入射エネルギーに比例した個数の電子が生成され、電極へ達することとなる。この電子増幅過程を電子 なだれと呼ぶ。筒の中には希ガスと有機ガスの混合ガスを流すか密封する。筒の一部を切り取り X 線透 過率の高い薄膜を取り付けて X 線の入射窓にする。芯線には直径 20 ~ 100  $\mu$ m のタングステン線が主 に用いられ、混合ガスとしては Ar 90% + CH<sub>4</sub> 10% の PR(P-10) ガスがよく使用される。X 線入射窓 の膜には Be、Al、Ti の金属薄膜やポリプロピレン、マイラー、カプトン等のプラスチック薄膜が用い られる。検出効率は窓膜の透過率とガスの吸収率によって決まる。エネルギー分解能は一次電子と二次 電子の数の揺らぎで決まる。比例係数管では特に二次電子の数の揺らぎが大きく、入射 X 線エネルギー を $E_0$ 、一つの中性ガスを電離しイオン対を生成するのに必要なエネルギーを W とし、二次電子の数の 揺らぎの影響を加味し、式 1.2 を書き換えると、エネルギー分解能  $\Delta E$  は、

$$\Delta E = 2.35\sqrt{E_0 W(F+b)} \tag{1.3}$$

と表される。ここでりは電子なだれの理論的予想から導かれる定数であり、0.4 < b < 0.7程度の値を持 つ。比例係数管での典型的な値としては、W = 35 eV、F = 0.20、b = 0.6である。これを上の式に代 入すると、6 keV に対するエネルギー分解能は 960 eV となる。比例計数管に似た X 線検出器で X 線 天文学の初期に使用された Geiger-Muller 計数管は、電子増幅が飽和するほど高い電圧を印可するもの であり、エネルギー測定よりも X 線の計数に特化した検出器である (図 1.5)。世界初の X 線天文衛星 *Uhuru* 衛星 (米) に搭載されて以来、これまで多くの衛星に搭載されてきた。中でも *Einstein* 衛星 (米) や *ROSAT* 衛星 (独) には、位置検出機能を備えた比例計数管が搭載され、X 線撮像分光検出器として X 線望遠鏡の焦点面に配置された。日本の衛星「ぎんが」にも非 X 線バックグラウンドを低減する反 同時計数機能を持った比例計数管が搭載された。

一方、ガス蛍光比例係数管 (GSPC: Gas Scintillation Propotioanl Counter) では一次電子で中性ガス を励気させ、これが基底状態に戻る際に放出する光子を利用したもので、電子なだれを生じることがな いため比例係数管よりも高いエネルギー分解能を達成することが可能である。代表的なガス蛍光比例係 数管での値 W = 35 eV、F = 0.20 を用いると、6 keV に対するエネルギー分解能は 480 eV となる。こ の値は X 線天文衛星「あすか」に搭載されていた GIS (Gas Imaging Spectrometer) のエネルギー分解 能にほぼ一致する。



図 1.5: Geiger-Muller 計数管。

#### 1.3.2 マイクロチャンネルプレート

マイクロチャンネルプレートはX線検出器の中では最も高い位置分解能を得ることができる検出器の 一つである。図1.6に示すように、細管を多数束ねて平板状にした検出器である。細管の両端には電圧 が印可されている。細管はそれぞれ光電子増倍管の役割を果たし、X線が細管の内壁に入射した際に発 生する光電子を増倍する。この過程で増倍された電子を信号として取り出すとX線エネルギーの情報 は得ることができないが、入射X線の位置の情報を得ることができる。そのため、X線望遠鏡の焦点面 に配置することでX線画像を得ることができ、X線撮像検出器として用いることができる。これまで *Einstein* 衛星(米)や*EXOSAT* 衛星(欧州)、*ROSAT* 衛星(独)、*Chandra* 衛星(米)等に搭載され、銀 河や銀河団の高温プラズマの空間分布の研究等に大きな貢献をした。



図 1.6: マイクロチャンネルプレート。

#### 1.3.3 半導体検出器



図 1.7: 半導体検出器の測定原理。

半導体検出器 (SSD: Solid State Disk) は比例計数管とは異なり、アルゴンガスではなくシリコンやゲルマニウムなどの半導体と使用するものである。この検出器の基本的情報キャリアは X 線から変換された一次電子であり、入射 X 線にそって電子・正孔対が生じる。これを検出器内部に印加した電圧によって収集して電気信号として読み出すのが基本的な検出原理である。次に述べる X 線 CCD も広義では半導体検出器であるが、ここでは放射線検出器として比較的歴史のあるリチウムドリフト型シリコン Si (Li)検出器について簡単に述べる。

半導体検出器の構造を図1.7に示す。pn 接合に逆バイアスをかけると空乏領域が形成され、この領域 にて X 線が吸収され電子・正孔対がその行路に沿って生じる。Si の場合この領域の厚みは数 mm まで可 能であり、通常ここに数 100~数 1000 V のバイアスをかけて用いる。半導体検出器の時間分解能は、有 感領域を電子または正孔が移動する速さで決まり、2 mm 厚を例にとれば 10~100 nm 程度になる。一つ の情報キャリアを生じるのに必要なエネルギー W は、半導体検出器では Si で平均 3.65 eV、Ge で平均 2.96 eV とガス検出器に比べ 1/10 であり高いエネルギー分解能が期待される。Si を用いた半導体検出器 のファノ因子 F の典型的な値は 0.1 である。従って式 1.3 を用いると 5.9 keV に対するエネルギー分解 能は 120 eV という値を得る。しかしながら実際は、半導体検出器の場合はガス検出器に比べて読み出 し回路系に入力される電子の数が少ないため、読み出し回路系の雑音が無視できなくなり、エネルギー 分解能の劣化をもたらす。「すざく」に搭載されている HXD (Hard X-ray Detector) による観測帯域の うち低エネルギー側を受け持つ PIN 型シリコン半導体検出器では、2 mm 厚のシリコン PIN フォトダイ オード素子を 2 枚重ねにし、有効厚みを 4 mm として用いる。読み出し回路系の雑音を抑えるため低温 に冷却して用いる。*Einstein* 衛星 (米) 等では X 線分光検出器として X 線望遠鏡の焦点面に配置された。

#### 1.3.4 CCD カメラ

ビデオカメラやデジタルカメラ等としても多用される CCD (Charge Coupled Device) は X 線検出器 としても有用である。X 線 CCD カメラは、一つ一つの小さな半導体検出器をモザイク状に並べること により、前置増幅器からみた静電容量を小さくし、増幅器の雑音レベルを下げることに成功した検出器 である。典型的に 5.9keV の X 線に対して  $\Delta E_{\rm FWHM}$ = ~120 eV 程度となる。長所はメガピクセルの精 細撮像能力を持っていることである。多画素の情報を読み出すための仕組みとして、ある画素に入射し た X 線光子が生成する電子群を電場によって電荷転送領域に移動させて蓄積し、電極に加える電圧を規 則的に変化させることで蓄積された電子群をバケツリレー方式で読み出し口まで転送する。この方法を 用いることで画素毎の信号を順番に取り出し、位置情報を再構築することができるが、時間分解能は数 sec 程度と低くなってしまう。現在軌道上で観測を行っている日本の衛星「すざく」には、XIS (X-ray Imaging Spectrometer) として X 線 CCD カメラが搭載されている (図 1.8)。



図 1.8: 「ずさく」に搭載されている X 線 CCD カメラ。

#### 1.3.5 超伝導トンネル接合検出器

超伝導トンネル接合検出器 (STJ: Superconducting Tunnel Junction) は、2枚の超伝導対で薄い絶 縁膜を挟んだ構造をしている。STJ 素子にて X 線が光電吸収される際に生成された光電子がクーパー (Cooper) 対を破壊して準粒子 (単独の電子)を作る。STJ ではトンネル効果で絶縁体を通過した準粒子 を信号として検出する。超伝導現象を利用するため、~4 K の極低温にて動作させる必要がある。超伝 導状態にある電子が常伝導状態となるのに必要なエネルギー、すなわちクーパー対を一つ破壊するのに 必要なエネルギーは数 meV である。エネルギー分解能の限界は情報キャリア数の統計揺らぎによって 決まるので、STJ の分解能は半導体検出器に比べ数十倍も良くなると考えられ、原理的には~4 eV の エネルギー分解能を達成することが可能である。

#### 1.3.6 回折格子

回折格子は X 線検出器の中では最も高いエネルギー分解能を得ることができる検出器の一つである。 ただし、分散型分光器である回折格子は分散された光だけがエネルギー情報を持つため、非分散型分光 器に比べて X 線検出効率が低い。また、分散角が入射 X 線の波長に比例するため、波長の短い (エネ ルギーの高い) X 線に対しても高いエネルギー分解能を得ることができない。さらに、分散型分光器で あるため、空間的に広がった天体に対しては高いエネルギー分解能を得ることができない。つまり、回 折格子を用いた観測に適した対象は、軟 X 線で明るい点状の X 線源に制限される。回折格子は X 線望 遠鏡とその焦点面の間に配置され、エネルギー分解能は望遠鏡の角度分解能や X 線エネルギー等に依 存する。具体的には  $\Delta E_{\text{FWHM}} \propto E^2$  であり、典型的に 1 keV の X 線に対して  $\Delta E_{\text{FWHM}}$  は数 eV 程度 となる。現在軌道上で観測を行っている *Chandra* 衛星 (米) には透過型回折格子 (HETG: High Energy Transmission Grating、LETG: Low Energy Transmission Grating)、XMM-Newton 衛星 (欧州) には 反射型回折格子 (RGS: Reflection Grating Spectrometer) が搭載されている。

#### 1.3.7 X線マイクロカロリメータ

X線マイクロカロリメータは、100% に近い検出効率と半値幅約 10 eV のエネルギー分解能を実現し、 さらに空間的に広がった X線源も観測可能にする。X線 CCD などほとんどの X線検出器は X線によ る物質のイオン化現象を利用し、イオン化で作られた電子などの電荷を電気信号として取り出す。一方、 X線マイクロカロリメータはこれと全く異なる原理に基づいている。物質に X線光子が吸収されると、 そのエネルギーが熱に変換される。その熱量を測定するのが X線マイクロカロリメータである。詳しく は次章で述べる。

現在、X線分光検出器として動作しているマイクロカロリメータには、使用する温度計の違いによっていくつかの種類が存在する。以下に4種類のマイクロカロリメータを紹介する。

#### 1.3.7.1 半導体サーミスタ型 X 線マイクロカロリメータ

半導体サーミスタ型 X 線マイクロカロリメータは、半導体素子の電気抵抗の温度依存性を温度計として用いる。例えば、シリコンに  $10^{18} \sim 10^{19}$  cm<sup>-3</sup> 程度の不純物をドープすることにより ~ 100 mK で大きな感度を持つようになる。温度計の絶対感度  $\alpha_R$  は、半導体素子の抵抗を R とすると、

$$\alpha_R = \frac{d \, \log R}{d \, \log T} \tag{1.4}$$

のように表すことができ、典型的に  $\alpha_R \sim -6$  程度を実現することができる。そして、これまでに実験室 では 5.9 keV の X 線に対して  $\Delta E_{\rm FWHM}$ = 3.2 eV というエネルギー分解能が得られている。日本の X 線 天文衛星「すざく」の XRS (X-Ray Spectrometer) として 6×6素子の半導体サーミスタ型 X 線マイク ロカロリメータが搭載され、最初期の観測で  $\Delta E_{\rm FWHM}$ = 6.7 eV のエネルギー分解能を達成した実績が ある。2014 年に打ち上げ予定の X 線天文衛星「ASTRO-H」の SXS (Soft X-ray Spectrometer) として も搭載される予定である。

#### 1.3.7.2 超伝導遷移型 X 線マイクロカロリメータ

超伝導遷移 (TES: Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータは、超伝導体を素子として 用い、X 線の入射、吸収による温度上昇を超伝導遷移端における急激な電気抵抗の変化として測定する。 つまり、超伝導体の臨界温度付近の電気抵抗の急激な温度依存性を温度計として用いる (図 1.9)。この タイプの温度計を TES という。TES は X 線マイクロカロリメータだけではなく、赤外線や電波 (マイ クロ波、サブミリ波等)のボロメータとしても用いられている。TES 温度計の絶対感度  $\alpha_R$  は、超伝導 体素子の電気抵抗を R とすると、式 1.4 によって表すことができ、 $\alpha_R \sim 1000$  という半導体サーミスタ 型の 100 倍以上の感度を実現することができる。TES に用いる超伝導体は、Ti/Au や Mo/Cu の 2 層薄 膜などが主流である。温度計の感度が向上したことによって、半導体マイクロカロリーメータと比べて 応答時間が 100 倍程度速くなり、エネルギー分解能は数倍程度増加する。これまでに 5.9 keV の X 線に 対して  $\Delta E_{\rm FWHM}$ = 1.6 eV というエネルギー分解能が GSFC/NASA により報告されている。TES 型 X 線マイクロカロリメータは 2013 年 1 月に打ち上げ予定のロケット実験「*Micro-X* (米)」に搭載され、初 の X 線分光観測が行われる予定である。その後、2016 年に打ち上げ目標の日本の衛星「*DIOS*」にも搭



図 1.9: 超伝導薄膜の相転移端。

載され、WHIM 探査に利用される予定である。また地上の分析装置として、SEM などの EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer) としての研究もすすめられている。

#### 1.3.7.3 金属磁気型 X 線マイクロカロリメータ

金属磁気マイクロカロリメータ (MMC: Metallic Magnetic Calorimeter) は素子の温度上昇を電気抵抗の変化として読み取る代わりに、強磁性体の磁化の変化として読み出す (図 1.10)。常伝導金属中に磁性原子 (エルビウム Er が主流) をドープした金属磁気温度計に、磁場を印加し磁化量の温度変化を測定する。磁気カロリーメータのエネルギー分解能は、素子のフォノンノイズと SQUID 読み出し系のノイズによって決まる。ドイツのハイデルベルグ大学とアメリカのブラウン大学の共同研究により開発が進められており、エルビウム-金の素子による金属磁気型 X 線マイクロカロリメータでは、5.9 keV の X線に対して  $\Delta E_{\rm FWHM}$ = 2.7 eV というエネルギー分解能が得られている。



図 1.10: 金属磁気マイクロカロリメータ (MMC)の概要図。

#### 1.3.7.4 動インダクタンス検出器

動インダクタンス検出器 (KID: Kinetic Inductance Detector) は、光子の入射による温度変化によって Cooper 対の密度が変化することで生じる超伝導体のインダクタンス (動インダクタンス) の変化を温

度計として用いる。動インダクタンスの変化は高周波 (GHz) 帯の LC 共振回路を用いて共振周波数の 変化を測定することで読み出す。この方法を用いることで、LC 共振回路の並列という簡単な仕組みに よって数千もの多素子アレイを実現することができる。最近ではマイクロ波の高感度イメージング検出 器としての開発に重点が置かれている (図 1.11)。



図 1.11: 動インダクタンス検出器 (KID)。

#### 1.4 次世代のX線分光器に要求される性能

1.12 に近年開発が進められている X 線分光検出器のエネルギー分解能の変遷を示す。X 線天文学初期 から X 線検出器の性能は向上し続けており、エネルギー分解能に至っては 3 桁も改善されていることが 分かる。これまで宇宙 線の観測に用いられてきた X 線検出器としては、撮像に特化したマイクロチャン ネルプレートや X 線 CCD カメラ、分光に特化した回折格子等があるが、次世代の X 線検出器としては 広視野に渡って精細な X 線画像が得られる撮像性能と同時に高いエネルギー分解能を合わせ持つ総合的 な検出器が必要とされる。

#### 1.4.1 ミッシングバリオン問題

現在の宇宙のエネルギー密度は、ダークエネルギーが約7割、物質が3割である。さらに物質全体の8 割は暗黒物質 (ダークマター) と呼ばれる未知の粒子であり、直接観測が可能な通常物質 (バリオン) は物 質全体の2割、宇宙のエネルギー密度の4% にすぎない。しかし、現在存在しているバリオンのうち観測 にかかるほど高密度で高温度のものは、バリオン総量のたった10% 程度でしかない。他の波長域での観 測を合わせても半分程度が直接観測されていないのである。現在の宇宙に存在するバリオンの半分が未 だ検出されていないこの問題を「missing baryon 問題」といい、これらのバリオンを総じて dark baryon ないしは missing baryon と呼ぶ。missing baryon は宇宙流体シミュレーションによって、密度が小さい 領域については銀河団同士をフィラメント状につなぐ 10<sup>5</sup>-10<sup>7</sup> 程度のガスとなって分布していることが 示唆された。この希薄なガスを総じて中高温銀河間物質 (WHIM: Warm-Hot intergalactic Medium) と いう。

WHIM は他の温度帯のガスよりも最もダークマターの分布をトレースしていることが のシミューレ ションによって言われており、WHIM を広視野で観測することがダークマターの構造を解明することに



図 1.12: X 線分光検出器のエネルギー分解能の変遷。

つながるのである (図 1.13)。10<sup>5</sup>-10<sup>7</sup> 程度のガスは電離酸素のアバンダンスが最も大きく、これらの輝 線吸収線が卓越する。WHIM は X 線で明るく輝く銀河団に比べると、温度が低く密度が希薄であるた め、熱制動輻射の強度は極めて低く観測することが難しい。明るい活動銀河核を背景光として、WHIM による紫外線や X 線の吸収線の観測も行われているが、この方法で検出できるのは特定の方向にある ガスだけであり、WHIM の広がりや構造を見ることはできない。そこで OVII、OVIII の輝線吸収線を X 線でダイレクトに観測することができれば WHIM の空間分布を明らかにすることができる。現在の X 線検出器では WHIM を観測するに十分なエネルギー分解能と視野を備えていない。そのため missing baryon 問題解決のためには次世代の X 線望遠鏡とよりよい検出器が求められている。

#### 1.4.2 DIOS ミッション

WHIM 検出のため、我々は軟 X 線精密分光ミッション「*DIOS* (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)」を進めている (図 1.14)。*DIOS* ミッションは、宇宙に広がる電離した銀河間物質からの酸素輝線検出 を通じて missing baryon の存在とその物理的諸性質を探ることを主目的としたものである。酸素輝線 -OVII (561 eV、568 eV、574 eV)、OVIII (653 eV) - を精密 X 線分光することで赤方偏移 0 < z < 0.3 の範囲の 10<sup>5</sup>-10<sup>7</sup> の WHIM を直接検出する。これによって可視光での銀河の赤方偏移サーベイ、X 線の 銀河団観測と相補的な新しい宇宙の窓が開かれることが期待できる。それと同時に、OVII と OVIII の 輝線吸収線強度比、輝線の微細構造と輝線幅から、ガスの加熱機構、ガスの運動状態等も明らかにする。 宇宙の構造形成により一部の物質は銀河や星へとフィードバックし、その一方で余剰なエネルギーは物 質と共に銀河空間に放出されたはずである。WHIM はこれらの構造をトレースしている。*DIOS* はこれ を明かにし宇宙の構造形成史にも迫る。図 1.15 に *DIOS* の 10 万秒の観測で期待される WHIM からのエ ネルギースペクトルを示す。視線内に存在する WHIM からいろいろな赤方偏移の輝線が見えることが わかる。シミュレーション結果から、輝線に対する感度として約 1011 /erg/cm<sup>2</sup>/sr があれば、全バリオ ンの 20~30% が検出できると言われている (図 1.16)。ここから観測時間として 1 Msec 程度を仮定すれ ば、WHIM 検出のために検出器に要求される性能は  $S\Omega$ ~100 cm<sup>2</sup>deg<sup>2</sup> となる。また、図 1.17 は *DIOS* 



図 1.13: 流体シミュレーションによる銀河団周辺の物質 分布。



図 1.14: DIOS 衛星。



図 1.15: *DIOS* の 10 万秒の観測で期待される WHIM からのエネルギースペクトル。

の視野 × 面積、エネルギー分解能を他の衛星と比較したものである。*DIOS* は視野 × 面積が非常に大き くまたエネルギー分解能にも優れているため、空間的に広がった輝線に対する検出感度はすざく衛星の 40 倍以上を持つことができる。

このように *DIOS*は大きく広がった天体に対する X 線分光に特化した観測装置である。*DIOS*に搭載 する検出器として以下に示す TES 型マイクロカロリメータを極低温下 (50 mK) で用いる必要がある。 さらに望遠鏡との兼ね合いから決まる有効面積を広げるために、TES カロリメータを 16×16 素子以上 のアレイ化にしなければならない。現在、首都大、宇宙研をはじめとした我々の研究グループではカロ リメータ素子のアレイ化に向けた研究がなされている。



図 1.16: 2 種類の酸素輝線を使って検出できる近傍宇宙のダークバリオンの割合 (横軸: 検出器の検出限界、緑の縦線: *DIOS*の典型的な検出限界)。



図 1.17: いろいろなミッションの広がった輝線放射に対する観 測能力の比較 (縦軸: 視野 × 面積、横軸: エネルギー分解能)。

## 第2章 TES型X線マイクロカロリメータ

超伝導遷移端の急激な抵抗変化を利用する TES 型 X 線マイクロカロリメータ (以下、TES カロリメー タ)を開発するにあたって、その超伝導の性質を理解することが重要である。この章では TES カロリ メータの原理と世界の開発状況について述べる。

#### 2.1 X線マイクロカロリメータの構造

X線マイクロカロリメータ (以下、マイクロカロリメータ) は、入射 X線光子の1つ1つのエネルギー を素子の温度上昇として測る検出器である。入射する X線の温度上昇は極めて小さいものであるが (~ 数 mK)、素子を~100 mK と極低温下で動作させ、さらに高感度の温度計を用いることで、微小な温 度上昇を計測できる。マイクロカロリメータは図 2.1 に示すように、温度 T に冷やされた熱容量 C の吸 収体と温度計からなる構造をしており、適度に悪い熱伝導度 G を持つサーマルリンクを通じて、より低 温の熱浴と接続され、定常状態に保たれている。各構成要素の役割を表 2.1 に示す。



図 2.1: マイクロカロリメータの構造

マイクロカロリメータの素子は、入射 X 線のエネルギーを高い効率で光電吸収する X 線吸収体として の能力と素子の温度上昇を高い精度で測定する温度計としての能力を持ち合わせている必要がある。ま た、X 線が入射した際に素早く熱化し、十分熱化した後に素早く熱拡散する必要性もある。

#### 2.1.1 吸収体

素子に入射した X 線は光電吸収によってエネルギーを失う。マイクロカロリメータでは高い確率で吸 収体中で X 線を止め、そのエネルギーを完全に熱エネルギーに変える必要がある。吸収体には原子番号 の大きい物質を用い、その面積と厚さを増すことで検出効率を高くすることが可能である。しかし、素

構成要素	役割
X 線吸収体	光子を吸収し、入射エネルギーを熱に変換する
	発生した熱を全て温度計に入力する
温度計	吸収体にて生じた温度変化を電気信号に変換する
熱リンク	発生した熱をヒートシンクに排出する
熱浴 (ヒートシンク)	系の温度を初期値に保つ

表 2.1: マイクロカロリメータを構成する要素の役割。

子が大きくなるとその分熱容量が大きくなるので、エネルギー分解能が悪くなる。また、熱化にかかる 時間が遅いと吸収した熱が逃げてしまうので、エネルギー分解能が悪化する。以上より、吸収体として 用いる物質には高い吸収効率、小さい熱容量、速い熱化という条件を同時にクリア可能な物質が適して いる。

以下に物質の種類に応じた特徴を挙げる。

絶縁体と半導体

絶縁体や半導体はバンドギャップの不純物準位に電子がトラップされ、準安定な状態を形成する。 そのため熱化が不完全であったり、安定性に欠ける。

• 準金属

ビスマス、水銀テルルなどの準金属は熱化が比較的速いが、デバイ温度が低く格子比熱が大きい。 すざく衛星に搭載された XRS では水銀テルルを用いている。

- 常伝導金属
   純粋な常伝導金属は熱化が非常に速いが、電子比熱が大きいため検出器のサイズが限られる。
- 超伝導金属

超伝導金属は超伝導遷移温度よりも充分に低温に於いて、電子比熱が小さくなる。従って、原子 番号が大きく、デバイ温度の高いものを用いれば比熱を押えつつ高い検出効率を実現できる。し かし、超伝導遷移温度よりも充分な低温では準粒子を生成する。再結合をするまでの時間、つま り準粒子の寿命が長い影響で熱化が非常に遅くなる。

#### 2.1.2 温度計

半導体や金属の温度に依存した抵抗変化を測定することで、X線フォトン入射時の温度変化を調べる ことができる。温度計の感度を表すパラメータ α を、

$$\alpha \equiv \frac{\mathrm{d}\,\ln R}{\mathrm{d}\,\ln T} = \frac{R}{T} \frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}T} \tag{2.1}$$

として定義する。この値は無次元量であり、αが大きい程温度変化に対する感度が高く、小さい温度変 化でも精密に測定することができる。

#### 2.2 X線マイクロカロリメータの原理

マイクロカロリメータを用いた X 線観測では、素子は極低温に冷却され、一定の温度に保たれる。この時の温度を動作点と呼ぶことにする。吸収体に入射した X 線光子は光電吸収され、即座にそのエネル ギーのほとんどが熱に変わる。この際に生じる温度上昇 ΔT は

$$\Delta T = \frac{E}{C} \tag{2.2}$$



図 2.2: X 線入射によるマイクロカロリメータの温度変化。

となる (図 2.2)。厳密には入射 X 線による素子の温度上昇で C も変化するので、エネルギーと温度上 昇の関係には非線形性がある。吸収体で生じた熱はサーマルリンクを介して低温熱浴へとゆっくりと流 れ、再び定常状態へと戻る。素子が定常状態に戻るまでの時定数  $\tau$  は、C と G で決まる。典型的に数 100  $\mu$ sec 程度である。ここで C と G はそれぞれ温度計を含めたカロリメータ素子の熱容量と熱リンク の熱伝導度である。従って温度上昇  $\Delta T$  を測れば光子のエネルギーを測定できる。

$$\tau = \frac{C}{G} \tag{2.3}$$

この時、温度測定の精度は熱リンクを通してランダムに熱が出入りすることによって生じる素子の温度揺らぎ (Phonon ノイズ) で原理的に決まってしまう。その大きさは直感的に見積もることができる。 温度 T の物質中のフォノンの平均のエネルギー  $\varepsilon$  は

$$\varepsilon = k_B T \tag{2.4}$$

である。一方、熱容量 C の物質の持つ全エネルギーは CT であるので、平均のフォノンの数 N は以下のようになる。

$$N = \frac{CT}{k_B T} \tag{2.5}$$

フォノンの数の統計的な揺らぎはポアッソン分布に従うので、その分散は

$$\sigma(N) = \sqrt{\frac{CT}{k_B T}} \tag{2.6}$$

となる。これから、温度の分散は

$$\sigma(T) = \frac{\sigma(N)k_BT}{C} \tag{2.7}$$

となり、フォノン数の揺らぎによる素子のエネルギー分解能は

$$\sigma(E) = \sigma(N)k_BT = \sqrt{\frac{CT}{k_BT}}k_BT = \sqrt{k_BT^2C}$$
(2.8)

と見積もられる。マイクロカロリメータにおいて高いエネルギー決定精度 (エネルギー分解能) を実 現するためには、信号雑音比をできるだけ大きくして、素子の温度上昇を精密に測定する必要がある。 信号量を大きくするためには、X線エネルギーを大きな温度上昇に変えてそれを高感度の温度計で測定 すればよい。また、素子の熱容量 C が低温では温度に強く依存することがわかる。ここで、C として格 子比熱および電子比熱を考える。フェルミ (Fermi) 温度とデバイ (Debye) 温度よりもはるかに低い温度 に於いては、金属の定積比熱 c はフォノンに起因する格子比熱 c<sub>1</sub> と伝導電子に起因する電子比熱 c<sub>e</sub> と の和として、

$$c = c_{\rm l} + c_{\rm e} = \alpha T^3 + \gamma T \tag{2.9}$$

と書ける。これよりそれぞれ温度の3 乗および1 乗に比例し、エネルギー分解は温度の5/2 から3/2 乗に比例する。よって、素子の動作温度を可能な限り低くすることも重要である。現実的に T は冷凍機 によって安定に保持することができる~100 mK が主流である。典型的に C は最小 pJ/K オーダーとな り、結局、keV オーダーの X 線エネルギーを最大 mK オーダーという微小な温度上昇として測定するこ とになる。これを精密に測定するためには高感度の温度計とノイズの抑制が必要となる。

#### 2.3 超伝導遷移端温度計 (TES: Transition Edge Sensor)

私たちのグループでは、温度計に超伝導遷移端温度計 (TES: Transition Edge Sensors) を採用してい る。この温度計に超伝導物質を用い、超伝導-常伝導相転移端の急激な抵抗-温度変化により素子の温度 上昇を計測する仕組みである。遷移幅は典型的には数 mK という非常に狭い温度範囲で起こるため、温 度計の感度 α は従来使用されてきた半導体温度計より遥かに高い感度を有する。典型的に α~1000 程度 が可能であり、半導体マイクロカロリーメータにと比較すると 100 倍程度向上する。これにより応答速 度、分解能を著しく改善する事が可能になる。以下に相転移点付近での温度に対する抵抗の変化の様子 を示す。



図 2.3: 相転移点付近での温度に対する抵抗の変化。

#### 2.4 ノイズとエネルギー分解能

TES カロリメータにはいくつかのノイズが存在しており、これらがエネルギー分解能に制限を与えて いる。熱リンクを通して熱がランダムに流れ発生する温度揺らぎ (Phonon ノイズ) や温度計の抵抗に発 生する電気的な熱雑音 (Johnson ノイズ) などである。この他にも測定系セットアップに起因した外来ノ イズ (読み出しノイズ) や、吸収体-TES 間の熱揺らぎなど製作方法に依存した内因的ノイズ、原因不明 の超過ノイズ (Excess ノイズ) が存在する。図 2.4 は理想的な TES カロリメータの典型的な Phonon ノ イズと Johnson ノイズ、読み出し回路系のノイズを仮定した場合の X 線信号の電力スペクトルとノイズ の電力スペクトル密度である。phonon ノイズのスペクトル密度は,信号の周波数応答と同じ形をしてい て,回路系が応答できない周波数帯では急激に小さくなる。これに対して、Johnson ノイズはのフィー ドバックループを回った成分と直接出力に現れる成分が互いに打ち消しあうので回路系が応答する周波 数帯域では逆に小さくなる。読み出し装置として低雑音の SQUID (2.6 節) を用いると読み出しノイズ は、Phonon ノイズと Johnson ノイズの和よりも図 2.4 に示すように小さくすることが可能である。



図 2.4: 理想的な TES 型 X 線マイクロカロリメータの X 線信 号の電力スペクトルとノイズの電力スペクトル密度。

Phonon ノイズを考慮した原理的なエネルギー分解能は

$$\Delta E \simeq 2.35 \sqrt{\frac{4k_B T^2 C}{\alpha} \sqrt{\frac{n}{2}}}$$
(2.10)

と一般的に表される。ここで。 $\Delta E$  は検出器のエネルギー分解能を半値幅で定義したもので (1.2.1 節)、  $\Delta E = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma(E) = 2.35 \sigma(E)$  である。 $\alpha$  は温度計の感度 (式 2.1) であり、n は熱伝導度の温度依存性に よる項である。式 2.10 に TES カロリメータの典型的な値を代入すると、

$$\Delta E \simeq 1.3 \text{eV} \left(\frac{T}{100 \text{mK}}\right) \left(\frac{C}{1 \text{pJ/K}}\right)^{1/2} \left(\frac{\alpha}{100}\right)^{-1/2}$$
(2.11)

と理想的な TES カロリメータのエネルギー分解能を見積もることができる。n は電子-フォノン相互 作用により5を代入している。式2.10より、より高いエネルギー分解能を実現させるには『動作温度 T を下げ、素子の熱容量 C を抑え、温度計感度 α を大きくすること』が必要である。しかし、ある程度の 制限も存在する。X 線光子のエネルギーが大きいと温度変化によって遷移端から外れてしまい、エネル ギー分解能は式で得られた理論値より悪くなってしまう。よって入射 X 線の最大エネルギー Emax は

$$\Delta E_{max} \simeq \frac{CT}{\alpha} = 6.3 \text{keV} \left(\frac{T}{100 \text{mK}}\right) \left(\frac{C}{1 \text{pJ/K}}\right) \left(\frac{\alpha}{100}\right)^{-1}$$
(2.12)

と制限される。つまり、目標とするエネルギーバンドとエネルギー分解能を考慮した上で、最適な  $\alpha$  と C を見積もる必要がある。Johnson ノイズも考慮すると式 2.10 は

$$\Delta E \simeq 2.35 \sqrt{\frac{4k_B T^2 C}{\alpha}} \sqrt{\frac{n}{2}(1+2\beta)(1+M^2)}$$
(2.13)

となり、式 2.12 を代入すると

$$\Delta E \simeq 2.35 \sqrt{4k_B T \sqrt{\frac{n}{2}(1+2\beta)(1+M^2)E_{max}}}$$
(2.14)

と表すことができる。ここで、 $\beta$ は TES の電流感度であり、 $\beta$ =dlnR/dlnIで表される。また M は Excess ノイズのファイクターである。

#### 2.5 電熱フィードバック (ETF: Electro-Thermal Feedback)

TES は温度計として非常に高い感度を持っているが、感度を持つ温度域、つまり超伝導遷移幅が非常 に狭い (~ 1mK)。この狭い温度範囲に動作点を制御するには、TES を定電圧バイアスで動作させ、強 いフィードバックをかけることで実現する。

#### 2.5.1 電熱フィードバック下の温度変化に対する応答

図 2.5 左に示すような定電圧バイアスで TES を動作させた場合を考える。熱入力によって温度が上昇 すると、TES の抵抗値は急激に増加する。定電圧なので電流は減少し、ジュール発熱も減少する。この ように、熱入力を打ち消す方向にジュール発熱量が急激に変化して負のフィードバックが働くので、素 子の温度も安定に保たれる。



図 2.5: 左図: 定電圧バイアス 右図: シャント抵抗を使って疑 似的に作る定電圧バイアス

実際には TES と並列にシャント抵抗をつないで、疑似的に定電圧バイアスを実現する (図 2.5 右)。以下では理想的な定電圧バイアスで動作しているものとする。

熱伝導度は

$$G \equiv dP/dT \tag{2.15}$$

で定義される。一般的に熱伝導度は温度依存性を持ち、

$$G = G_0 T^{n-1} (2.16)$$

と温度に対するべき n を用いて表され、3~5 程度である。熱浴と TES との間の熱伝導度を考える。一 般に T≫T<sub>bath</sub> であるので、熱浴との熱伝導度による熱の流れは

$$P = \int_{T_{bath}}^{T} G dT = \frac{G_0}{n} \left( T^n - T_{bath}^n \right)$$
(2.17)

と式 (2.15) を積分して計算できる。

平衡状態では、TESの温度を $T_0$ として、TESにおけるジュール発熱  $P_b \equiv V_b^2/R_0$ とカロリメータピ クセルから熱浴へ流れる熱量とがつり合っているので、

$$P_{\rm b} = \frac{G_0}{n} \left( T_0^n - T_{bath}^n \right) \tag{2.18}$$

と書ける。ただし、 $V_b$  はバイアス電圧、 $G_0$  は $G = G_0 T^{n-1}$ を満たす定数 (G は熱伝導度)、 $R_0$  は動作 点での TES の抵抗値、 $T_{bath}$  は熱浴の温度である。

微小な温度上昇  $\Delta T \equiv T - T_0$  によって素子の温度が *T* になった場合、内部エネルギーの変化は熱の 収支に等しいので、

$$C\frac{dT}{dt} = \frac{V_{\rm b}^2}{R(T)} - \frac{G_0}{n} \left(T^n - T_{bath}^n\right)$$
(2.19)

が成り立つ。温度上昇 ΔT は1次の近似で、

$$C\frac{d\Delta T}{dt} \simeq -\frac{V_b^2}{R_0^2}\Delta R - G_0 T^{n-1}\Delta T$$
(2.20)

$$= \frac{P_{\rm b}\alpha}{T}\Delta T - G\Delta T \tag{2.21}$$

となる。最後の項の G は TES の温度 T での熱伝導度 G(T) を表す。以後単に G と書いた場合は TES の 温度 T での熱伝導度を表すこととする。式 (2.20)の解は、

$$\Delta T = \Delta T_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{eff}}}\right) \tag{2.22}$$

と書ける。ただし、

$$\tau_{\rm eff} \equiv \frac{C/G}{1 + \frac{P_{\rm b}\alpha}{GT}} \tag{2.23}$$

$$= \frac{\tau_0}{1 + \frac{P_{\rm b}\alpha}{GT}} \tag{2.24}$$

は有効時定数である。式 (2.18)、(2.24) より、<sub>てeff</sub> は

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{\tau_0}{1 + \frac{\alpha}{n} \left(1 - \left(\frac{T_{bath}}{T}\right)^n\right)}$$
(2.25)

のように書ける。さらに、熱浴の温度が TES の温度よりも十分に低い場合  $(T^n_{bath} \ll T^n)$  は、

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{\tau_0}{1 + \frac{\alpha}{n}} \tag{2.26}$$

$$\approx \frac{n}{\alpha} \tau_0$$
 (2.27)

と近似できる。ただし、式 (2.27) は α/n ≫ 1 の場合である。このように、α が大きい場合は、電熱フィー ドバックによって応答速度が非常に速くなることがわかる。また、X 線のエネルギーは電流値の変化と して読み出され、

$$\Delta I = \frac{V_{\rm b}}{R(T_0 + \Delta T)} - \frac{V_{\rm b}}{R(T_0)}$$
(2.28)

$$\simeq -\frac{\Delta R}{R}I \tag{2.29}$$

$$\simeq -\alpha \frac{E}{CT} I \tag{2.30}$$

となる。

### 2.6 SQUID を用いた読み出し系

TES の電流変化を読み出すには、低ノイズ、低インピーダンスの電流計が必要である。その点で、 SQUID は最良の電流計である。

#### 2.6.1 dc-SQUID



図 2.6: dc-SQUID の模式図

SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) とはジョセフソン効果を利用した素子で、 図 2.6 のように 2 つのジョセフソン接合を並列に持つリングである。2 つの接合の位相差とリングを貫く 磁束との間には

$$\theta_2 - \theta_1 = 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0} \tag{2.31}$$

という関係がある。ただし、 $\theta_1 \ge \theta_2$ はそれぞれのジョセフソン接合での位相差、 $\Phi$ はリングを貫く磁 束、 $\Phi_0$ は磁束量子で、

$$\Phi_0 \equiv h/2e = 2.06 \times 10^{-15} \text{ Wb}$$
(2.32)

という定数である。ジョセフソン接合が超伝導状態のとき、バイアス電流 IB は

$$I_{\rm B} = I_0 \cos\left(\pi \frac{\Phi_{\rm exp}}{\Phi_0}\right) \sin\left(\theta_1 - \pi \frac{\Phi_{\rm exp}}{\Phi_0}\right)$$
(2.33)

となる。ただし、  $I_0$  は接合の臨界電流、 $\Phi_{\text{ext}} \equiv \Phi - LJ$  は外部磁束、 $L \ge J$  はリングの自己インダク タンスとリングを循環する電流である。したがって、SQUID が超伝導でいられる最大の電流、すなわち SQUID の臨界電流は

$$I_{\max} = 2I_0 \left| \cos \left( \pi \frac{\Phi_{\text{ext}}}{\Phi_0} \right) \right|$$
(2.34)

となる。このように、SQUID の臨界電流は外部磁束によって変化する。2*I*<sub>0</sub>より大きなバイアス電流で SQUID を動作させると、臨界電流が変化することにより、外部磁束の変化に対して出力電圧が変化する ようになる。したがって、SQUID の隣にコイルを置くことによって、SQUID を非常に感度の高い電流 計として扱うことが可能になる。カロリメータの読み出し系として SQUID を用いた場合の摸式図を図 2.7 に示す。



図 2.7: SQUID を用いたカロリメータの読み出し系

#### **2.7** 世界の開発状況

#### 2.7.1 開発の歴史

1941 年、Andrews は 3.2 K の超伝導遷移端中のタンタル細線を流れる電流を利用し、温度変化による 抵抗の変化から赤外線の信号を検出した。これは TES を利用した史上初のボロメータである。また彼は 1949 年に 15 K の遷移端中にある窒化ニオブのストリップを流れる電流を利用し、アルファ粒子の崩壊 に伴う電圧パルスを計測することに成功した。これも史上初となる TES 型カロリメータの検出実証で ある。

だが上記の発明から半世紀の間、TES型検出器の応用はあまり行われてこなかった。開発を阻む顕著な 障害となったのは、FET アンプに対して TES のノイズをマッチングさせることが難しい点である (TES の典型的な常伝導状態の抵抗は数 Ω か、それ以下である)。近年では低抵抗な TES 型検出器に対して、 容易にインピーダンスマッチングが取りやすい超伝導量子干渉計 (SQUID: Superconducting Quantum Interference Device)を用いた電流増幅によって、この問題は解決された。SQUID 系による電流読み出 しと電圧バイアスの動作制御を導入した ことで、過去十年の間に TES 型検出器は飛躍的な進歩を遂げ た。TES カロリメータは、多素子サブミリ観測器として天文観測に応用されている。X 線分光器とし ては、提案段階であり、まだ観測は行われていない。MIT が中心となって計画されているロケット実験 *Micro-X* が最初の観測となる可能性が高い。

#### 2.7.2 世界の開発状況

TES カロリメータの開発は、世界最高性能を出し続けているアメリカの NASA/GSFS をはじめ、様々な機関で行われている。NASA/GSFC では、TES である超伝導金属に Mo、常伝導金属に Au を使用した二層薄膜の構造を採用している。多くのミッションへ向けた素子開発をしており、中でも太陽フレアからの X 線ジェット観測に向けた TES カロリメータで  $\Delta E_{FWHM}$ =1.6 eV@5.9 keV という世界最高性能を達成している。デザインは 32×32 ピクセルのアレイ素子で、35  $\mu$ m 角の TES の上に Au のマッシュルーム吸収体が 4.5  $\mu$ m の厚さで形成されている。図 2.8 に最高性能を出した素子の写真を示す。また図 2.9 が 5.9 keV の X 線を照射した際のエネルギースペクトルである。



図 2.8: 世界最高のエネルギー分解能を持つ GCSF/NASA の TES カロリメー タ。(a) 32×32 ピクセルアレイの全体像。 (b) TES カロリメータの SEM イ メージ。 (c) (b) の拡大イメージ。

アメリカの NIST (National Institute of Standards and Technology) でも TES カロリメータの開発が なされており、こちらでは TES に Mo と Cu の 2 層薄膜を採用している。400  $\mu$ m 角の TES に 5.9 keV の X 線を照射したところ、 $\Delta E_{FWHM}$ =2.4 eV という高性能を達成している。また、こちらではより高い エネルギー帯域である y 線を測る TES カロリメータも開発されている。構造は Mo/Cu の TES の上に 1 mm 角の Sn が吸収体として形成されている。こちらは 103 keV の y 線を照射し、 $\Delta E_{FWHM}$ =42 eV を 達成している。図 2.10 に NIST の中で最高性能である TES カロリメータの写真とエネルギースペクト ルを示す。図 2.11 には y 線カロリメータの写真とスペクトルを示す。

このように他機関においても TES カロリメータの開発は活発である。高性能な単素子の基礎開発は もちろんのこと、多素子化へ向けた開発を日本でも行われてきた。次章では日本のこれまでの開発状況 と製作方法などを詳しく説明する。



図 2.9: GCSF/NASA の TES カロリメータに X 線を照射した際に得られたエ ネルギースペクトル。



図 2.10: (a) NIST の TES カロリメータ。(b) X 線を照射した際に得られたエネル ギースペクトル。


図 2.11: (a) TES 型 y 線カロリメータの1 ピクセルの写真。 (b) y 線カロリメータの全体像。 (c) y 線を照射した際に得られたエネルギースペクトル。

# 第3章 これまでの開発状況

2006 年から TES カロリメータ素子の製作、測定を全てグループ内 (主に首都大学東京 (以下、首都 大)、宇宙科学研究本部 (以下、宇宙研) の2機関) で行える環境を整えている。この章ではこれまでに 製作し評価してきた単ピクセル素子、多ピクセル素子の開発結果を述べる。

## 3.1 単層配線型 TES の開発

TES カロリメータ素子の基礎研究として、まず 4×4の 16 ピクセル素子を製作し、単素子の性能評価 をおこなってきた。TES 温度計には超伝導金属 (Ti) と常伝導金属 (Au) の二層薄膜を採用している。前 章で述べたように、他機関では超伝導金属に Mo、常伝導金属には Cu を使用するなど TES に用いる金 属はさまざまである。次小節では TES に使用している金属の選定について述べる。

#### 3.1.1 TES に用いる金属の必要条件と選定

TES カロリメータは~100 mK という極低温下で能力を発揮する検出器である。温度計に超伝導金属 を用いることでこれを満たすことが可能である。合金や化合物の超伝導体でも転移特性を急峻にするこ とは可能であるが、現実的には α の高い超伝導転移特性を得るための手段として、単体の超伝導体を用 いたほうがよい。これは合金や化合物では、分散や結晶構造の不均一によって超伝導転移がなだらかに なり、2 段階以上の転移や α の低下を引き起こしやすいからである。また、1 K 以下で超伝導転移を起 こすような材料もまた、単体金属に多い。

上記に理由で、TESの材料としてTiを選択した。Tiは非常に酸化しやすい金属である。このため、 Auを保護層としてTi上に形成する二層薄膜にしている。バルクTiの超伝導転移温度Tcは390mKで あり、要求される~100mKよりも高いが、薄膜のTcがバルクのTcと異なる場合があることはよく 知られている。これは薄膜がコヒーレンス長や磁界侵入長を無視できない厚さになったとき、電子間引 力相互作用の変化によってTcが変動するためである。このような効果は一般に「薄膜効果」と呼ばれ ている。また、超伝導薄膜と常伝導薄膜を積層すると、クーパー対が常伝導体に入り込むため、両者の 膜厚比に依存して転移温度が下がる効果がある。この効果は「近接効果」と呼ばれている。この2つの 効果を用いることによって、Tcをコントロールすることが可能になる。また変質しやすい金属であって も、その上に安定な金属を常伝導層を重ねることにより、超伝導層の保護膜としての効果を得ること可 能である。保護膜はTESの経時劣化を防ぐだけでなく、プロセス中にTESが受けるダメージを防ぐ効 果もある。

#### 3.1.2 製作プロセス

上記の性能を出した素子の製作には MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を利用してい る。MEMS はシリコンプロセス技術を用いることにより、デバイスの小型化はもちろんのこと、多数の マイクロデバイスをサブミクロンの精度で製作することが可能であり、医療・バイオ分野、各種センサ 分野など幅広い分野への研究開発が活発に行われている。

ここでは精密加工性に優れた MEMS 技術を用いた素子の製作過程を述べる。



単層配線型 TES カロリメータ素子の製作工程は以下のような6段階で構成されている。

図 3.1: 単層配線型 TES 製作の流れ。

#### 3.1.3自作した単素子の最高性能

これまでに自作した 200 µm 角の TES カロリメータ素子 (TMU146-4d) では、5.9keV の X 線に対 して  $\Delta E_{\rm FWHM}$ =2.8 eV という最高性能を達成している。これは世界最高性能である NASA/GSFC の  $\Delta E_{\rm FWHM}$ =1.6 eV に迫る高いエネルギー分解能である。以下に最高性能素子とエネルギースペクトルを 示す (図 3.2)。200 µm 角の TES (Ti/Au) の上に 120 µm 角の Au の吸収体がのっている。



図 3.2: 自作した最高性能素子 (TMU146-4d)。(a) 16 ピクセル全体。(b) 1 ピクセルの拡大写 真。(c) Mn-Ka を照射した際に得られたエネルギースペクトル。

## 3.1.4 自作した多素子の最高性能

衛星搭載を目的とし、 $16 \times 16 \circ 256$ ピクセルアレイ素子も開発もおこなってきた。こちらは三菱重工業 株式会社 (MHI: Mitsubishi Heavy Industries) と共同で開発を進め、構造は 200  $\mu$ m 角の TES (Ti/Au) のみで吸収体はのっていない。この 256 ピクセル素子に 5.9keV の X 線を照射し、 $\Delta E_{\text{FWHM}}$ =4.4 eV の 分解能を得ている。以下に最高性能素子とエネルギースペクトルを示す (図 3.3)。



図 3.3: MHI 素子。(a) 基板全体図。(b) 1 ピクセルの拡大写真。 (c) Mn-Ka を照射した際に 得られたエネルギースペクトル。

#### **3.1.5** 課題と解決方法

DIOS 用素子のピクセル数は 400 ピクセルと、これまでチーム内で製作してきた素子よりも遥かに多い。ピクセル数が増えるとそれを読み出す配線の形成が難しくなってくる。従来は TES の両端から延ば す配線デザイン (単層配線)を使用しており、一番多いアレイで 16×16 であった。この従来の形の配線 でさらに密集したアレイ化を目指すには大きく 3 つの課題が生まれる。

1. 密集、アレイ化に伴う配線スペースの問題

単層配線を利用してのアレイ化はこれでに製作した 16×16 の 256 ピクセルが限界である。これ以 上密集させると、線幅を細くして配線数が増えてしまい、製作面でも困難である。配線の表面形 状による影響が顕在化することで、完全に超伝導転移できずに残留抵抗を示してしまう可能性が ある。

2. ピクセル間のクロストーク

配線数が増える事により、配線間隔が狭まり、配線電流やピクセルから発生する磁場が他配線や素 子に対して誘導起電力を発生させてしまい、余分な電流を流してしまう (クロストーク)。

3. 配線のループによる自己インダクタンスによる影響

単層配線はループ構造をしていて、コイルのような形になっている。よって配線電流の大きさが 変わったときに、磁場の変化を打ち消す方向に逆起電力が発生してしまう。

これらの問題を解決すべくアレイ素子の読み出し配線のデザインには、単層配線ではなく配線を絶縁 膜を挟んで重ね合わせた「折り返し配線 (超伝導積層配線)」の開発に取り組んだ。

## 3.2 積層配線多素子 TES の開発

超伝導積層配線とは、ホットとリターン側の配線の絶縁膜を挟んで重ね合わせ折り返した配線である。 ホットとリターン側の配線を重ね合わせることで配線スペースが削減され、より充填率の高い素子構造 を形成できる。また配線自身で磁場がキャンセルされるため、クロストークを十分小さく抑えることが できる (要求値よりも 0.1%小さくなる)。上部配線 (ホット側) と下部配線 (リターン側)の間には絶縁 膜を挟み込んでおり、SiO<sub>2</sub>を使用している。またコンタクトホールと呼ばれる地点で上部と下部の配線 が接触し、折り返す構造になっている。

開発グループは、配線素材、幅、膜厚の選定を行った。そして、単層配線型の製作プロセスに変更を 加えることで、積層配線基板を用いたカロリメータの製作プロセスの確立に成功した。

#### 3.2.1 製作プロセス

積層配線型 TES カロリメータ素子の製作工程は以下のような5段階で構成されている。なお、Al 配線は加工前から基板に形成されてある。



図 3.4: 積層配線基板の製作プロセス。

## 第4章 実験装置と性能評価方法

TES 型マイクロカロリメータの性能評価に必要な実験装置は首都大学東京南大沢キャンパスにそろっている。TES 型カロリメータの微小な電流変化の読み出しには、SQUID (超伝導量子干渉計)を用いている。SQUID を使用する理由として、低インピーダンス、低ノイズという2つの条件を満たしていることがあげられ、また極低温で動作できるということも大きな利点である。

この4章では、素子の性能評価に用いた実験装置と性能評価方法について簡単にふれる。

## 4.1 首都大希釈冷凍機

カロリメータの性能を引き出すには、極低温で動作させることが必須であり、~100 mK 以下の冷凍 能力をもつ冷凍機が必要である。この冷凍機として、希釈冷凍機を使用した。希釈冷凍機は、冷却能力が 大きく、液体 He が無くならない限り一定の温度を保ち続けることが可能である。<sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He 希釈冷凍機 の冷却は、液体 <sup>3</sup>He と液体 <sup>4</sup>He と の混合希釈によってなされる。<sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He 混合液 (mixture) は、0.87 K 以下で超流動性を示さない <sup>3</sup>He 含量の多い <sup>3</sup>He-濃厚層 (concentrated phase) と超流動性を示す <sup>3</sup>He 含 量の少ない <sup>3</sup>He-希薄層 (dilution phase) とに分離する。冷却は、<sup>3</sup>He-濃厚相と <sup>3</sup>He-希薄相中の <sup>3</sup>He の エントロピーの違いを利用するもので、<sup>3</sup>He-濃厚相から <sup>3</sup>He-希薄相へ <sup>3</sup>He が混入するときに吸熱がお こる

使用した希釈冷凍機は、OXFORD Kelvinox25 型希釈冷凍機であり、高さ 124 cm、直径 39.4 cm の 円柱形をしている。この希釈冷凍機の模式図を 図 4.1 に示す。液体 He を 50 *l* 使用することにより約 50 時間連続で循環運転が可能である。冷却能力は ~  $25\mu$ W、最低到達温度は、~ 60 mK である。

図 4.2 に IVC (Inner Vacuum Chamber)の内部構造の概略図を示す。IVC 内部は ~  $10^{-5}$  Torr ま で真空引きされ、カロリメータと SQUID はこの中に組み込まれる。<sup>3</sup>He を液化する 1K pot と呼んで いる箇所は液体 He の減圧によって冷却されるが、本実験においては実際には 1 K まで到達はせず、典型的な温度として 1.5 K である。SQUID はこの 1Kpot により冷却された 1K ステージに接着させて いる。<sup>3</sup>He-濃厚相から <sup>3</sup>He-希薄相 への希釈混合は M/C (Mixing Chamber)内でなされ、M/C は最終的にこの冷凍機の最低到達温度 (~ 30 mK) に達する。TES カロリメータは、この M/C に真鍮で熱リンクをとった E/P (Experimental Plate)の台座として渡した真鍮の板にねじ止めされる。台座には E/P の温度ゆらぎがカロリメータに直接伝わらないように、熱伝導度が銅より悪い真鍮を選んだ。M/C と 1 K pot、 E/P には、酸化ルテニウム (RuO<sub>2</sub>)温度計が取り付けられている。E/P の温度制御には Picowatto 社 AVS47 Resistance Bridge/TS-530 Temperature Controller を用いて M/C のヒーターに流す電流値を制御することで行っており、~ 0.1 mK の精度で制御することが可能である。自作したカ ロリメータを希釈冷凍機に組み込んだときの写真を図 4.3 に示す。

希釈冷凍機内部の配線は外部との熱接触を抑えるために、熱伝導度が悪く径の細いマンガニン線を用いている。これらの配線はノイズ対策として信号往復のペア同士2本づつツイストしており、4ポート各12対の配線が使用可能となっている。それぞれの配線の往復での抵抗値は、希釈冷凍機の大きさの都合上、配線を長く取らなければならないために、常温で ~ 230  $\Omega$ 、冷却実験中においては温度  $\leq$  4 K で ~ 180  $\Omega$  と大きいものである。





図 4.3: 左:希釈冷凍機全体像。右:カロリメータ組み込み写真。中央 にみえるのが、SQUID のパーマロイ磁気シールドで、1 K ステージに ねじ止めされている。この E/P に バイアス並列回路の基板をねじ止め しており、中央にはマンガニン線で製作したシャント抵抗がついている。 カロリメータは、E/P にねじ止めした真鍮板に固定する。右下:カロリ メータホルダと <sup>55</sup>Fe 線源。カロリメータの真上に線源が位置するように 固定している。

## 4.2 超伝量子干涉計 (SQUID)

SQUID (Superconducting QUantum Interference Device:超伝導量子干渉計)とは、超伝導の量子 性を利用した装置であり、使用する dc-SQUID は2つのジョセフソン (Josephson) 接合部から成る超伝 導リングを利用している。簡単に説明すると、2つのジョセフソン接合部で磁束が量子化され、その両 端に周期的な電圧が現われる。この電圧差を SQUID の横にインプットコイルを置くことで、電流変化 としてよみだすことになる。SQUID は、超伝導リングを使用しているために極低温下で使用すること ができ、カロリメータのすぐ近くに置けるので、他の読みだし装置よりも配線からの余分な熱流入やノ イズを減らすことができる。本章の始めに述べた利点も含めて、TES カロリメータの信号読みだしに SQUID を用いることは、分解能を追求するために極めて有効な手段であることがわかる。

使用した SQUID AMP 素子は液体 He を使用した低温度環境下での使用を前提として開発された、SII の SSA (420-Serial SQUID Array) アンプ 420 個の dc-SQUID がアレイ状に並んでいるという構造をし ている。SQUID 基盤は FRP でできており、SQUID AMP 素子及び主要な配線は基盤上の 0.5 mm×0.5 mm の Si ウェハ上に蒸着されている。一つ一つの SQUID 素子は、SQUID ワッシャー、フィードバッ クコイル、インプットコイルからなっておりコイルを含めた配線は全て 0.1 mm $\phi$  NbTi 配線となって いる。SQUID ワッシャーは2つのジョセフソン接合を持つリングである。これらの SQUID アンプのス ペックを表 4.1 に示し、図 4.5 にそれぞれの配線図を示す。ここで、配線を含めたインプットコイルイ ンダクタンス  $L_{\rm in} = 190$  nH は、TES のフィードバック回路のループ部分の配線を含んでいるときの値 である。

表 4.1: 400-SSA SQUID 素子パラメータ

入力コイル		
自己インダクタンス	$L_{\rm in}$	90 pH (contain wire 190 nH)
相互インダクタンス	$M_{\rm in}$	$58 \mathrm{\ pH}$
フィードバックコイル		
相互インダクタンス	$M_{\rm f}$	$58 \mathrm{~pH}$
ゲイン $G (= M_{\mathrm{in}} \frac{\partial V}{\partial \Phi})$		1400  V/A
電流分解能 @ 10 kHz		$6.8 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$

#### SQUID noise

SQUID ノイズには、SQUID のシャント抵抗で発生するジョンソンノイズと、トンネル接合のショットノイズがある。そのノイズスペクトルは、読み出し系の回路で決まる遮断周波数よりも低い周波数領域ではほぼ一定であり、ノイズ等価電流  $i_n$  は典型的に数 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$  である。定電圧バイアス下でカロリメータを動作させる際、SQUID ノイズのノイズ等価パワーは、電気応答性  $S_I$  とノイズ等価電流  $i_n$  を用いて

$$NEP_{readout}^{2} = \left|\frac{i_{n}}{S_{I}}\right|^{2}$$

$$(4.1)$$

として与えられる。

ここで、 $S_I$  は  $\omega$  の関数として、フィードバック量  $b = -V_b$ 、周波数 0 でのループゲイン  $\mathcal{L}_0$ 、ETF 下 での有効時定数  $\tau_{\text{eff}}$  を用いて

$$S_{\rm I}(\omega) = -\frac{1}{V} \frac{\mathcal{L}_0}{\mathcal{L}_0 + 1} \frac{1}{1 + i\omega\tau_{\rm eff}}$$

$$\tag{4.2}$$



図 4.4: 420-SSA の顕微鏡写真。左は全体像で 写真 1 辺が 3 mm × 3 mm。右は DC-SQUID 素子の拡大写真で、写真の大きさが 200 μm。



図 4.5: FRP 実装基盤上の配線図

と表せる。

また、周波数空間でのノイズ等価パワー NEP(f) (Noise Equivalent Power) を、周波数空間での電流 応答性  $S_I(f)$  とノイズの片側パワースペクトルすなわちノイズスペクトル  $E_n(f)$  を用いて

$$NEP(f) \equiv \left| \frac{E_{n}(f)}{S_{I}(f)} \right| \qquad [W/\sqrt{Hz}]$$
(4.3)

と定義する。カロリメータの応答が  $\propto \exp(-t/\tau)$  と仮定した際、最適フィルタを用いて処理を行うこと で、NEP(f) から求まるエネルギー分解能は、

$$\Delta E_{\rm rms} = \left(\int_0^\infty \frac{4}{NEP^2(f)} \mathrm{d}f\right)^{-\frac{1}{2}} \tag{4.4}$$

と表される [6]。

よって、SQUID ノイズのエネルギー分解能への寄与は、

$$\Delta E_{\text{SQUID}} = 2.35 \left( \int_0^\infty \frac{4 \mathrm{d}f}{\mathrm{NEP}_{\text{readout}}^2(f)} \right)^{-\frac{1}{2}}$$
(4.5)

$$= 2.35 \frac{\mathcal{L}_0 + 1}{\mathcal{L}_0} i_n \sqrt{b^2 \tau_{\text{eff}}}$$

$$\tag{4.6}$$

$$= 2.35 \frac{\mathcal{L}_0 + 1}{\mathcal{L}_0} i_{\rm n} V_{\rm B} \sqrt{\tau_{\rm eff}}$$

$$\tag{4.7}$$

と表せる。また、強いフィードバックの下では、

$$\Delta E_{\rm SQUID} \sim 2.35 i_{\rm n} V_{\rm B} \sqrt{\tau_{\rm eff}} \tag{4.8}$$

と表すことができる。

これに疑似的定電圧バイアスを考慮し、フィードバック量とループゲインを置き換えることにより、

$$\Delta E_{\rm SQUID} = 2.35 \frac{\left(1 - \frac{R_s}{R}\right) \mathcal{L}_0 + \left(1 + \frac{R_s}{R}\right)}{\mathcal{L}_0} i_{\rm n} V_{\rm B} \sqrt{\tau_{\rm eff}}$$

$$\tag{4.9}$$

として疑似的定電圧バイアス下での寄与を表すことができる。強いフィードバックの下では、

$$\Delta E_{\rm SQUID} = 2.35 \left( 1 - \frac{R_s}{R} \right) i_{\rm n} V_{\rm B} \sqrt{\tau_{\rm eff}}$$

$$\tag{4.10}$$

となる。

## 4.3 放射線源

都立大の X 線照射実験で使用する線源は、低温用の特殊パッケージに入った <sup>55</sup>Fe (Mn-Ka: 5.9 keV) の密封放射線源である。本研究で用いたのは「すざく」XRS-FW(フィルターホイール)のスペアとして 購入したものの1つで、半減期は 2.73 年、購入時は '02.8.9 で強度は 3.7 MBq であった。線源はカロ リメータ治具に押さえでねじ止め、またはアルミテープで固定した状態で希釈冷凍器に組み込むので、 動作中は常にカロリメータに X 線が照射された状態である。

この線源から放射される X 線のエネルギーとその近似的強度比は Mn-K $\alpha_1$  5.89875 keV : K $\alpha_2$  5.88765 keV : K $\beta$  6.486 keV = 20 : 10 : 3 であり、K $\alpha_1$  のほうがエネルギーが高い。<sup>55</sup>Fe の放射線源からの K $\alpha$  線は、5.9 keV の Mn の主量子数 n = 2 から n = 1 への遷移であり、 ${}^2P_{\frac{3}{2}}$  からの遷移が K $\alpha_1$  で、 ${}^2P_{\frac{1}{2}}$  からの遷移が K $\alpha_2$  である。さらに、これは現象論的に K $\alpha_1$  では 5本、 K $\alpha_2$  では 2本の計 7本の 自然幅をもつ Lorentzian の重ね合わせで表すことができる。これらのエネルギーと幅を表 4.2 に示す また、エネルギー分解能と微細構造の関係を図 4.6 に示す。 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  はそれぞれ5本、2本の微細構造線 により構成されている。

ピーク	エネルギー (keV)	自然幅 (FWHM,eV)	積分強度
$\alpha_{11}$	5.8989	1.715	0.353
$\alpha_{12}$	5.8979	2.043	0.141
$\alpha_{13}$	5.8948	4.499	0.079
$\alpha_{14}$	5.8965	2.663	0.066
$\alpha_{15}$	5.8994	0.969	0.005
$\alpha_{21}$	5.8877	2.361	0.229
$\alpha_{22}$	5.8865	4.216	0.110

表 4.2: Mn Kα 輝線の微細構造

## 4.4 Pb 超伝導磁気シールド

超伝導転移温度が、超伝導体の表面磁場によって変化することは ?? 節で述べた。臨界磁場は温度に依存するため、磁場があると温度によって転移温度は低いほうヘシフトし、その結果転移カーブはなだらかになってしまい、これは外部磁場が強ければ強いほど顕著になる。TES カロリメータは超伝導転移端を利用するため、このような影響は避けなければならない。超伝導状態にある物質はマイスナー (Meisnner)効果によって透磁率  $\mu = 0$ の完全反磁性を示すので完全な磁気遮断が可能である。このため、超伝導シールドを強化するために、1 mm 厚の Pb ( $T_c = 7.20$  K)を磁気シールドとして、希釈冷凍器の IVC



図 4.6: エネルギー分解能と微細構造。

筒の周りに巻くという方法をとった。磁場かけ測定時にはこの Pb を取り外して測定を行った。Pb の着脱の写真を図 4.7 に示す。外部磁場の TES への影響を調べた結果があるので、一部を抜粋して紹介する(図 4.8、図 4.9)。[10]1  $T = 10 \ kG$  なので、1  $\mu T = 10 \ mG$  である。また、自然界に存在する磁場として地磁気がある。地磁気は 約 0.5 G なので、 $\sim 50 \ \mu T$  である。よって、希釈冷凍機を使って実験する場合、磁気シールドが不十分であれば、TES が動作しないことがわかる。



図 4.7: 左図:超伝導磁気シールド。右図:Pbを外したところ。

## 4.5 ローパスフィルタ

バイアス電源 (K2400) からのノイズを削減するために、バイアス回路にコンデンサを並列にいれた。 このときのバイアス電源を含むカロリメータ動作回路図を 図 4.10 に示す。

バイアス電源からカロリメータまでの希釈冷凍器に入る配線間には、ノイズカットの役割となるイン ダクタンス L のコモンモードフィルタ BOX をはさんでおり、希釈冷凍器内部にはカロリメータ直前の バイアス電流 I<sub>b</sub> が微小となるように、1 K ステージにバイアス抵抗 R<sub>b</sub> を直列にいれている。ローパス フィルタの役割となるコンデンサは、コモンモードフィルタ BOX 内部に図 4.12 のように Triax の希 釈冷凍器側の内側の出口のところに 1.0、0.1、0.01  $\mu$ F の積層セラミックコンデンサを並列に入れ、ま た、カロリメータにより近くなるように R<sub>b</sub> 直前の 1 K ステージに図 4.10 のように 1.0  $\mu$ F のコンデン サをはんだ付けした。

このときカットされる周波数帯域を求めるため、簡単のため、シャント抵抗は微小であるため $R_s=0$ 



**Fig. 1** (Color online) (a) Mn-K $\alpha$  (5.9 keV) X-ray pulse height vs. perpendicular magnetic field intensity  $B_{\perp}$ . (b) Time constant of X-ray pulse,  $\tau_{\rm eff}$  vs.  $B_{\perp}$ . (c) *R*-*T* curve for  $B_{\perp} = 0, 6, 26 \ \mu$ T from higher to lower  $T_s$ . (d) Critical current,  $I_c$ , vs. bath temperature,  $T_s$ , for  $B_{\perp} = 0, 6, 26, 106, 306 \ \mu$ T from higher to lower  $I_c$ . Filled circles denotes positive voltage bias, and open circles are negative voltage bias.

図 4.8: 磁場の TES の超伝導転移特性への影響。



Fig. 4 (Color online) Energy spectra of Mn-K $\alpha$  X-ray for SII-182 with (a)  $B_{\perp} = 0 \ \mu$ T, (b)  $B_{\perp} = 200 \ \mu$ T, and (c)  $B_{\perp} = 300 \ \mu$ T. Each spectrum is fitted with gaussian-convolved lorentzians to determine the energy resolution in FWHM indicated in the panel, considering the experimentally determined fine structure of the line shape including natural widths.<sup>4</sup>

図 4.9: 磁場の TES のエネルギー分解能への影響。

とし、L は無視して図 4.13 のような回路を考える。 このときながれる電流は

$$I_0 = I_c + I$$
  
=  $i\omega CR_b I + I$  (4.11)



図 4.10: バイアス電源からの回路図



図 4.11: 1K ステージにはんだ付けした 1.0 µF の コンデンサ



図 4.12: コモンモードフィルタ BOX 内部



図 4.13: カットオフ周波数の計算回路図

$$V_{\rm b} = R_0 I_0 + R_{\rm b} I = [R_0 (1 + i\omega C R_b) + R_b] I$$
(4.12)

という関係が成り立つ。これより、カロリメータにながれる電流は

$$I = \frac{V_{\rm b}}{R_0 + R_b + i\omega C R_0 R_b} = \frac{V_{\rm b}}{R_0 + R_b} \frac{1}{1 + i\omega C \frac{R_0 R_b}{R_0 + R_b}}$$
(4.13)

となる。ここで

$$\tau_{\rm V} = C \frac{R_0 R_b}{R_0 + R_b} \tag{4.14}$$

とおくと、式 4.13 は

$$I = \frac{V_{\rm b}}{R_0 + R_b} \frac{1}{1 + i\omega\tau_{\rm V}}$$
(4.15)

となり、 $V_b$ が一定の場合、Iの周波数特性は  $\tau_V$ の時定数で減少することがわかる。ここで、 $R_0 = 50 \Omega$ 、  $R_b = 10 \text{ k}\Omega$ であるので、これを代入すると、 $C = 2.11 \mu$ Fの場合のカットオフ周波数  $f_{\rm c~V}$ は、式 4.14 より

$$f_{c V} = \frac{1}{2\pi\tau_{V}} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{C} \frac{R_{0} + R_{b}}{R_{0}R_{b}} = 1516 \text{ Hz}$$

$$(4.16)$$

と計算できる。これより、1516 Hz 以上の高周波側のノイズや発振を落とすことが期待できる。 また

$$I = I_0 - I_c$$
  
=  $I_0 - i\omega CR_b I$  (4.17)

より、

$$I = \frac{I_0}{1 + i\omega CR_b I} \tag{4.18}$$

$$\equiv \frac{I_0}{1+i\omega\tau_{\rm I}} \tag{4.19}$$

となり、電流固定の場合の時定数が

$$f_{\rm c\ I} = \frac{1}{2\pi} C R_{\rm b} = 7.5 \; {\rm Hz}$$
 (4.20)

求められる。これより電流性ノイズのカットオフ周波数は、 $f_{cI} = 7.5 \text{ Hz}$ のローパスフィルタとして働くが、電圧性ノイズをカットする場合  $f_{cV} = 1516 \text{ Hz}$ となるので、ジョンソンノイズなどの電圧性ノイズをカットしたい場合は、低い周波数ではあまり効果がないようである。

以上の結果を確かめるために、SQUID 出力の周波数特性を評価する。これは、バイアス電源の DC バ イアスを固定して、AC 成分の周波数を変化させたときの SQUID 出力を測定すればよい。この測定を 周波数スキャンとよぶことにする。周波数スキャンのデータ取得条件を 表 4.3 に示し、結果を図 4.14 に 示す。測定において、カロリメータは超伝導の状態とし、DC バイアスのオフセット電圧は 0 V とした。

measurement range	AC bias	bath temperature	DC bias
f [Hz]	$V_{\rm p-p} \ [{\rm mV}]$	$T_{\rm s} \ [{\rm mK}]$	$V_{\text{offset}} [\text{mV}]$
0.1-100 k	100	115.2	0

表 4.3: 周波数スキャンのデータ取得条件



図 4.14: 周波数スキャン結果。黒点がデータ、マゼ ンタが見積もり。 $f_{cV} \sim 1516$  Hz 付近から周波数特 性が落ちているのがわかる。

## ここで、式 4.15 より

$$|I| = \frac{V_{\rm b}}{R_0 + R_b} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \tau_{\rm V})^2}} = \frac{V_{\rm b}}{R_0 + R_b} \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau_{\rm V})^2}}$$
(4.21)

となる。ここで、SQUIDの出力 Vout は、SQUID アンプの電流電圧換算係数を Ξ とすると

$$I = \frac{V_{\text{out}}}{\Xi} \tag{4.22}$$

$$|V_{\text{out}}| = \Xi \frac{V_{\text{b}}}{R_0 + R_b} \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau_{\text{V}})^2}}$$
(4.23)

となる。ここで、図 4.14 での見積もりには  $\Xi = 50 \text{ kV/A}$ ,  $V_b = V_{p-p} = 0.1 \text{ V}$ を用いた。図 4.14 に おいて、マゼンタの線が見積もりであるが、見積もりと同様に  $f_{cV} \sim 1516 \text{ Hz}$  付近から周波数特性が落 ちているのがわかり、 $f_{cv}$  以上の電圧性ノイズをおとすことができると期待できる。

## 4.6 カロリメータの組み込み

次に、カロリメータの固定方法を述べる。カロリメータホルダの材質には、ホルダそのものと、ホル ダとカロリメータとの間の温度勾配がほとんど無くなるように熱伝導度の良い OFC(無酸素銅)を使用 している。また、ホルダとカロリメータの熱伝導をよくするために、真空グリス APIEZON-N をうす く塗る場合もある。



図 4.15: ボンディングマシーン

カロリメータと Au のボンディングパッド間は、Al のボンディングワイヤーで繋いである。ボンディ ングは首都大のボンディングマシーンを用いて行っている。図 4.15 に写真を示す。ボンディングワイ ヤーには $\phi$  25 $\mu$ m、Al 99%、Si 1%のものを使用している。ボンディングパッドは、ホルダーに熱膨張 率の低い特殊シリコン系の瞬間弾性接着材ペグ  $\alpha$  を用いて接着し、ホルダーとの電気的な接触はない。 ボンディングパッドからの配線は、超伝導配線である銅皮膜付き  $\phi$  97 $\mu$ m の NbTi 線を信号ペアごとに ツイストして配線している。このツイスト線の上に Al テープを巻くことで振動によって生じるノイズ の軽減を行い、超伝導シールドによる磁気シールドにもなっている。また、サンプルステージ上でしっ かりとサーマルアンカーをとることで、カロリメータへの直接の熱流入を防いでいる。この配線は、抵 抗測定 (*R*-*T* 測定) の際には、ポート4の 26 way コネクタにつながる配線にスズメッキ IC ソケット で接続される。ホルダの温度測定には RuO<sub>2</sub> 温度計を用いており、温度計測には Neocera 社 LTC-21 Temperature Controller を使用している。ここで測定される温度は実際には熱浴の温度であるが、*R*-*T* 測定など TES カロリメータに流れる電流が微小な場合には、カロリメータの発熱の影響は小さいとし て、ここの温度を TES の温度とみなして測定を行う。

実際のカロリメータの動作の際には、ボンディングパッドからの NbTi 配線は、E/P に設置した IC ソケットによるシャント抵抗との並列回路につながる。このため、シャント抵抗の温度 T<sub>s</sub> は、E/P の 温度となる。このときの回路図を図 4.16 に示す。並列回路の入力はバイアス電源につながっており、バ イアスの配線の途中には並列回路に流れる電流を適度に抑えるために、バイアス抵抗 R<sub>b</sub> として 10 kΩ の金属皮膜抵抗を入れている。このバイアス抵抗はバイアス電流を流した際の発熱による熱浴の温度上



図 4.16: 動作時のバイアス電源回路。 $R_{\rm b} = 10 \ {\rm k}\Omega$  である。

昇を考慮して1 K pot に配置してある。バイアス抵抗と並列回路までの間の配線には熱伝導度の悪い銅 皮膜無しのホルマル皮膜のみの φ 0.1 mm の NbTi 線を用いており、この配線は 1 K pot に於いても しっかりとサーマルアンカーをとっている。TES からの出力は 1 K pot に置かれている SQUID アン プへと繋がっている。SQUID アンプは Nb とパーマロイの 2 重シールドの中にあり、しっかりと磁気 シールドされている。SQUID のインプット端子と TES との配線にも上記の理由からホルマル皮膜のみ の NbTi 線を使用している。ここで、TES に流れる電流 I は、すなわち SQUID へと入力される電流で ある。SQUID の出力には、Tektronix 社 TDS3012 オシロスコープ を用いて読み取っている。

## 4.7 性能評価方法

以下では素子の性能評価のために行った測定について説明する。

#### **4.7.1** *R*-*T* 特性

カロリメータの性能評価を行うにあたって、まず初めに素子の温度 T と電気抵抗 R の関係 (R-T 特 性)を測定し、素子の転移温度 T<sub>c</sub>、転移幅、転移の様子などからカロリメータとして動作させることが 可能かどうか調べることが必要である。R-T 特性を測定する方法として、定電流の下で抵抗を直接測定 する方法と定電圧バイアスの下で TES に流れる電流変化から抵抗に換算する方法の2つがある。どちら の方法に対しても温度コントロールには、Picowatto 社 AVS 47/TS-530 を使っている。また、測定さ れる温度は、熱浴の温度となるので TES と熱浴との間で温度差ができないように流す電流は極微小でな ければならない。

定電流を流す方法では、サンプルの温度測定にはホルダ上に固定した RuO<sub>2</sub> 温度計を使用し、LTC-21 で読み出している。抵抗値の測定には Linear Research 社 LR-700 を使用し、4 端子法を用いて約 16 Hz の交流電流をサンプルに流して抵抗値を測定している。ここでは、20  $\mu$ V-20  $\Omega$  (1 $\mu$ A)、20  $\mu$ V-2  $\Omega$ (10  $\mu$ A) のレンジで測定を行っている。定電圧の方法では、SUQID の出力レベルの変化を測定する。 SQUID 出力  $V_{\text{out}}$  と TES に流れる電流 I の間には、SQUID アンプの電流電圧換算係数  $\Xi$  を用いて、

$$I = \frac{V_{\text{out}}}{\Xi} \tag{4.24}$$

という関係がある。また、 I には TES の抵抗 R、シャント抵抗  $R_s$ 、パラシティック抵抗  $R_p$  を用いて、

$$I = \frac{R_{\rm s}}{R + R_{\rm s} + R_{\rm p}} I_{\rm b} \tag{4.25}$$

ここで、 *I*<sub>b</sub> は、バイアス電流である。この式より、素子の抵抗値を計算することが出来る。 素子の転移温度は、

$$f(R_0, T_c, T_1, T_2, R_c) = \frac{R_0}{(1 + \exp(-(T - T_c)/T_1))(1 + \exp(-(T - T_c)/T_2))} + R_c$$
(4.26)

という関数でフィットした時のTc で定義している。

#### 4.7.2 臨界電流測定

超伝導状態にある物質に一定量の電流を流すと超伝導状態から常伝導状態へ移行する。この電流の最 大値が臨界電流である。臨界電流は TES の温度 T と外部磁場 B の関数であり、TES のサイズや膜質に も依存する。TES の応答の電流依存性は臨界電流でスケールされるため、臨界電流は TES の性能に深 く関係する物理量である。この測定では、超伝導状態にある素子にすばやくバイアス電圧を掛け、超伝 導状態が壊れるときの電圧を記録する事で臨界電流を測る。

#### 4.7.3 SQUID に接続されていない場合

また、正攻法ではないが、LR700を用いた方法もある。SQUID に接続されていないチャンネルの場合、LTC controler 上で LR700 の電圧と抵抗を変えることで定電流の値を変えられる。電流値を変えていき、超伝導状態が壊れる時の電流値を臨界電流としている。ただし、設定可能な電流値が限定的なため、正確な数値を知ることはできない。

#### 4.7.4 *I-V*特性

ある程度のバイアス電圧  $V_b$  を TES にかけ、TES を常伝導の状態にし、その状態から熱浴温度  $T_s$  を 一定になるように温度コントロールをかけ、 $V_b$  を下げていき TES に流れる電流 I を測定する。この ときの TES にかかる電圧  $V \ge I$  の関係を一般に I-V 特性と呼んでいる。ここで、 $V_b$  を 変化させ、 SQUID から出力される DC レベルの変化を調べ  $I_b-I$  の関係を求めると、図 4.17 の左のグラフのよう になる。これをみると、I が  $I_b$  に比例する領域と R に依存して減少する 2つの領域があることがわか る。この  $I_b$  が小さい場合 (< 200  $\mu$ A) と大きい場合 (> 600  $\mu$ A) の比例する領域では、R は一定であり それぞれ TES が超伝導、常伝導になっている状態である。中間の領域では TES が超伝導-常伝導遷移 の途中の状態にあり、よってこの領域をカロリメータの動作点として用いている。カロリメータの抵抗 値 R は 式 (4.24)、(4.25) の関係を用いることで  $I_b-I$  のプロットから求めることができ、図 4.17 の右 のグラフのようになる。このような測定は、毎回の性能評価で行っている。ここで、TES を流れる電流 I は、SQUID を用いて測定するため変化量を測定することのみ可能となる。そこで、TES が常伝導と なる領域において  $I_b$  vs I が正比例するように補正をかけることで、電流値の絶対量を明らかにできる。

TES を流れる電流 I と T<sub>s</sub> の関係は、熱のつりあいの式

$$RI^{2} = \frac{G_{0}}{n}(T^{n} - T_{\rm s}^{n}) \tag{4.27}$$



図 4.17: Ib-I 関係の例

$$I = \sqrt{\frac{G_0 T^n}{nR} \left(1 - \left(\frac{T_s}{T}\right)^n\right)}$$

$$(4.28)$$

$$= \frac{G_0 T^n}{n I_b} \frac{R + R_s}{R R_s} \left( 1 - \left(\frac{T_s}{T}\right)^n \right)$$
(4.29)

となる。これより、ある抵抗 R における温度 T、 $G_0$ 、nの値が個々の測定においてほぼ同じである と仮定すると

$$I \propto \left(1 - \left(\frac{T_{\rm s}}{T}\right)^n\right) \frac{1}{I_b} \tag{4.30}$$

となり、*I*<sub>b</sub> に対する *I* は *T*<sub>s</sub> のみに依存することになり、*T*<sub>s</sub> がそれぞれの測定で同じならば、それぞれの測定での *I* は同じ値を示すことになる。これは磁気シールドなどの測定環境にはよらない。

また、この測定の際には、他に X 線パルス、TES のノイズレベルを記録している。この2つから個々のバイアス電圧についての S/N 比を計算することができ、X 線パルス取得時の動作点決定の目安としている。

#### 4.7.5 X線パルス特性とノイズ特性

*I-V*測定時のX線パルス、ノイズレベルから、データ取得するバイアス電圧を決定する。パルス、ノ イズデータは YOKOGAWA DL708 を使用し、プログラムによりパルスとノイズは同時取得が可能で、 前半をノイズ、後半をパルスとしている。またノイズデータは FFT アナライザでも取得している。

パルス特性は、カロリメータに X 線光子や電気的なパルス(ヒートパルスと呼ぶ)を入射したときの 応答であり、これによってカロリメータの応答関数 (responsivity)S<sub>I</sub> とその揺らぎであるエネルギー分 解能を知ることができる。

## 第5章 TESの放射線耐性の測定

## 5.1 TES の宇宙応用する上での課題

宇宙空間には多くの粒子(プロトン(陽子)が 80% 、その他 He、Li の原子核等)が高速で飛び交っ ており、宇宙空間に存在する人工物は例外無く損傷を受ける。X線天文衛星の各機器も損傷を受けるた め、CCD 等の検出器はこれまでに宇宙放射線による影響の調査が度々行われてきた。しかし、我々のグ ループが開発を進めている TES はその調査経験を持たない。そこで今回我々は、TES の宇宙放射線に よる影響の有無を調査する事にした。

ASTRO-H 衛星が軌道上で受けると予想されている宇宙線のフラックスのスペクトルを図 5.1 に示す。



図 5.1: ASTRO-H 衛星が軌道上で受けると予想されている 宇宙線のフラックスのスペクトル(ASTRO-H SGD 検出器の PDR 文書より引用)。Albedo Neutron:陽子が地球大気と衝突 することで発生するもの。SAA:South Atlantic Anomaly のこ と。ヴァン・アレン帯という地球の磁場にとらえられた陽子と電 子からなる放射線帯における異常構造のこと。通常この構造の 最低高度は 1000 km 以上であるが、SAA ではそれが 300-400 km である。このため、低軌道の人工衛星ではその影響がある。 南米上空に存在する。 CXB:Cosmic X-ray Background の こと。

損傷により考えられる TES への影響を表 5.1 に示す。放射線損傷は「トータルドーズ効果」、「シング ルイベント効果」、「放射化」の3つに分けられる。

トータルドーズ効果とは入射した放射線の累積効果によって生じる恒常的な損傷である。これはさら に電離損傷と変位損傷の2つに分けられる。電離損傷は、放射線が物質を電離させることによる損傷で ある。電離源は陽子を含めて数種類あるが、吸収した累積エネルギー(吸収線量)で影響を表す。

	TES への影響	性能への影響
トータルドーズ効果	転移温度、臨界電流、温度計感度	大
シングルイベント効果	ラッチアップ	小
放射化	原子核の放射化	小

表 5.1: 宇宙放射線により予想される影響

変位損傷は放射線によって格子欠陥を生じる現象である。これは吸収線量のように、放射線の種類に よらずに影響を表すことが出来ない。人工衛星で問題になるトータルドーズ効果の多くは電離損傷であ る。人工衛星に多く使用されている半導体では、例えば、酸化膜中に正電荷を生じ、酸化膜と半導体基 板の間に界面準位を生じることでトランジスタの電離増幅率の低下やリーク電流の増加を生む。

シングルイベント効果とはトータルドーズ効果のように累積的な損傷ではなく、確率的に起こりうる 現象のことである。半導体の場合、高エネルギー粒子によって生じた電子正孔対により生じるデジタル 情報の反転やラッチアップが主な効果である。ラッチアップは半導体の性質に影響を与えるが、TES は 超伝導体の性質を利用しているので、影響は小さいと考えられる。

放射化とは放射線が物質と相互作用することで物質中の元素を放射性同位体に変質させることである。 生成された同位体は固有の減衰時間に従って安定原子へと変化する。その過程で核ガンマ線等、その同 位体固有の放射線を放出する。生成された同位体の半減期は衛星軌道の周回時間より短いものもある。 そのため、衛星寿命とともに徐々にバックグラウンドイベントが増加するだけではなく、SAA 通過後の ように、放射線を大量に受けた直後に一時的に増加するバックグラウンド成分も含まれる。

TES は超伝導薄膜を利用した素子である。よって、考えられる放射線損傷は次の2つがあげられる。 1:トータルドーズ効果による TES の転移温度、臨界電流、温度計感度の変化。放射線により超伝 導/常伝導二層薄膜の界面が変化した場合に、近接効果の振る舞いがかわることで超伝導特性がかわる ことが予想される。

2:TES 中の原子核の放射化によるバックグラウンドの増加。

他にも抵抗値の変化やメンブレンの熱伝導度の変化なども起こりうるが、性能に直結する影響は超伝 導特性の変化だと考えられる。放射化はバックグラウンドの増加を起こすが、性能に影響を与える現象 ではない。シングルイベント効果を調べるためには、放射線を当てながら TES を駆動する必要がある。 一方で、トータルドーズ効果は、放射線照射施設で放射線を照射し、照射前後の特性を比較することで 可能である。ただし、厳密には、放射線照射時の TES の温度によっても影響が異なるため、極低温に 冷却した状態で軌道上の放射線に応じた放射線照射を行わないと、完全には軌道上の影響を再現できな いことはここで断っておく。

今回、宇宙放射線の影響を調査するために陽子照射試験を行い、照射前後の性能を TES を駆動させ て比較する。今回、放射化の影響の有無としてトータルドーズ効果のみを考えた。

## 5.2 放射化実験セットアップ

HXI/SGD チーム (HXI: Hard X-ray Imager, SGD: Soft Gamma-ray Detector) が、放射線医学研 究所が所有する重粒子線がん治療装置 (HIMAC: Heavy Ion Medical Accelerator In Chiba) で、150 MeV のプロトンを照射するビームタイムを持っていた。その際に TES 及び SQUID を HXI/SGD の 試料の後ろにおき、同時にプロトンを当ててもらう機会を得た。

## 5.2.1 用いた素子: TMU193-4d

実験に使用した素子は、我々のグループで最高性能の素子 TMU146 と同じ構造で、それに次ぐエネ ルギー分解能を持つ素子 TMU193 である。2009 年に製作された。マスクパターンを図 5.2 に示す。以 下に素子の写真と照射範囲を示す (図 5.3)。照射範囲は、目標のピクセルである TMU193-4d が中心に なるように設定した。写真は TMU193 と同形状の素子 TMU146 の写真を使用した。黄色い円はおよそ の陽子ビーム照射範囲である。照準が ID=4d となるようにした。ビーム半径は約 8.0mm である。



図 5.2: TMU146 及び TMU193 のマスク パターン。



図 5.3: TMU193 と同形状の素子 TMU146 の写真。黄色い円は陽子ビーム照射範囲。照準に ID=4d となるようにした。ビーム半径は約 8.0mm。

断面図は、1つのピクセルについて、吸収体の存在する領域を縦に切った時の断面を示している (表 5.4)。



## 図 5.4: 素子の断面図

#### 5.2.2 試験場所

陽子ビームを照射した場所は、HIMAC (千葉市稲毛区)である。実施日時は 2011 年 5 月 17 日の夜 である。なお、実際のセットアップと照射は HXI / SGD チームの方々にお願いした (図 5.5、図 5.6) 。 素子の性能評価は首都大学東京で行った。



図 5.5: プロトン照射時のセットアップ。@HIMAC, by HXI/SGD チームの人たち。CdTe (0.75 mm × 2 層) がセットされた後ろに、距離をおいて、Al (1 mm)/CFRP (1 mm)/G10 (1 mm)/Si (1 mm) の基 板がある。さらにその後ろに距離を置いて、TES と SQUID が入ったポリスチレン容器が4 つ並んでいる。TMU-193 が入った容器は最後列に並んでいる。右図のように、プロトン照射位置のアライメント はレーザーセオドライトで合わせ、TMU193-4d にプロトンが照射するようセットアップした。容器の 厚さは 12 mm 程度である。素子の位置は、真空容器のフランジから測定して、TMU-193 が 610 mm 程度である。なお、CdTe は 180 mm に、Al/CFRP/G10/Si は 380 mm に位置する。



図 5.6: プロトン照射セットアップその2。@HIMAC。

### 5.2.3 ビーム強度とコンフィグレーション

照射したプロトンは 150 MeV のエネルギーを持ち、照射量は「BGO(bismuth germanate:ゲルマン酸ビスマス単結晶)に囲われた HXI/SGD 素子が高度 550 km (ASTRO-H の軌道)に 10 年 程度いるあいだに SAA で被曝するプロトン数」相当であり、~  $3 \times 10^{11}$  個の陽子が照射される。HXI/SGD 素子の後ろに TES, SQUID を置くため、HXI/SGD を通過したプロトンが TES/SQUID に照射されることになる。プロトンは照射体を通過することによってエネルギーを失うので、TES や SQUID に照射されたプロトンのエネル ギーはエネルギーロス(10-20 MeV)の分減少している。それらを考慮すると、TES や SQUID の吸収線量は、~10 krad である。なお、軌道上で5年間に浴びる放射線量は~5 krad と予測されている。

#### 5.2.4 予想されるレートとエネルギー損失

高速の荷電粒子は、物質を通過すると主に物質中の電子との電磁相互作用によってエネルギーを失う。 電子より重い粒子である陽子の場合、エネルギーを失う過程で殆ど運動方向を変えないので、通過した 物質の単位厚さ当たりのエネルギー損失 *dE/dx* を定義することができる。非常に低いエネルギー(< 1 MeV)を除いて、エネルギー損失 (*MeVcm<sup>2</sup>/g*)(阻止能、*StoppingPower* とも言う。)は Bethe-Bloch の公式

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_e v^2} NZ[\ln\frac{2m_e v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2]$$
(5.1)

によって近似的に表される。ここで、荷電粒子の電荷を z、速度を  $v(\beta = v/c)$ 、ターゲットの原子番号 を Z、原子数密度を N、平均イオン化ポテンシャルを I とした。N を  $N_A/A(\text{III}/\text{g})$ で表すと、単位面積 当たりの質量 (g/cm<sup>2</sup>) で定義した厚さ x に対するエネルギー損失になる。

TMU193 は二層薄膜の上に Au を素材とした吸収体が付いている(図 5.4)。二層薄膜にプロトンが 届くまでに、この吸収体によってエネルギーをどれだけ失うか考えてみる。web で行える PSTAR とい う計算ページを使用する。

(http://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTSR.html)

これを利用して出した Au の dE/dx vs. E のプロットを図 5.7 に示す。



図 5.7: PSTAR を使って出した Au の dE/dx vs. Eのプロット。

図 5.7 で出てきた StoppingPower を使って、エネルギー損失(MeV) は

吸収体によるエネルギー損失 =  $(StoppingPower) \times (Au の密度) \times (Au の厚さ)$  (5.2)

のように簡単に表すことができる。

簡単のために、吸収体にプロトンが到達するまでのエネルギー損失は無視すると、150 MeV のプロトンの StoppingPower は 2.77 MeV cm<sup>2</sup>/g となる(プロットが出るページの下に一覧あり)。また、Au

の密度を 19.32 g/cm<sup>3</sup> とすると、吸収体の厚さは cm になおすと  $1.5 \times 10^{-4}$ cm なので、式 5.2 は

吸収体によるエネルギー損失 (MeV) =  $2.77 \times 19.32 \times 1.5 \times 10^{-4}$  (5.3)

$$= 2.898 \times 10^{-3} (\text{MeV}) \tag{5.4}$$

= 2.898(KeV) (5.5)

となる。150 MeV のエネルギーに比べて、吸収体の厚みでさえわずかな大きさであると言える。よって、今回のセットアップである HXI/SGD や SQUID によるエネルギー損失も無視できる。

### 5.3 実験結果

ここでは、実験により得られた結果を示す。

#### 5.3.1 R-T曲線

図 5.8 に TMU193-4d のプロトン照射前後の R-T 曲線の比較図を示す。点線は温度計感度を示している。青:照射前、赤:照射後の結果を示している。温度の再現性は ± 5mK (ノイズ、振動、素子組み 込みセットアップの再現性などでこの程度のばらつきが経験的に分かっている。) なので、有意な変化は ないと言える。横軸は温度、縦軸は TES に流れる電流値 (log スケール)。



図 5.8: TMU193-4d のプロトン照射前後の R-T 曲 線を比較。点線は温度計感度を示している。青:照 射前、赤:照射後の結果を示している。温度の再現 性は ± 5mK なので、有意な変化はないと言える。

#### 5.3.2 臨界電流

次に、臨界電流測定の結果について示す(図 5.9 図 5.10)。どちらの図も、青:照射前、赤:は照射後のプロットである。図 5.9 は、転移温度以下の温度域における臨界電流の変化を示している。この図を

元に 図 5.10 を作成した。図 5.10 は臨界電流測定の各測定点における温度を、転移温度( $T_c$ )で規格化 した数値を横軸に示している。照射後と照射前では転移温度に違いがあるが、横軸をこのように取るこ とで比較が可能となる。測定範囲の中間点である横軸 0.85 を比較点に取ると、照射前は 450 $\mu$ A 、照射 後は 400 $\mu$ A となっている。ここで、TES に流す電流は実用的には 100 $\mu$ A 以下である。よって、有意 な変化はないと言える。



図 5.9: 臨界電流の温度変化。赤:照射後。 青:照射前のプロットを示している。この 図 5.10: 図 5.9 を 図をもとに図 5.10 をプロットする。 流の関係。横軸に

図 5.10: 図 5.9 をもとにプロットした、 $T_c$ と臨界電流の関係。横軸は温度を転移温度 $T_c$ で正規化してある。赤:照射後。青:照射前のプロットを示している。有意な変化はないと言える。

### 5.3.3 エネルギー分解能

これまで超伝導転移特性である R-T 曲線、臨界電流を測定し、超伝導体として放射線耐性を持つ事 を確認してきた。そして、次にカロリメータとしての放射線耐性を調べる。つまり、エネルギー分解能 の比較である。

エネルギー分解能分解能の導出にあたり、パルス波形を知る必要がある。測定を行った時の動作点を 表 5.2 に示す。

時期	熱浴温度 (mK)	動作抵抗 $(m\Omega)$
照射前	100	$\sim 22$
照射後	85	$\sim 22$

表 5.2: パルス波形取得時の動作点。

また、シャント

パルス波形の比較を図 5.11 に示す。X線信号取得時の波高値と時定数を表している。青い線が照射前、 赤い線が照射後である。波高値に大きな変化はなく、時定数は少し長くなったように見えなくもないが、 有意な変化はないと言える。



図 5.11: パルス波形。X線信号取得時の波高値と時定数を表している。青い線が照射前、赤い線が照射後である。波高値、時定数共に有意な変化 はないと言える。

次に、これを元にエネルギー分解能を導出し、その比較を行う。まず、照射後に取得したパルス波形 をもとにだしたベースラインの分解能を図 5.12 に示す。



図 5.12: ベースラインの分解能。

次にエネルギー分解能の比較を図 5.13 に示す。横軸はエネルギー、縦軸はカウント数を示している。 5.9 keV の Mn-K $\alpha$  を放射する線源を使用したため、ピークは 5.9 keV に来ている。各幅は半値全幅で ある。これより、照射前のエネルギー分解能は  $\Delta$ =5.1 ± 0.3 eV 、照射後は  $\Delta$ =5.6 ± 0.4 eV となる。 照射後の結果を 5.6 eV と考えると、照射前の 5.1 ± 0.3 eV と比べて誤差の ~ 2 倍悪くなっている。プ ロトン照射による照射量は軌道上で10年分の吸収線量であることを考慮すると、実際の軌道上におけ る劣化は今回の結果よりも小さいと考えられる。



図 5.13: エネルギー分解能。左図:照射前、右図:照射後

## 5.3.4 インピーダンス性能

データ取得はしてあるが、現在解析中である。

## 5.4 考察

#### **5.4.1** 放射線損傷の有無

今回の結果からは超伝導転移特性(R-T 曲線、臨界電流)、性能(パルス波形、エネルギー分解能)に 重大な変化は見られなかった。また、今回の陽子ビームによる照射は宇宙空間において10年分の吸収線 量に相当し、TES 搭載を目指している DIOS 衛星の運用予定期間である ~ 5年よりも長い。以上の事 から、TES の性能に宇宙放射線の影響は無視できそうである。

#### 5.4.2 TES 以外への影響の有無

TES を検出器として使用する場合、読み出し系に SQUID という、TES と同じように超伝導物質を 用いた装置が必要であり、これも宇宙空間における放射線耐性を検討する必要がある。こちらの調査は、 我々の共同研究グループでもある ISAS / JAXA の満田研究室の SQUID 研究チームの結果。[18]
# 第6章 積層配線を用いた 4 × 4 素子の性能評価

# 6.1 TMU 284 の製作

本章より積層配線型の試作素子について述べる。前章で扱った TES は、読み出し配線が同一平面上 に配置された構造をなしており、大規模アレイ化に伴い基板上に敷き詰められていき、配線のスペース が限界近くにまで達してきた。DIOS が要求する性能値は有効面積 1 cm 角で 400 ピクセル、1 ピクセ ル毎の分解能は 2 eV である。一方、歩留まりなどを考えると、配線の太さ、配線の間隔が共に ~10 $\mu$ m である必要がある。これを両立するには配線の省スペース化、クロストークの低減が必要である。この ために我々は、シリコン絶縁膜を挟み込む事で配線を折り返し構造にする基板である積層配線基板を開 発した(図 6.1 )。図 6.1 は 20 × 20 ピクセルであるが、他にも 4 × 4,8 × 8 ピクセルの基板デザイ ンも開発した。



図 6.1: 20 × 20 ピクセルアレイ用の積層配線。(a) 400 ピクセル部分。(b) ピクセ ル部分の拡大写真。(c) 上部・下部配線の重なり部分の拡大写真。

さらに図 6.2 に、積層配線基板を用いて制作した場合の素子の断面図を示す。ただし、吸収体の傘の 部分は本研究では製作せず、stem のみの吸収体とした。

我々はこれまで、読み出し配線に使用する素材の選定、二層薄膜の膜圧の調整やエッチング液の変更 等により積層配線基板を製作するプロセスを確立してきた。[36] 本章では、確立した製作プロセスによ り製作された 4 × 4 ピクセルアレイの試作品 TMU284 を使った性能評価について述べる。

加工された 4 × 4 ピクセルアレイ素子 TMU284 の写真を図 6.3 に示す。半数に吸収体を形成してあ



図 6.2: (a) 積層配線を用いたピクセルの断面図。(b) ピクセル 部分を真上から見た時の構造。

る。いくつかのピクセルの吸収体の淵に着いているバリのようなものは、吸収体形成段階で、リフトオ フする時に出来たのもの。バリ等はあるものの良い仕上がりとなっており、積層配線基板を用いた素子 で、最終段階の加工まで成功した初の例である。

上部配線/下部配線の厚さ=Al:50 nm / Al:100 nm。上部配線/下部配線の幅= 20 nm / 30 nm。 Ti/Au の厚さ= 100 nm / 200 nm で製作。Au の吸収体は 120  $\mu$ m 角で厚さ 1.7  $\mu$ m 、傘無しの stem 部分のみを、1 つ飛ばしで 16 ピクセルのうちの半数にのせた。吸収体有りと無しで、転移温度などの 性能比較を行えるためである。吸収体付けのプロセスで素子に影響がないかが分かる。



図 6.3: 4 × 4 ピクセルアレイの TES カロリメータ TMU284。 半数に吸収体を形成。いくつかのピクセルの吸収体の淵に着い ているバリのようなものは、吸収体形成段階で、リフトオフす る時に出来たのもの。バリ等はあるものの良い仕上がりとなっ ており、積層配線基板を用いた素子で、最終段階の加工まで成 功した初の例である。

# 6.2 室温下での性能評価

製作した素子が正常な抵抗値であるかを、先ずは室温で調査する。歩留まり調査は理論抵抗の式 6.1 から得られた値と実測値とを見比べて行なった。

$$R = \rho \frac{L}{A} + \rho \frac{L}{B} \tag{6.1}$$

R:抵抗値 [ $\Omega$ ]  $\rho$ :電気抵抗率 [ $\Omega$ m] L:配線の長さ [m] A:上部配線の断面積 (配線幅×配線厚み)[m<sup>2</sup>] B:下部配線の断面積 (配線幅×配線厚み)[m<sup>2</sup>]

Al の電気抵抗率を 28 nΩm 、L=~5-10 mm とすると、A=20 × 10<sup>-6</sup> × 50 × 10<sup>-9</sup> 、B=30 × 10<sup>-6</sup> × 100 × 10<sup>-9</sup> なので、R=~187-373Ω となる。

# 6.2.1 配線抵抗

室温下での配線抵抗値を表 6.1 に示す。

ID:0304 の抵抗値が ∞ で、他の 15 ピクセルは正常な値を示した。0304 について、ピクセル上には特 に異常が見られなかったため、配線を観察した。そして配線上に汚れがあることが分かった。これが原 因と見られる。二層薄膜パターニング後の写真(図 6.4)で確認できるので、Au か Ti のエッチング時 にできたと思われる。

ID	抵抗值(Ω)	ID	抵抗值(Ω)
0101	276.8 (Ω)	0401	288.5 ( $\Omega$ )
0102	198.9 (Ω)	0301	$263.9~(\Omega)$
0202	248.9 ( $\Omega$ )	0302	229.2 (Ω)
0103	252.4 (Ω)	0201	$352.7~(\Omega)$
0402	$252.7~(\Omega)$	0304	$\infty$
0303	223.0 (Ω)	0203	$220.5~(\Omega)$
0403	195.5 $(\Omega)$	0204	$220.7~(\Omega)$
0404	$278.7~(\Omega)$	0104	344.1 (Ω)

表 6.1: 室温下での配線抵抗



図 6.4: ID:0304 の配線の拡大図。配 線上に汚れが見られる。

## 6.2.2 歩留まりの評価

16 ピクセル中、15 ピクセルが正常な値を示した。歩留まりは約 93.8 % である。この歩留まりを、 DIOS の要求値の最低ラインである 400 ピクセルに置き換えると 375 ピクセルが正常であり、25 ピク セルが不良ということになる。カロリメータとして良質と言えるかは微妙だが、まずまずの質であると 言える。ただし、今回不良の原因となった汚れは、大規模アレイの素子を製作する上で顕著になる。ピ クセルと配線がどちらも密集化し、16 ピクセルと同じ大きさの汚れだとしても2つのピクセルや配線 を跨いで付着する可能性がある。また、吸収体形成段階のリフトオフでいくつかバリを残してしまった が、大規模アレイのように基板サイズが大きくなった場合リフトオフ等の、力がより不均一にかかる事 によってバリの発生率が増加する可能性がある。さらに、力のかかり具合以外にもこうした不均一は製 作段階のどの工程にも起こりうる。後述するが、次章の 20x20 ピクセルアレイの製作結果もその一例で あり、小規模ピクセルアレイの製作時には問題とならなかったプロセスが原因となる事がある。

したがって、16 ピクセルアレイ程度の小規模な素子の歩留まりは 100 % である事が望ましい。今回 の汚れの原因は吸収体付けのアライメントのリフトオフ時に発生したと思われるもので、このプロセス の見直しをすることで解決できると考えられる。

# 6.3 低温下での性能評価

室温下における抵抗値測定の後、素子を希釈冷凍機に組み込み、極低温下での性能評価を行った。測 定項目は R-T 曲線、臨界電流、エネルギー分解能である。測定対象としたピクセルは ID=0104 であ る。まず、バイアススキャンの結果を示しておく(図 6.5、図 6.6)。バイアススキャンは、超伝導状態 の抵抗値 *Rp* (寄生抵抗)と常伝導状態の抵抗値 *Rn* を測定により得る。測定時の温度が遷移端付近では ないため、TES は可変抵抗ではなく、固定抵抗として働くことを利用する。TES の抵抗を調べる事で、 温度が常伝導域の時は常伝導抵抗 *Rn*、超伝導域の時は寄生抵抗 *Rs* を評価できる。数点のデータを取 得し、*Ivs.V* の直線の傾きから *R* を求める。一点だけ使うよりも精度がよい。





図 6.5: TMU284-0104 の超伝導状態に おけるバイアススキャンの結果。超伝 導抵抗= ~ 0.26 mΩ @84mK。

図 6.6: TMU284-0104 の常伝導状態に おけるバイアススキャンの結果。常伝 導抵抗= ~ 153 mΩ @387mK。

## 6.3.1 R-T曲線

超伝導転移特性の測定結果を述べる。抵抗値の温度依存のプロットを図 6.7 に示す (R-T 曲線)。バ イアス電圧 = 0.15 V で測定を行った。転移温度は ~265 mK と高いものの、常伝導抵抗が ~80  $\Omega$ 、残 留抵抗が ~1  $\Omega$  である。転移幅は ~10 mK でありシャープな転移となっている。臨界電流は後述する。

転移温度	常伝導抵抗	残留抵抗	転移幅
${\sim}265~{\rm mK}$	$\sim \! 80 \ \Omega$	${\sim}1~\Omega$	$\sim 10 \text{ mK}$

表 6.2: TMU284-0104 の R-T 曲線 (図 6.7)

図 6.7: TMU284-0104 の R-T 曲線。バイアス電圧= 0.15 V で測定。転移温度 265 mK 。転移端幅 10 mK 。

#### 6.3.2 臨界電流

次に臨界電流 ( $I_c$ )の結果を示す (図 6.8)。TMU284-0104 の臨界電流。左図:臨界電流の温度変化。 右図: 左図をもとにプロットした、 $T_c$ と臨界電流の関係。横軸は温度を転移温度 $T_c$ で規格化してある。  $T/Tc \sim 0.8$  mK で  $Ic \sim 100 \mu$ A となった。第5章で扱った TMU193-4d の結果 (図 5.10)、 $I_c > 400$  $\mu$ A @ $T/T_c \sim 0.8$  と比較すると、低いことが分かる。転移温度 ( $T_c$ )よりも熱浴を低温の状態で動作さ せるので、待機環境において超伝導状態の維持を実現することは可能であるが、臨界電流の改善は必要 であると言える。



図 6.8: TMU284-0104 の臨界電流。左図: 臨界電流の温度変化。右図: 左図をもとに プロットした、 $T_c$ と臨界電流の関係。横軸は温度を転移温度 $T_c$ で規格化してある。  $T/Tc \sim 0.8$  mK で  $Ic \sim 100 \ \mu$ A。(また、参考として第5章で扱った TMU193-4d の結果を示してある。 $I_c > 400 \ \mu$ A @ $T/T_c \sim 0.8$ )。

## 6.3.3 エネルギー分解能

R-T 曲線、臨界電流の測定結果より、良質な超伝導転移特性である事を確認した。次に、X線照射実験を行ってエネルギー分解能の導出をして、カロリメータとしての性能評価を行った。波形取得を行った時の状況を以下にまとめた。

- S/N の最適化、ETF 測定は行っていない。
- 温度揺らぎが大きかったので、データを AC で、トリガ 10 mV で取得。
- 測定時間=~10時間
- 動作点:熱浴温度= ~183 mK 、バイアス電圧= 2.4 V 。

また、実験中に目視で気付いた点として以下のことがあった。

- 波高は最大でも 50-60 mV であった。TES の感度が悪いことが原因である。(TMU146, TMU193 などの波高は ~1 V である)。
- アフターパルスがしばしば見られた。
- 時々、オフセットが極端に下がる時があった。TES の温度安定性が悪かったのが原因と思われる。

以下に、今回取得したデータをもとに作成された各種結果を示す。まず、パルス波形の結果を示す。



図 6.9: 取得したパルス波形の全波形 (~7500 個)。時定数 ~1 ms 、AC で取 得。原因不明のオフセットの揺らぎが見られた。



図 6.10: 図 6.9 のパルス取得時近傍の拡大図。多くの波形が細かく揺らいでいる。



図 6.11: 図 6.9 から、~450 s で取得された 100 イベント抽出し たもの。パルス取得後の減衰中に、オフセットよりも~10 mV 数値が垂れ下がるイベントが見られる。図 6.9、図 6.10 を見る と、パルス取得後に数値が跳ね上がったり垂れ下がったりする イベントがいくつか見られる。

取得したパルス波形をもとに、エネルギー分解能の導出を行った。図 6.12 にベースライン分解能とエ ネルギー分解能を示す。ベースライン分解能  $\Delta E \sim 40 \text{ eV}$ 、エネルギー分解能  $\Delta E \sim 300 \text{ eV}$  となった。 なお、ゲイン補正無しの結果である。



図 6.12: ベースライン分解能とゲイン補正無しのエネルギー分解能。ベー スライン分解能  $\Delta E \sim 40 eV$ 、エネルギー分解能  $\Delta E \sim 300 eV$ 。

パルスハイトと熱浴温度の関係を調べた(図 6.13、図 6.14、図 6.15)。図 6.15 がパルスハイト vs. 熱浴温度の相関を示している。図 6.13、図 6.14 をもとにしている。これをみると、右下がりの相関があり そうだが、はっきりとは見られないことがわかる。



File : Tfile\_pulserec-c2000\_pha\_withLTC



図 6.15: 図 6.13、図 6.14をもとにした、パルスハイト vs. 熱浴温度の相関。右下がりの相関がありそうだが、はっきりとは見られない。

次にゲイン補正を行った結果を述べる。~300 s 毎にパルスハイトのヒストグラムのピークをフィット した(図 6.16)。黒線がピークの推移を表している。そして、そのピークが 5894.2 eV(使用した線源 <sup>55</sup>Fe から放出される Mn-Kα のエネルギー。)になるようにエネルギーに変換した(図 6.17)。



図 6.16: ~ 300s 毎にパルスハイトのヒストグラムのピークをフィット。黒線がピークの推移。



File : T\_Tfile\_pulserec-c2000\_pha\_withLTC\_PHA2PI

図 6.17: 図 6.16 のピークが 5894.2 eV になるようにエネルギーに変換 した。

ゲイン補正後のエネルギー分解能を図 6.18 に示す。エネルギー分解能  $\Delta E \sim 100 \text{ eV}$  という結果を得た。我々の研究グループがこれまでに達成してきた分解能と比較すると良い数値ではない。しかし、積 層配線基板を加工して製作された素子は今までにX線信号の取得に成功したことがないので、今回、積 層配線型の素子としては初めてX線信号を取得したことになる。図 6.19 に、実験中にパルスが出た瞬間 の写真を示す。



図 6.18: TMU284-0104 のゲイン補正後のエネルギー分解能  $\Delta E \sim 100 \text{ eV}$ 。二つのスペクト ルは、それぞれ横軸の範囲が違うものを表示している。



図 6.19: TMU284-0104 のX線照射試験中に、 パルスが出た瞬間。

今回の結果を、単素子としてグループの最高性能素子である TMU146 のデータとの比較を行った。ま ず、パルス波形について述べる。図 6.20 に TMU146 のパルス波形を示す(2009 年 6 月 10 日取得のデー タ)。波高値が、TMU284-0104 の結果(図 6.11)よりも~10 倍大きい。実際の比較を図 6.21 に示す。赤 線が TMU284 、青線が TMU146 の結果を示している。TMU284 は平均パルスが小さいことが分かる。



図 6.20: TMU146 のパルス波形。波高値が TMU284-0104 の結果よりも ~10 倍大きい。



図 6.21: TMU146 と TMU284 のパルス波形の比較。赤線が TMU284 、 青線が TMU146 の結果。TMU284 は平均パルスが小さい。



図 6.22: TMU146 と TMU284 のパルス波形の比較その2。横軸を広くとってある。

パワースペクトルについての比較を図 6.23 に示す。左図はパルススペクトル、右図はノイズスペクト ルの比較をしている。赤線は TMU284、青線は TMU146 である。動作点が異なるので単純な比較は難 しいが、左図を見ると TMU284 の方が信号のパワーが一桁小さい。また、右図を見ると、ノイズレベ ルに関しては大きな違いは見られないことがわかる。



図 6.23: TMU146 と TMU284 のパワースペクトルの比較。左図:パルススペクトル。右図:ノイズス ペクトル。赤線は TMU284、青線は TMU146。

• 補足:イベント選別の修正をしてみた。適当に波形選別を行った(図 6.24)。選別した波形について、分解能の導出を行った(図 6.25)。



図 6.24: TMU284-0104 のパルス波形のデータを、適当に選別。



図 6.25: 選別した波形について、分解能を導出。左図:ゲイン補正前。右図:ゲイン補正後。

# 6.4 まとめと課題

4 × 4 積層配線 TES TMU284 の測定結果のまとめと課題について述べる。

#### 6.4.1 R-T 曲線

転移温度は~265 mK と高いものの、常伝導抵抗が~80 Ω、残留抵抗が~1 Ω という結果になった。 転移幅は~10 mK でありシャープな転移となっている。転移温度が高いこと以外は良い結果といえる。 目標である 100-120 mK よりも倍近く高かった。

転移温度を下げるためには、二層薄膜の膜厚の調整が必要である。これまでチーム内では Au/Ti=2 であると 100-150 mK 内で転移 することが分かっている。また、比が大きければ大きいほど転移温度が 下がる傾向 にあることも分かっている。しかし、TMU 284 も Ti と Au の比が 2 と最適な膜厚比にし て いたが、転移温度は目標温度よりも大幅に高かった。Ti が厚いと Au の近接効果が効きにくいのか もし れない。Ti の膜厚 100 nm は上部配線の厚みに対して Ti が段切れを起こさないように厚くした 結果である。これよりも薄い場合、段切れがおきやすい。

現在の積層配線基板では配線がもとから形成されているが、上部配線の形成は二層薄膜加工プロセス の後にするべきである。そうすれば、Ti の段切れを考慮する必要がなくなり、Ti の膜厚を単素子の場 合(TMU146 の Ti の膜厚は 30 nm)のように薄くすることができる。

#### 6.4.2 臨界電流

 $T/Tc \sim 0.8$  mK で  $Ic \sim 100 \mu$ A というやや低い結果となった。第5章で扱った TMU193-4d の結果 (図 5.10)、 $I_c > 400 \mu$ A @ $T/T_c \sim 0.8$  と比較すると、低いことが分かる。転移温度( $T_c$ )よりも熱浴を 低温の状態で動作させるので、待機環境において超伝導状態の維持を実現することは可能であるが、臨 界電流の改善は必要であると言える。

臨界電流は温度に依存する。よって、転移温度が低くなれば、改善されると考えられる。

#### 6.4.3 エネルギー分解能

エネルギー分解能  $\Delta E \sim 100 \text{ eV}$  という結果となった。我々の研究グループがこれまでに達成してきた分解能と比較すると良い数値ではない。感度が悪い、パルスが小さい点も上げられる。しかし、積層 配線基板を加工して製作された素子は今までにX線信号の取得に成功したことがないので、今回、積層 配線型の素子としては初めてX線信号を取得したことになる。

エネルギー分解能は R-T 曲線の質に大きく依存するので、R-T 曲線の改善をすることである程度良 いエネルギー分解能は期待できると考えられる。転移温度が高いとその分エネルギー分解能が悪化する。 このエネルギー分解能 は Ti と Au の膜厚比と相関がるので、臨界電流と同様に転移温度を低くすれば、 ある程度の改善は見られると考えられる。

また、配線の接触も現在では悪くなりがちである。特にコンタクトホールはプロセス中に侵されやす い。これも、転移温度の改善と同じに、上部配線の形成を二層薄膜加工プロセスの後にすることで解決 する可能性がある。接触が良くなれば素子の安定した動作に繋がる。

感度やパルスは、配線の接触や二層薄膜の仕上がりを良くすれば改善される可能性がある。

# 第7章 積層配線を用いた 20 × 20 素子の性能評価

次に、2012 年 3 月に製作された 20 × 20 = 400 pixel の大規模ピクセルアレイの性能評価について述 べる。この素子のような大規模アレイの製作は第 3 章で紹介した 16 × 16 = 256 pixel 以来の事である。 また、搭載を目標とする DIOS 衛星の要求値である 400 pixel を満たしている。

積層配線基板を用いた素子開発を行って以来、製作プロセスの確立に努めてきた。そして、第3章で 述べたように我々は4×4 pixelの基板を用いて製作プロセスを確立した。今回、このプロセスを20× 20 pixel にも応用して、素子製作を行った。素子番号は TMU293 である。

# 7.1 TMU 293 の製作

上部配線/下部配線の厚さ=Al:50 nm / Al:100 nm。上部配線/下部配線の幅=10 nm / 15 nm。 Ti/Au の厚さ=100 nm / 250 nm で製作。Au の吸収体は 120  $\mu$ m 角で厚さ 0.950  $\mu$ m、傘無しの stem 部分のみを、1つ飛ばしで 400 ピクセルのうちの半数にのせた。吸収体有りと無しで、転移温度などの 性能比較を行えるためである。吸収体付けのプロセスで素子に影響がないかが分かる。

## 7.1.1 制作方法

4×4 pixel の場合と同じ製作プロセスである。詳しくは前章を参照。

## 7.1.2 4 × 4 TES との違い

基板サイズ (4 × 4 は 20 mm、20 × 20 は 35 mm) が異なるため、二層薄膜を成膜するスパッタ時 に、4 × 4 pixel に成膜する時よりも一様性が悪くなる可能性がある。ある部分で二層薄膜の仕上がりが 悪いと、ピクセル加工後の1 ピクセル各々の性能に影響を及ぼす。また、配線の幅も異なっている。前 章で扱った TMU284 は上部/下部= 20 nm / 30 nm であったのに対して、今回の TMU293 は上部/ 下部= 10 nm / 15 nm である。これは、配線が TMU284 よりも密になるため、幅を狭くした結果であ る。また、全体的に配線は長い。こうした変更により、あらかじめ配線が製作されている積層配線基板 の加工をする上で、TMU284 の加工では問題なかったプロセスや方法が、TMU293 の場合は配線に悪 影響を及ぼす可能性がある。

## 7.1.3 外観

製作した TMU293 の全体画像を以下に示す(図??)。図??を少し拡大した画像を図7.2 に示す。黒 く見えるピクセルは製作過程でメンブレンが破れてしまったもの。その他、多少の汚れはあるものの、 全体的にきれいな仕上がりとなっている。メンブレンが破れて加工に失敗したピクセルの画像を図7.3 に示す。また、図7.3 の左図には比較のために加工に成功したピクセルの画像を示してある。



図 7.1: TMU293: 20 × 20 ピクセルアレイの TES カロリメータ。半数に吸収体を形成。



図 7.2: TMU293 を少し拡大した写真。



図 7.3: 製作プロセスが完了した段階で、加工に成功したピクセル(左図)と失敗 したピクセル(右図)を比較。

# 7.2 室温下での性能評価

低温下での性能評価の前に、室温下での性能を評価する。室温下では室温抵抗を測定することで素子 の歩留まりを知ることができる。ここで分かる抵抗値がショートまたは断線している場合、歩留まりを 評価できる。また、配線の抵抗値がバルクの理論値と比べて明らかに異常な値であった場合、歩留まり には影響しないが、超伝導転移特性を示さなかったり、示しても素子としては使えないレベルである可 能性がある。

## 7.2.1 配線抵抗

室温下での抵抗値測定の結果を示す(図 7.4)。抵抗を示したピクセルは 242 個であった。ここでバル クな抵抗の理論値を考える。配線の片道が最長で ~12 mm 、最短で ~8 mm とすると、式 6.1 より、配 線の理論値は ~597-896 Ω となる。また、20 × 20 基板の場合、加工前の時点でこの理論値の ~1.5-2.0 倍となることが分かっている。[36] 一般的に、金属薄膜はそのバルクな理論値と比較して抵抗値が高く なる傾向があることによると考えられる。





図 7.4: 室温下における1ピクセル毎の抵抗値。抵抗を示したピクセルは 242 個。

# 7.2.2 バルク抵抗との比較

参考として、加工をする前の積層配線の抵抗値の測定結果を示す(図 7.5)。基板は MLR#2 を使用した(基板が割れていたため、一部は測定されていない。)。この測定値とバルクな理論値との比較図を示す(図 7.6)。各線は、測定値がバルクな理論値の倍数である(緑:3倍、赤:2倍、黒:1倍)。色分けされた数字は、ピクセルの個数である。概ね、バルクな理論値の~2倍に集まっていることが分かる。





図 7.5: 室温下における加工する前の積層配線の抵抗値。基板は MLR#2。

 $File: Tfile\_TMU293\text{-}Teikou\text{-}Correct\_ver2\_withth\_num\_sed\_Ohishi\_cut$ 



図 7.6: 図 7.5 の使用基板の測定値とバルクな理論値との比較。各線は、測定値が バルクな理論値の倍数である。緑:3倍、赤:2倍、黒:1倍。色分けされた数字 は、ピクセルの個数。

次に、TMU293 を製作するために使用した積層配線基板について述べる。基板は MLR#8 を使用した。室温下における配線の、バルクな理論値を示す(図 7.7)。場所ごとに抵抗値が違う理由は、配線の長さの違いである。式 6.1 で計算した。この測定値とバルクな理論値との比較図を示す(図 7.8)。各線は、測定値がバルクな理論値の倍数である(緑:3倍、赤:2倍、黒:1倍)。色分けされた数字は、ピクセルの個数である。概ね、バルクな抵抗値よりも ~2.5 倍大きい。また、~ 0.5 倍にも分布が見られる。この分布領域のピクセルを1つ低温で性能評価したところ、Al が超伝導転移する ~1.2 K で、抵抗値が 1 mΩ となった。これは、配線が TES まで届いておらず、途中でショートしている事を示している。(項 7.3.1、7.4.1 のピクセル ID:2002 の結果を参照。)基板を加工する前の測定値は ~1.5-2 倍である事が分かっており、これと比較すると少し大きい。

File : Tfile\_TMU293-Teikou-Correct\_ver2\_withth\_num\_sed



図 7.7: 室温下における積層配線のバルクな理論値。基板は MLR#8。

File : Tfile\_TMU293-Teikou-Correct\_ver2\_withth\_num\_sed



図 7.8: 図 7.7 で測定した素子配線の測定値とバルクな理論値との比較。(図 7.4 と 図 7.7 との比較)。各線は、測定値がバルクな理論値の倍数である。緑:3倍、赤: 2倍、黒:1倍。色分けされた数字は、ピクセルの個数。

次に、二層薄膜をピクセル加工した素子(TMU293,MLR#8)と、二層薄膜を形成していない積層配 線基板(MLR#2)の配線抵抗の実測値の比較を行った(図 7.9)。各線は、測定値がバルクな理論値の 倍数である(緑:3倍、赤:2倍、黒:1倍)。色分けされた数字は、ピクセルの個数である。



File : Tfile\_TMU293-Teikou-Correct\_withth\_num\_Ohishi\_cut

図 7.9: Y 軸: MLR#8、X 軸: MLR#2。各線は、測定値がバ ルクな理論値の倍数である。緑:3倍、赤:2倍、黒:1倍。 色分けされた数字は、ピクセルの個数。

参考として、TMU293の上部配線と下部配線の抵抗値をそれぞれ測定した結果を以下に示す(表 7.1)。 0802,0806,0709,1601はバルクな抵抗値と比較して ~2.5 倍の値を示しており、正常な振る舞いと 言える。一方、2004,1808はバルクな抵抗値から予測される値と比較して異常に低い値を示しており、 どこかで配線がショートしているピクセルだと考えられる。残りの、抵抗値が∞のピクセルは配線が 断線していると考えられる。

ピクセル ID	上部配線(Ω)/ バルク	下部配線(Ω)/ バルク	配線抵抗 / バルク
0802	1112 / 523	364 / 174	$1476 \ / \ 697$
0806	$1547 \ / \ 614$	413 / 205	2130 / 819
2004	700 / 543	500 / 182	550 / 724
1808	$525 \ / \ 523$	409 / 174	$158 \ / \ 697$
0709	$1500 \ / \ 526$	422 / 175	1768 / 808
1601	$1700 \ / \ 622$	800 / 207	2040 / 706
1110	$\infty$	$\infty$	$\infty \ / \ 919$
1703	$\infty$	$\infty$	$\infty$ / 784
1807	$\infty$	$\infty$	$\infty$ / 751

## 7.2.3 歩留まりの評価

20 × 20 積層配線基板の配線の片道が最長で ~12 mm 、最短で ~8 mm とすると、式 6.1 より、配線のバルクな理論値は ~597-896  $\Omega$  となる。20 × 20 基板の場合、加工前の時点でこの理論値の ~1.5-2.0 倍となることが分かっている。加工を行った TMU293 の場合、理論値の ~2.0-3.0 倍がスタンダード な結果となった。製作プロセスを経ることで、バルクな理論値との差が広がったようである。よって、TMU293 で正常な抵抗値は ~1200-3000  $\Omega$  とする。

図 7.4 より、抵抗値を示したピクセルは 242 個である。歩留まりは ~60% である。このうち、正常な 抵抗値は ~200 個となる。歩留まりは ~50% になる。抵抗値が異常に低いピクセルは、配線がショート していると考えられる。実用的には ~90% 以上を目標としており、歩留まりが悪いと言える。また、図 7.7 のように抵抗値に一様性がないことから、素子の仕上がりにムラがあると言える。

今後、歩留まりを改善するための製作プロセスの検討が必要である。

# **7.3** 低温下での性能評価

製作した素子を希釈冷凍機を用いた極低温の環境において、性能評価を行う。測定対象としたピクセルを表 7.2 に示す。今後、それぞれ 1001,1120,1706,0709,2002 と表現する。ただし、1706 は実験中に SQUID からの応答を得る事ができなかったため、データは得られていない。通常、SQUID からの応答がないのは、臨界電流が非常に低く、TES にバイアスをかけられない時だが、1706 は配線がショートしている可能性のあるピクセルであり、TES へ電気的に接続されていないことが原因の可能性がある。

X 軸	Y 軸	超伝導転移特性	X線照射
10	01	$\bigcirc$	$\bigcirc$
11	20	$\bigcirc$	×
17	06	$\bigcirc$	$\bigcirc$
07	09	$\bigcirc$	×
20	02	$\bigcirc$	×

表 7.2: TMU293 で測定対象としたピクセル

# 7.3.1 R-T 曲線、

測定した5つのピクセルについて、それぞれの R-T 曲線を示す。

はじめに 2002 の結果を示す。2002 は図 7.4 の中で中心から右下の方向に分布する、抵抗値が異常に 低い領域の中のピクセルである。室温下での抵抗値は 623 Ω であった。2002 の R-T 曲線を図 7.10 に 示す。転移温度が約 1150 mK である。ここでの転移以降、抵抗値が 1 mΩ となっている。この温度で の転移は Al である。したがって、2002 は配線とピクセル部分が繋がっておらず、どこかでショートし ていると言える。

また、1706(室温下での抵抗値は 623 Ω)も 2002 と同じ、抵抗値が異常に低い領域に位置しており、 SQUID からの応答がなかったのは、そもそもピクセルと配線が繋がっておらず、全体としてすでに転移 を終えているため、データ取得を行う予定であった 500 mK 以下での応答がなかったものと思われる。



File : Tfile\_LTC120529lateCH12002\_1\_7\_6\_13\_merged\_liny

図 7.10: TMU293-2002 の R-T 曲線。転移温度が約 1150 mK である。 ここでの転移以降、抵抗値が 1 m Ω となっている。この温度での転移は Al である。したがって、2002 は配線とピクセル部分が繋がっておらず、 どこかで配線同士がショートしていると言える。

次に、0709(室温下での抵抗値は 1768  $\Omega$ )の結果を述べる。このピクセルでは、配線、ピクセル共に 超伝導転移を確認した。超伝導転移特性を表 7.3 に示す。常伝導抵抗が ~22  $\Omega$ 、残留抵抗が ~2  $\Omega$  であ り、どちらも高い。転移幅は ~130 mK でありシャープな転移ではない。

転移温度	常伝導抵抗	残留抵抗	転移幅
${\sim}1150~{\rm mK}$	$\sim 22 \ \Omega$	$\sim 2 \Omega$	${\sim}130~{\rm mK}$

表 7.3: TMU293-0709 の R-T 曲線 (図 7.11)

臨界電流は転移温度よりも十分に低い 98.1 mK で測定した。LR 700(4.7.1 参照)を使った、電流値 を変化させて臨界電流を測定した(表 7.4)。電流値を増加させると、すぐに超伝導が破れることが分か る。ただし、もともと残留抵抗が高いため、最初から破れているようなものである。

測定点:98.1 mK	
電流値(µA)	抵抗值(Ω)
1	2.7 - 3.0
3	18

#### 表 7.4: 0709 の臨界電流

R-T 曲線を図 7.11 に示す。左図:温度範囲:0-1400 mK で表示。配線もピクセルもどちらも超伝導 転移している。右図:温度範囲:100-400 mK で表示。常伝導抵抗が ~22 Ω、残留抵抗が ~2 Ω であり、 どちらも高い。転移幅は ~130 mK でありシャープな転移ではない。配線もピクセルもどちらも超伝導 転移をしているが、常伝導抵抗や残留抵抗が異常に大きいことを考えると、このピクセルも仕上がりに 問題があると思われる。



図 7.11: TMU293-0709 の R-T 曲線。左図:温度範囲:0-1400 mK で表示。配線もピクセルもどちら も超伝導転移している。右図:温度範囲:100-400 mK で表示。常伝導抵抗が ~22 Ω、残留抵抗が ~2 Ω であり、どちらも高い。転移幅は ~130 mK でありシャープな転移ではない。

次に、1120の結果を述べる(室温下での抵抗値は 1163 Ω)。このピクセルでは、配線、ピクセル共 に超伝導転移を確認した。超伝導転移特性を表 7.5 に示す。常伝導抵抗が ~9 Ω であり、他の測定ピク セルと同様に高い。残留抵抗は ~ 数 十 mΩ であり、不安定ではあるが比較的低いと言える。転移幅は ~450 mK でありシャープな転移ではない。なお、臨界電流は実験時に温度コントロールが上手く出来 ず、測定できなかったためデータはない。

転移温度	常伝導抵抗	残留抵抗	転移幅
${\sim}250~{\rm mK}$	$\sim 9 \ \Omega$	$\sim$ 数十 m $\Omega$	${\sim}450~{\rm mK}$

表 7.5: TMU293-1120 の R-T 曲線 (図 7.12)、(図 7.13)

R-T 曲線を図 7.12 に示す。図 7.13 は、200 mK 付近を拡大して表示したものである。青いプロット がピクセル 1120 の R-T 曲線であり、赤いプロットは別のピクセルのものなので、無視する。転移幅は 他の測定したピクセルと比較して幅が広い。



図 7.12: TMU293-1120 の R-T 曲線。

を拡大して表示。

最後に 1001 の結果を示す (室温下での抵抗値は 1195 mΩ)。1001 は SQUID による測定と LR700 に よる測定の、2回行った(4.7.1)。SQUID による R-T 曲線を図 7.14、LR-700 によるものを図 7.15 に 示す。まず、図 7.14 の SQUID による測定の結果について述べる。超伝導転移特性を表 7.6 に示す。常 伝導抵抗が ~1 Ω であり、少し高い。超伝導転移後の抵抗値である残留抵抗は ~ 数 mΩ であった。目標 値は ~1 mΩ であるため、少し高い。転移幅は ~50 mK であり、シャープな超伝導転移とはいえない。

転移温度	常伝導抵抗	残留抵抗	転移幅
${\sim}220~{\rm m}\Omega$	$\sim 1 \Omega$	$\sim 数 m\Omega$	${\sim}50~{\rm mK}$

表 7.6: SQUID による測定で得られた 1001 の超伝導転移特性(図 7.14)

また、臨界電流はいくつかの測定点で測定したところ 4-8 μA であり(要求値は >100 μA)、非常に 超伝導が破れやすい性質であることがわかる。各測定点の臨界電流を表 7.7 に示す。

測定点 (mK)	臨界電流 (μ A)
225	4
205	6
178	6
141	8
117	8

表 7.7: SQUID による測定で得られた 1001 の臨界電流



図 7.14: TMU293-1001 の SQUID により測定された R-T 曲線。



図 7.15: TMU293-1001 の LR700 により測定され た R-T 曲線。温度感度 α は 23 となった。

#### 7.3.2 臨界電流

臨界電流に関しては、7.3.1の項で各ピクセル毎に述べてきた。どのピクセルも 10 μ A 以下で超伝導 が破れてしまうという結果であった。実用面においては安全マージンをとって、100 μ A 以上を臨界電 流に要求している。また、過去グループ内で製作されてきた素子の中でも臨界電流が低く、超伝導が破 れやすいと言える。

# 7.3.3 エネルギー分解能

ピクセル ID:1001,1706 に関しては SQUID を用いたX線照射実験を行い、エネルギー分解能の導 出を試みた。1706 に関しては 7.3.1 で述べた通り、SQUID からの応答を得られなかったため、超伝導 転移特性すらもわからなかった。1001 に関しては、超伝導転移特性は得られたが、X線照射実験時にX 線信号を取得する事ができず、結果としてエネルギー分解能の導出には至らなかった。結局、テストし たすべてのピクセルでX線信号を得ることができなかった。

## **7.4** 断面の詳細観察

室温下での性能評価で、歩留まりが悪いこと、バルクな抵抗値と照らし合わせると問題のあるピクセ ルが存在することが分かった。低温下での性能評価では、常伝導抵抗と残留抵抗の高さ、転移温度の高 さ、臨界電流の低さが判明した。また、X線信号の取得も叶わなかった。

これらの原因を調査するために、電子顕微鏡を用いた形状観察と断面観察により、肉眼や光学顕微鏡 のみでは分からない TMU293 の素子情報を得ることにした。

## 7.4.1 SEM 画像

走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope、SEM) を用いて、TMU293 の表面形状の観察を 行った。SEM は首都大8号館 129 室にあるものを使用した(図 7.16、KEYENCE 社製 VE-8800)。観 察した対象を表 7.8 に示す。正常とした抵抗値は室温下での値とし、範囲は、図 7.8 (バルクな抵抗値) の 2-3 倍を示すピクセルとした。

観察対象	抵抗の情報
0709	正常
1501	導通せず
2004	抵抗値が異常に低い
導通していないピクセルの配線	導通せず

表 7.8: SEM 観察を行った TMU293 のピクセル

バルクな抵抗値と比較して正常なピクセルに 0709、導通しなかったピクセルに 1501、抵抗値が以上 に低いピクセルに 2004を選んだ。また、導通していないピクセルの配線も観察対象とした。図 7.4の中 に観察領域を枠付けした(図 7.17)。



図 7.16: 首都大 8 号館 129 室にある SEM。 KEYENCE 社製 VE-8800 。



図 7.17: TMU293 を SEM 観察した領域を赤枠で示した。抵抗値= ~1200-2500 Ω を正常な抵抗値と した。

各観察対象を、SEM 画像とともに考察していく。

はじめに、室温下での抵抗値測定で導通していなかった TMU293-1501 の観察結果について述べる。 左下図:TES 部分。右下図:左下図の TES 側コンタクトホール部分を拡大したもの。左上図:左下 図のオレンジ色の枠を拡大したもの。白い部分は TES 。画像下に見える灰色の細い線が配線。中央上 図:左上図の配線を、配線 pad 側へ少したどった領域が見える。右上図:配線を拡大したもの。内側の 線として見える上部配線と、外側の線として見える下部配線を別々に見ることができる。

配線については、右上図から、上部配線に削られた様な傷が多く見られる。TES 部分自体に目立った傷は見られない。このピクセルは導通していないことを考えると、上部配線との接触が悪いと推測できる。



図 7.18: TMU293-1501 のまわりの SEM 画像。

次に、室温下での抵抗がバルクな抵抗値と比較して異常に低かった TMU293-2004 の観察結果につい て述べる。

上図:配線。左上図が一番低倍率の画像。右上図は一番高倍率の画像。中央上図は中間の倍率である。 ただし、それぞれの画像は別の箇所を観察したもの。左下図:TES 部分。右下図:左下図の TES 側コ ンタクトホール部分を拡大したもの。

配線の至る所に、深くえぐった様な引っ掻き傷が見られる。中央上図を見ると、一部の上部配線が消失 しているように見える。さらに別の箇所だが、右上図を見るとその傷は上部配線だけでなく、絶縁膜を 挟んで下層に位置している下部配線にまで達しているように見える。こうした一部の傷が下部配線にま で達しており、その傷の部分で上部配線と下部配線がショートし、上部配線の抵抗が低くなっていると 考えられる。室温下での抵抗値がバルクな抵抗値と比較して異常に低いことの原因は、このショートだ と思われる。表 7.1 の 2004 のところをみると、上部配線の抵抗値が低いことを確認できる。また、TES 部分にも小さな傷が見られる。コンタクトホールも汚れが目立ち、きれいな仕上がりとはいえない。

こうした傷の原因は、レジストのリフトオフ時や、加工中にピンセット等でこすったりしてできたと 思われる。



図 7.19: TMU293-2004 のまわりの SEM 画像。

次に、室温下での抵抗値測定で導通していなかったピクセルのうち、配線 pad 側へ配線をたどってい くと束になる一纏まりの配線を持つピクセル群について、その束になっている領域の観察を行ったので、 述べる。

左図:配線が束になっている領域の画像。右図:左図で示したオレンジ色の枠を拡大したもの。

どの配線も、上部配線に多数の傷が見られる。引っ掻き傷だけではなく、泡がはじけた後に残る様な 球状の傷も見られる。ただし、図 7.19の右上図のように下部配線にまで達している傷は見られない。も し下部配線まで傷が達していた場合、図 7.20にある配線の束のうちいくつかは抵抗値が異常に低いピク セルとなっていた可能性がある。



図 7.20: 7.17 で「配線」と示した領域の SEM 画像。

最後に、室温下で正常な抵抗値を示した TMU293-0709 の観察結果について述べる。

上図: 配線。オレンジ色の矢印で示した配線が、 0709 のものである。右上から中央上、左上へと、 TES 部分から配線 pad 側へたどっている。下図: TES 部分。画像の右端にある小さな四角は TES 側 のコンタクトホール。

配線、TES 部分ともに細かい傷が見られる。しかし、問題視する程のものではない。



図 7.21: TMU293-0709 まわりの SEM 画像。

### 7.4.2 SEM 画像観察まとめ

2004 と同じ、図 7.4 の中の右下の領域に分布する青色で示した領域に属するピクセル 2002 は、 図 7.10 で示した通り配線 pad 側と TES 側が断線している。同じ青い色の領域でも、2002 のように断線しているものと、2004 のように上部配線と下部配線のショートが起きているものもあることが分かった。

また、室温下での抵抗値測定において導通していない、または抵抗値が異常に低かったピクセルは、 配線に傷があることが分かった。導通していなかったものは、上部配線が引っ掻き傷等により削られ、 そのうち一部で配線自体が削り取られてしまったため、断線して導通しなくなった。抵抗値が異常に低 かったものは、こうした引っ掻き傷が深く、絶縁膜を挟んで下層に位置する下部配線にまで傷が達した ため、上部配線と下部配線がショートし、上部配線の抵抗値が低くなった、かつ、合計の抵抗値も低下 したものと言える。図 7.10 に配線の断線と、ショートのイメージ図を示す。

ショートしたり断線した原因について述べる。ショートについてだが、これは下部配線までえぐれて しまっているので物理的についた傷だと言える。傷が加工プロセス中いつできたかを考えると、1つは、 プロセスの合間合間でピンセットなどで引っかいてしまった可能性があげられる。もう1つは、最後の メンブレン形成 (ドライエッチング)時に Al の台座と基板の TES 面を接触させて固定するが、そのと きに擦れてしまった可能性である (Al 台座表面が全くの平らでないため)。この2つが可能性として挙 げられるが、ピンセットによる傷はありえるが、その傷は目視でも確認できるので、後者が有力だと考 えられる。

断線した原因について述べる。上述のように、明らかに物理的についた傷によっても起こりうるが、 SEM 画像を見ると別の原因によるものだと思われる。泡状に傷ついたりしているので、おそらく薬品 による傷(腐食)だと考えられる。配線にダメージを与えるような薬品は TMU293 の場合は Au, Ti のエッチング時にしか使っていないので、Au エッチング時にうまく Al が保護されず、Ti エッチング 時に H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> で腐食してしまったと思われる(他のプロセスでは洗浄用途のアセトンと IPA のみ使用)。 TMU284-0304 の配線上の汚れ(6.2.1 参照)と同じような汚れであり、同様の原因でできたと思われる。


#### 7.4.3 FIB 画像

SEM 画像観察で判明したことはあるが、TMU293 の素子情報をさらに知る必要があった。そこで、積 層配線基板の製作をお願いしているセイコー株式会社に調査を依頼した。セイコーは社内に SEM/FIB 複合機(XVision300)と STEM-EDS(JEM-2010F-EDS)を保有しており、この2つを用いた断面観 察と、一部のエリアについては詳細な元素分析を行っていただいた。観察対象としたピクセルは 0709, 1001 の2つである(FIB: Focusing Ion Beam, EDS: Energy Dispasive X-ray Spectrometer)。

SEM/FIB 複合機は、FIB にて行う試料の断面加工をリアルタイム SEM 像観察ができる。 これによ り、表面に埋もれた微小な欠陥、異物を逃すことなく断面を露呈し観察及び元素分析ができる装置であ る。STEM-EDS は、電子線を細く絞り試料上を走査しながら、各点から発生した特性X線を EDS 検出 器に取り込むことにより、試料の組成分布の情報を得ることができる。TEM 測定では、SEM 測定に見 られる様な電子線の拡散が殆どないため、~数 nm の空間分解能で測定ができる。

はじめに、0709 の結果から述べる。図 7.23 から図 7.34 の画像に観察結果を示す。図 7.23 は TMU293-0709 のピクセル画像であり、Area1,2,3 の観察を行った。Area1 は二層薄膜と配線のコンタクト部 (図 7.24)、Area2 は TES 側の配線コンタクトホール (図 7.29)、Area3 は二層薄膜の中心付近である (図 7.34)。

図 7.24 で仕上がりに問題があると思われる領域について、Area1-1 (図 7.25)、Area1-2 (図 7.26)、 Area1-3 (図 7.28) としてより詳細に観察を行った。形状情報を得られる二次電子画像と、組成情報を得 られる反射電子画像(重い元素ほど白く見える)を取得して観察した。その結果、図 7.25 では特に段切 れ等の問題は見られなかった。図 7.26 では Au が殆ど付いていないことと、Al の一部に空洞があるこ とが分かった。図 7.27 は図 7.26 の元素分析の結果であり、確かにこの領域では Au が殆ど付いていない ことと、Al の一部に空洞があることが確認できる。図 7.28 では特に段切れ等の問題は見られなかった。

図 7.29 で特徴的な 3 つの領域について、Area2-1 (図 7.30)、Area2-2 (図 7.32)、Area2-3 (図 7.33) としてより詳細に観察を行った。その結果、図 7.30 では特に問題は見られなかった。図 7.31 は図 7.30 の元素分析の結果であり、確かにこの領域では仕上がりに問題はなさそうである。図 7.32、図 7.33 につ いても、特に問題はないと判断した。

図 7.34 は特に問題は見られなかった。もっとも、何らかの境界付近ではないこの領域に問題があって は困る。

0709 についてまとめると、個々の画像について一部のエリアで仕上がりに問題がある部分があるが、 それ以外のエリアは二層薄膜の均一性、密着性共に良いことが分かった。問題があったのは図 7.26 の Area1-2 で、Au が殆ど付いていないことと、Al の一部に空洞があることが分かった。



図 7.23: TMU293-0709 で観察するエリアを赤枠で表示。Area1:二層 薄膜と配線のコンタクト部。Area2:TES 側の配線コンタクトホール。 Area3:二層薄膜の中心付近。



## 2 µm

図 7.24: 図 7.23 の Area1 の断面図。この画像で仕上がりに問題があると 思われるエリアについて、Area1-1, -2, -3 と分けて観察を行った。





図 7.25: 図 7.24 の Area1-1 の断面図。左図:二次電子画像。形状情報を 得られる。右図:反射電子像。組成情報を得られる。重い元素ほど白く 見える。特に段切れは見られない。



図 7.26: 図 7.24 の Area1-2 の断面図。Au が殆ど付いていない。Al の一 部に空洞がある。







図 7.28: 図 7.24 の Area1-3 の断面図。特に段切れは見られない。



図 7.29: 図 7.23 の Area2 の断面図。





図 7.30: 図 7.29 の Area2-1 の断面図。特に問題はないように見える。



図 7.31: 図 7.30 の元素分析。



図 7.32: 図 7.29 の Area2-2 の断面図。特に問題はないように見える。



図 7.33: 図 7.29 の Area2-3 の断面図。特に問題はないように見える。



図 7.34: 図 7.23 の Area3 の断面図。特に問題はないように見える。

次に、1001の結果を述べる。図 7.35 から図 7.42 の画像に観察結果を示す。図 7.35 は TMU293-1001 のピクセル画像であり、赤枠を観察領域 Area1 として観察を行った。Area1 は二層薄膜と配線のコンタ クト部近傍である(図 7.36)。また、赤枠で示してはいないが、TES 側の配線コンタクトホール部も断 面観察はしていないが、観察を行った(図 7.42)。

図 7.36 で特徴的な領域について、Area1-1 (図 7.37)、Area1-2 (図 7.39)、Area1-3 (図 7.40)、Area1-4 (図 7.41) としてより詳細に観察を行った。形状情報を得られる二次電子画像と、組成情報を得られる反射電子画像(重い元素ほど白く見える)を取得して観察した。その結果、図 7.37 では Au が途中で段切れを起こしていることが分かった。図 7.38 は図 7.37 の元素分析の結果であり、確かにこの領域では Au が途中で段切れを起こしていることが確認できる。図 7.39、図 7.40、図 7.41 では特に段切れ等の問題はないと判断した。また、図 7.42 でも特に問題はなさそうであった。

1001 についてまとめると、個々の画像について一部のエリアで仕上がりに問題がある部分があるが、 それ以外のエリアは二層薄膜の均一性、密着性共に良いことが分かった。問題があったのは図 7.37 の Area1-1 で、途中で Au が段切れを起こしており、一部で Au が薄くなっていた。まt、TES 側のコン タクトホール部は特に問題はなさそうであった。

#### 7.4.4 FIB 画像観察まとめ

0709,1001 共に、一部のエリアで仕上がりに問題がある部分があるが、それ以外のエリアは二層薄膜の均一性、密着性共に良いことが分かった。問題となったのは二層薄膜と配線のコンタクト部近傍である。0709 では、 Au が殆ど付いていないことと、Al の一部に空洞があることが分かった。1001 では、途中で Au が段切れを起こしており、一部で Au が薄くなっていることが分かった。

4 × 4 積層配線素子と 20 × 20 積層配線素子の両方を FIB で見た訳ではないのではっきりとした原 因は言えないが、今回の FIB の結果からは、二層薄膜と配線コンタクト部の段差近傍で Au が段切れを 起こしたように薄くなっているのが分かっているので、それが性能劣化の原因ではないかと思われる。

4×4 でこうした段切れ問題が起こらなかったのは基板が小さかったため、同じフォトリソ条件でも 段差へのレジストの被覆性が 20×20と違う、などが考えられる。ただし、上述の通り、4×4を FIB で観察した訳ではないので、明確には分からない。



図 7.35: TMU293-1001 で観察するエリアを赤枠で表示(Area:二層薄 膜と配線のコンタクト部)。また、赤枠で示してはいないが、TES 側の 配線コンタクトホール部も観察を行った(断面図ではない)。



図 7.36: 図 7.35 の Area の断面図。Area1-1:二層薄膜と配線の接合部近 傍 1 。Area1-2:二層薄膜と配線の接合部近傍 2 。Area1-3:二層薄膜と 配線の接合部。Area1-4:配線部。



図 7.37: 図 7.36 の Area1-1 の断面図。左図:二次電子画像。形状情報を 得られる。右図:反射電子像。組成情報を得られる。重い元素ほど白く 見える。途中で Au が段切れしている。



図 7.38: 図 7.37 の元素分析。



図 7.39: 図 7.24の Area1-2の断面図。特に段切れは見られない。



図 7.40: 図 7.36 の Area1-3 の断面図。特に段切れは見られない。



図 7.41: 図 7.36 の Area1-4 の断面図。特に段切れは見られない。



図 7.42: 図 7.35 の TES 側コンタクトホール部の画像。特に問題はない ように見える。

# 7.5 まとめと課題

20 × 20 積層配線 TES TMU293 の測定結果のまとめと課題について述べる。

#### 7.5.1 R-T 曲線

5つのピクセルを測定して、2つは配線がショートしており有意なデータは得られなかった。データ を取得できた残りの3つのピクセルについては、どれも良質な超伝導転移特性を得ることができなかっ た。転移温度は3つとも200 mK を超えており、目標である~100-150 mK よりも高い結果とであった。 残留抵抗も~数 m-数十 mΩ であり、目標である~1 mΩ ではなかった。転移後も抵抗値が安定しない ピクセルも存在した。また、明確な基準はないが、常伝導抵抗が~数 Ω、転移幅が~数+ mK 以上で あり、高性能を記録している単素子(TMU193-4d の場合、常伝導抵抗:~300 mΩ, 転移幅:~10 mK) と比べると良くない結果であった。

第6章でも述べたが、転移温度を下げるためには、二層薄膜の膜厚の調整が必要である。これまでチーム内では Au/Ti=2 であると 100-150 mK 内で転移 することが分かっている。また、比が大きければ大きいほど転移温度が下がる傾向 にあることも分かっている。TMU 284 が Ti と Au の比が 2 と最適な 膜厚比にしていたが、転移温度は ~265 mΩ と、目標温度よりも大幅に高かったことを受け、TMU293 では Ti/Au=100/250 nm にして転移温度の改善を試みたが、目標には遠い結果となった。Ti が必要以 上に厚いために、膜厚の条件が意味をなさないと思われる。

#### 7.5.2 臨界電流

データを得られた3ピクセルのすべてが<10 μA であった。最低要求値である100μA には到底及ば ない結果であった。臨界電流がここまで低いと、TES にバイアスをかけるのが難しくなり、カロリメー タとして動作させることができなくなる。よって、臨界電流の改善は必須である。よって、転移温度が 低くなれば、ある程度は改善されると考えられる。しかし、TMU293 は素子の仕上がり自体が悪いの で、仕上がり良く加工できないと根本的な解決にはならない。

#### 7.5.3 エネルギー分解能

X線信号の取得には至らなかったので、エネルギー分解能を得ることはできなかった。FIB 観察によ り明らかになった二層薄膜中の Au の仕上がりが悪いことが、TMU293 のカロリメータとしての動作を 阻害している一番の原因だと思われる。そして、超伝導転移特性が良くないことの原因でもあると考え られる。よって、Au の仕上がりを改善する必要がある。

# 7.6 TMU294 の製作

20 × 20 = 400 pixel である TMU293 の性能に関して、多くの問題があることが分かった。製作条件 の見直しが必須であるが、その一方で転移温度が高いという点も考える必要がある。そこで、本項では 膜厚と転移温度の関係について、改めて触れてみたいと思う。過去の結果 [35] によると Ti の膜厚に対 する Au の膜厚をより厚くすることで、転移温度を低下させることができると分かっている。

第6章で扱かった TMU284 は二層薄膜の膜厚が Ti/Au = 100/200 nm で、転移温度= ~265 mK。 本章で扱ってきた TMU293 は Ti/Au = 100/250 nm で、転移温度= ~240 mK であった。そこで、Ti の膜厚は変えずに Au の膜厚を厚くして製作を行った。試作した新たな素子を TMU294 とした。確実 に上質な仕上がりにするために 20 × 20 基板は使用せずに、 8 × 8 基板を使用した。そして、膜厚は Ti/Au = 100/300 nm にして製作した。製作段階は転移温度が分かるようになる、二層薄膜のベタ膜を 形成した段階で止めてある。低温での性能評価を行ったので、R-T 曲線の結果を図 7.43 に示した。転移 温度= ~270 mK という結果である。

膜厚比を大きくしても転移温度の低下は見られなかった。これは、Ti が 100 nm と厚いことが原因で あると考えられる。つまり、Ti の厚みが大石卒論のときの結果(20-70 nm)の範囲外にあるということ である。

転移温度	常伝導抵抗	残留抵抗	転移幅
${\sim}267~{\rm mK}$	${\sim}48~{\rm m}\Omega$	${\sim}1{\rm m}\Omega$	${\sim}5~{\rm mK}$

表 7.9: TMU294 の超伝導転移特性(図 7.43 参照)



TMU294,284-120711/rt/plot-tmu294.com

図 7.43: TMU294 の R-T 曲線。転移温度= ~270 mK。

# 7.7 TMU313 の製作

20 × 20 = 400 pixel 基板を用いて、TMU313 を製作した。

#### 7.7.1 製作の意図と TMU293 との違い

X線信号の取得に成功した TMU284 と同じ製作条件で試作する。ピクセル数や基板サイズは異なる が、性能評価において超伝導転移特性の再現性を確認するためである。さらに、X線信号の取得も試み る。また、 TMU293 で問題となった配線の断線・ショートの原因を調査するために、製作プロセスの 各段階で SEM 観察を行う。以下の表 7.10 に各素子の製作条件を示す。ただし配線の幅に関して、ピク セル数が 4 × 4 の時は上部 w:20 nm /下部 w: 30 nm。20 × 20 の時は上部 w:10 nm /下部 w: 15 nm である。

条件	TMU313	TMU293	TMU284
ピクセル数	$20 \times 20$	$20 \times 20$	$4 \times 4$
使用基板	$\mathrm{MLR}\#7$	$\mathrm{MLR}\#8$	$\mathrm{MLR}\#7$
配線厚:上部/下部(nm)	50/100	50/100	50/100
二層薄膜:Ti/Au(nm)	100/200	100/250	100/200

表 7.10: 各素子の製作条件

### 7.7.2 二層薄膜成膜前の SEM 観察

まず、積層配線基板に二層薄膜を成膜する前の段階、つまり製作プロセスのスタート前段階で SEM 画像観察を行った。図 7.44 に観察結果の全体的なイメージを示す。図 7.45 に、それぞれの問題箇所の SEM 画像を示す。詳細は図 7.45 で述べる。



図 7.44: TMU313 二層薄膜成膜前の SEM 観察により判明した傷などのイメージ。水 色の数字は4隅のピクセル ID を表示して いる。

TMU313 二層薄膜成膜前の SEM 観察により判明した傷などの画像。画像中にある数字は、配線また はパッドと繋がるピクセル ID を示している。

赤色:引っ掻き傷がついている。20ピクセルに確認できた。青色:絶縁膜やパッドの剥離している。 3ピクセルに確認できた。黄色:その他傷やゴミ等が見られたところ。10 ピクセルに確認できた。

合計33ピクセル(約8%)に問題が見られた。これらは加工しても導通しなかったり正常な抵抗値 を示さない可能性がある。ただし、ゴミは二層薄膜性膜前の逆スパッタにより除去が可能かもしれない。 しかし、20×20=400 pixel の積層配線基板を加工する前に抵抗値を測定することは積層配線基板を 導入した時にも行われている[36]。この時は4つ測定され、歩留まりの結果は94-96%であった。この 点を考慮すると、移動中や実験中で基板を扱っている様々な場面で基板を損傷してしまっている可能性 が高いと言える。特に赤色で表示したところは引っ掻き傷であり、ピンセットによるものと思われる。 こうしたことから、20×20 基板は些細なことでも歩留まりに影響が出ると考え、慎重な扱いが求めら れる。



図 7.45: TMU313 加工前の配線基板の各領域の SEM 画像

### 7.7.3 二層薄膜成膜後の低温測定

次に、二層薄膜の成膜を行った。成膜後のTMU313の写真を図7.46に示す。きれいな仕上がりとなっている。ただし、この時点で配線に問題が起こることはほとんどない。配線に影響が出た時は、大抵プロセスの中で用いるエッチング液によるものだからである。また、低温測定の結果を表7.11と図7.47に示す。結果から、この時点では目立った問題点はない。しかし、転移温度が高い。

なお、臨界電流は>1 mA であった。二層薄膜のベタ膜の状態では、経験的に臨界電流はこの程度である。



図 7.46: TMU313 二層薄膜成膜後の写真。 きれいな仕上がりとなっている。

転移温度	常伝導抵抗	残留抵抗	転移幅
${\sim}254~\mathrm{mK}$	${\sim}95~{\rm m}\Omega$	$\sim 1 \mathrm{m}\Omega$	$\sim 4 \text{ mK}$

表 7.11: TMU313 二層薄膜成膜後の超伝導転移特性(図 7.47 参照)



図 7.47: TMU313 二層薄膜成膜後に行った低温測定 の結果。R-T 曲線。転移温度= ~254 mK 。

#### 7.7.4 二層薄膜パターニング後の低温測定

二層薄膜パターニング後の低温測定の結果を示す。測定対象としたピクセルは ID = 2001, 1012 である (室温下での抵抗値は 1368  $\Omega$ , 1852  $\Omega$ )。

まず、ID = 1012の結果を述べる(表 7.12, 図 7.48)。転移温度は ~210 mK、常伝導抵抗 ~2.9 Ω と、 残留抵抗 ~ 数 mΩ が大きい、転移幅が ~60 mK で広い、という結果になった。

転移温度	常伝導抵抗	残留抵抗	転移幅
${\sim}210~{\rm mK}$	${\sim}2.9~\Omega$	$\sim 数 \ m\Omega$	${\sim}60~{\rm mK}$

表 7.12: TMU313-1012 の超伝導転移特性(図 7.48 参照)

/home/y\_eno/TMU313,314,315-121130/rt/plot-tmu313-1012.com

図 7.48: TMU313 二層薄膜成膜パターニング後に行った低温 測定の結果。ID は 1012 。R-T 曲線。転移温度= ~210 mK。

また、臨界電流はいくつかの測定点で測定したところ  $3 < T_c < 10 \ \mu A$  であり(要求値は  $> 100 \ \mu A$ )、 非常に超伝導が破れやすい性質であることがわかる。各測定点の臨界電流を表 7.13 に示す。

測定点(mK)	臨界電流(μ A)
205(遷移端)	$1 \le T_c \le 3$
180	$3 \le T_c \le 10$
163	$3 < T_c < 10$
107	$3 < T_c < 10$

表 7.13: tmu313-1012 の臨界電流

次に、ID = 2001 の結果を述べる(表 7.14, 図 7.49)。転移温度は~190 mK、常伝導抵抗~5.6  $\Omega$ と、残留抵抗~数 m $\Omega$ が大きい、転移幅が~90 mK で広い、という結果になった。

転移温度	常伝導抵抗	残留抵抗	転移幅
$\sim 190 \text{ mK}$	$\sim 5.6 \ \Omega$	$\sim$ 数m $\Omega$	$\sim 90 \text{ mK}$

表 7.14: TMU313-2001 の超伝導転移特性(図 7.49 参照)

TMU-313-2001 20 Ohm / 20 uV (1 uA)-up Ohm 10<sup>4</sup> 20.0hm / 200 uV (10 úA)-dow Resistance (mΩ) 10 <sup>3</sup> 10 <sup>2</sup> 10 1 200 250 300 150 350 LTC Temperature (mK)

/home/y\_eno/TMU313,314,315-121130/rt/plot-tmu313-2001.com

図 7.49: TMU313 二層薄膜成膜パターニング後に行った低温 測定の結果。ID は 2001 。R-T 曲線。転移温度= ~190 mK。

また、臨界電流はいくつかの測定点で測定したが、超伝導転移後に常伝導状態に戻ったり、再度超伝 導状態に移行したりを繰り返したため、有意な結果は得られなかった。

#### 7.7.5 吸収体付け失敗

次の製作段階として Au 吸収体付けがある。パターニング後の低温測定をしたので、吸収体付けに取 りかかった。しかし、リフトオフの際に吸収体ごと取り除いてしまい、結果的に吸収体付けに失敗した。 素子にも見た目に汚れ等が増えた。

失敗した原因について述べる。吸収体付けが上手くできない原因だが、1つは、レジストよりも吸収 体の方が厚く蒸着されてしまった(不注意によるもの)可能性がある。もう1つは、蒸着終了後の冷却 時間が不十分で、取り出して急冷されたときに TES と吸収体の熱収縮率が違うためはがれてしまった 可能性である。今回の失敗は、どちらも起こってしまったために失敗したと考えられる。

## 7.7.6 吸収体付け失敗後の低温測定

吸収体付け失敗を受け、仕上がりに影響がないか、再度低温測定を行った。測定対象としたピクセルは ID = 0516,1011 である(室温下での抵抗値は 1635  $\Omega$ ,1665  $\Omega$ )。図 7.50,7.51 参照。



図 7.50: TMU313 吸収体付け失敗後に行った低温 測定の結果。ID は 0516 。R-T 曲線。転移温度= ~235 mK。



図 7.51: TMU313 吸収体付け失敗後に行った低温 測定の結果。ID は 1011 。R-T 曲線。転移温度= ~150 mK。

## 7.8 本章のまとめと今後

TMU293, TMU294, TMU313 の結果から、積層配線基板を用いた製作プロセスにおいて、以下の課 題が判明した。

- 二層薄膜中の Au の仕上がりを改善する必要がある。
- 二層薄膜の膜厚は上部配線よりも厚くないと配線の段差を乗り越えられず、超伝導転移特性が悪化してしまう。
- Tiの膜厚を薄くしなければ、転移温度は改善しない。
- 上部配線を極限まで薄く(50 nm)した結果、プロセス完了後の歩留まりが悪い。

上述の課題を解決するために、開発グループ内で以下の3つの製造プロセス改善案が検討されている。 [19] なお、番号はそのまま改善案の有力順になっている。

- 1. CMP(Chemical Mechanical Polishing:化学機械研磨)による平滑化
- 2. 上部配線リフトオフ
- 3. プロセス順を変更

各改善案のプロセス変更点を述べる。

- CMP による平滑化について述べる。半導体製造プロセスにおいて、加工対象物の表面平滑化、平 坦化を行える研磨技術である CMP をプロセスに加える改善案の1つ目である。CMP 研磨は産業 総合研究所にお願いする予定である。平坦度は < ~10 nm である。変更は、「まず、セイコー株 式会社に製造を依頼している積層配線基板の上部配線の膜厚を、現在の 50 nm から 200-300 nm に厚くする(これにより、コンタクトホールの保護とコンタクト向上を担っている Nb は不要に なる可能性がある。)。次に、SiO<sub>2</sub> を厚さ 500 nm 成膜し、CMP 研磨を行って上部配線のところ に平滑化する。そして、二層薄膜を単素子で最適とされたレベルの Ti の膜厚= 30-40 nm で成膜 する。」である。この利点は、二層薄膜、配線のどちらも既に確立している最適条件で製作が可能 であることである。一方、不安要素は、CMP 研磨による Al 配線への影響である(産総研では影 響が出た経験がある)。
- 上部配線リフトオフについて述べる。現状では、上部配線は混酸アルミエッチング(ガラスやシリコンを侵すことなく微細加工が可能なエッチング方法)で形成しているが、リフトオフプロセス(エッチングプロセス無しのプロセス。レジストで作ったパターンに金属を蒸着して、後にレジスト除去する方法)により形成するようにする改善案である。変更点は、「上部配線をリフトオフプロセスで形成する方法に変更する。」である。利点は、リフトオフプロセスではレジストを滑らかにすることができることである。これを利用して、二層薄膜とコンタクトをとる近傍の配線を滑らかに形成することで段差をなくし、段切れ問題を無視できる。これにより多少、上部配線を厚く、二層薄膜を薄くする余裕ができる可能性がある。総プロセス数が増えないという利点もある。一方、不安要素は、リフトオフのレジストを用いてテーパー(角度)を付けた実績がないことである。つまり、実現可能な滑らかさの多様性が少ないかもしれない。また、上部配線と二層薄膜の膜厚改善は、超伝導転移特性や性能の改善に繋がるレベルではないかもしれない。
- プロセス順を変更について述べる。これは、製作手順の中で順番を入れ替える改善案である。変 更点は、「下部配線を形成した後に上部配線の形成ではなくダイシングカットを行い、先に二層薄

膜のパターニングを行う。次に上部配線の形成を行う。後は従来通り。」である。利点は、段切れ 問題を無視できるので、配線、二層薄膜共に膜厚に時自由度が生まれる点である。また、GSFC (Goddard Space Flight Center:ゴダード宇宙飛行センター)で実績がある。一方、不安要素は、 上部配線形成プロセス時に二層薄膜に影響(膜付け、エッチング、温度、超音波洗浄)が出る可能 性がある。そして、ピクセル回りの配線這い回し(配線を敷くデザイン)を再検討する必要がある ことである。そして、プロセス全体を見直す必要があるため、上部配線形成を二層薄膜パターニ ング後にしたことによる素子性能の劣化の恐れがある。

改善案の1つ目からまずは順番に試していく予定である。また、2つ目の案は、2月に産総研で試作 が可能な態勢である。ただし、セイコー株式会社に製作を依頼しているプロセスにも変更点があるため、 こちらは技術検討をお願いしている段階である。3つめの案は、1つ目と2つ目の結果を判断してから 実行する予定である。

# 付録A: TES データ解析の自動化に向けた、カットオフ周波数の最適化

これまで、TES のデータ解析はデータの選別をはじめとして手動で行われてきた。こうした作業は時 間がかかるものである。そこで現在、データ解析の効率化のため、データ取得後の自動解析の環境構築 が進められている。

今回、自動化の対象としたのはカットオフ周波数の最適化である。カットオフ周波数とは、周波数空間におけるハニングフィルタが0になる周波数のことである。雑音を含む入力信号に対する SN 比を最大にするフィルタである整合フィルタを生成する時に使用する。

開発されたカットオフ周波数を自動で最適化するソフトを用いて、単層配線で最高性能を出している 素子 TMU146 のデータ解析を行った。まず、オフセット vs. 波高値のフィットの結果を示す(図7.52)。 右図が、左図をもとにフィットした結果である。左図の枠内からヒストグラムを作成し、Mn-Kαをフィッ トしている。そして、0.5 eV のエラーを込みにして直線フィットを行っている。



図 7.52: オフセット vs. 波高値のフィット自動化。右図が、左図をもとにフィットした結果。

次に、カットオフ vs. エネルギー分解能の結果を示す(図 7.53)。青:雑音等価電力:NEP から予 想されるエネルギー分解能で、赤:取得データから得られたエネルギー分解能である。Frequeancy ¿ 2 kHz で NEP の予測からずれている理由は、実験データの統計が十分であることを考えると、波形に場 所依存等の個性があるためと考えられる。



図 7.53: オフセット vs. エネルギー分解能。青:雑 音等価電力:NEP から予想されるエネルギー分解 能。赤:取得データから得られたエネルギー分解能。

これによりエネルギー分解能@1950 Hz を導出した結果を図7.54 に示す。最高性能を出した時の結果 (2.8 eV @ 2000 Hz)を比較して遜色無いエネルギー分解能が得られた。よって、自動化が正常に機能 していると言える。



図 7.54: 得られたエネルギー分解能@ 1950 Hz。

# 関連図書

- [1] K. D. Irwin and G. C. Hilton, 2005 Topics in Appl. Phys. 99, 63
- [2] K.D.Irwin, Ph. D thesis, Stanford Univ. (1995)
- [3] K.D.Irwin and S.W.Nam and B.Cabrera and B.Chugg and G.S.Park and R.P.Welty and J.M.Martinis, IEEE. Trans. Appl. Supercond., vol. 5, p2690 (1995)
- [4] K.D.Irwin, Appl.Phys.Lett., vol. 66, p1998 (1995)
- [5] E.Figueroa-Feliciano et al., 2012 SPIE 8443, 84431B
- [6] S.H.Moseley and J.C.Mather and D.McCammon, J. Appl. Phys., vol. 56, P1257 (1984)
- [7] G.Hölzer and M.Fritsch and M.Deutsch and J.Härtwig and E.Förster, Phys. Rev. A., vol. 56, 6, p4554 (1997)
- [8] S. R. Bandler, C. Enss, R. E. Lanou, H. J. Maris, T. More, F. S. Porter, G. M. Seidel, Journal of Low temperature Physics, vol. 93, p. 709 (1993)
- J.N.Ullom, J.A.Beall, W.B.Doriese, W.D.Duncan, L.Ferreira, G.C.Hilton, K.D.Irwin, G.C.O'Neil, C.D.Reintsema, L.R.Vale, B.L.Zink, NIM A, 559 (2006), 422-425
- [10] Y. Ishisaki et al., 2007, LTD12
- [11] T. Ohashi et al., 2010 SPIE J. 7732, 77321S
- [12] H. Akamatsu et al., 2009 AIP Conf. Proc. 1185, 195
- [13] Y. Ezoe et al., 2009 AIP Conf. Proc.1185, 60
- [14] Fleischmann, L. et al., 2009, J. P. Conf., 150
- [15] Kelley, R. L. et al., 2007, PASJ, 59, 77
- [16] Y. Takai, 2011-05-17 HIMAC における TES および SQUID の放射線試験 v0.1, report, 2011/06/10
- [17] H. Akamatu et al., TMU193-4d 放射化試験後の性能評価試験, report, 2012/09/27
- [18] K. Sakai, SQUID Co60 照射, report, 2012/03/14
- [19] Y. Ezoe, 積層配線 20 × 20 TES プロセス改善の提案, report, 2012/12/15
- [20] S. Yamada, TES の現象論的2流体モデルと TMU 146-4d との比較, report, 2012/12/30
- [21] S. Yamada, TES データ解析の自動化に向けて (1) カットオフ周波数の最適化, report, 2012/04/13
- [22] 前神 佳奈, Ti 薄膜を用いた X 線マイクロカロリメータの開発研究, 東京大学 (1999)

- [23] 大島 泰, TES X 線マイクロカロリメータと SQUID アンプ読み出し系, 東京大学 (2000)
- [24] 影井 智宏, Ti-Au 薄膜を用いたマイクロカロリメータによる X 線検出, 東京都立大学 (2001)
- [25] 広池 哲平, Ti/Au 二層薄膜を用いた TES-ETF X 線マイクロカロリメータの研究開発, 東京都立大学 (2002)
- [26] 森田 ウメ代, TES 型 X 線マイクロカロリメータの応答特性の研究, 東京都立大学 (2003)
- [27] 竹井 洋, 超伝導遷移端 (TES 型)X 線マイクロカロリメータの熱的、電気的応答とノイズ原因の物理 的考察, 東京大学 (2003)
- [28] 吉田 清典, ビスマス吸収体を用いた TES 型 X 線マイクロカロリメータの製作と性能評価, 東京大学 (2005)
- [29] 吉野 友嵩, ビスマス吸収体を用いた TES 型 X 線マイクロカロリメータの製作と性能評価, 東京大学 (2006)
- [30] 藤森 玉行, TES 型 X 線マイクロカロリメータの製作プロセスの構築, 東京都立大学 (2006)
- [31] 山川 善之, TES 型マイクロカロリメータの X 線、 γ線に対する応答特性の研究, 東京都立大学 (2006)
- [32] 倉林 元, TES 型X線マイクロカロリメータの磁場に対する応答特性と自作素子の性能向上を目指 した研究, 首都大学東京 (2007)
- [33] 赤松 弘規, TES 型X線マイクロカロリメータの性能向上を目指した性能評価とノイズ抑制の研究, 首都大学東京 (2009)
- [34] 吉武 宏, TES 型X線マイクロカロリメータのアレイ化と分光性能向上に関する研究, 東京大学 (2009)
- [35] 大石 詩穂子, TES 型X線マイクロカロリメータの製作における再現性の確立, 首都大学東京 (2010)
- [36] 大石 詩穂子, 超伝導積層配線を用いた TES 型X線マイクロカロリメータの製作プロセスの開発, 首都大学東京 (2012)
- [37] 酒井 和広, X線マイクロカロリメータ大規模アレイ実現に向けた SQUID および信号処理系の開発, 東京大学 (2012)
- [38] 国立天文台 編, 「理科年表」, 丸善 (2001)
- [39] 木村 逸郎・阪井 英次 訳 (Glenn F. Knoll), 「放射線計測ハンドブック」, 日刊工業新聞社 (1991)
- [40] 小林 俊一 訳 (M.Tinkham), 「超伝導現象」, 産業図書 (1981)
- [41] 宇野津 清・津屋 昇・森田 章・山下 次郎 共訳 (Charles Kittel), 「固体物理学入門 上、下」, 丸善 (1988)
- [42] 田沼 静一, 「低温」, 共立出版 (1988)
- [43] 草野英二,「はじめての薄膜作製技術」,工業調査会 (2006)

# 謝辞

本論文は、多くの方々のご指導、ご協力のもとに成り立っていることをこの場を借りて断っておきます。 大橋教授には宇宙物理学のことをはじめとして、学会発表の練習や資料の校正、私たち理系の人間が 社会とどう関わっていくべきか、自身の研究が意義のあるものだと周囲に伝えていく方法など、様々な 事を教えていただきました。実験中では、度々様子を見に来て下さりました。実験の経過を聞くだけで なく、何か問題があると一緒に解決策を考えて下さりました。とても嬉しく思っておりました。先生は 研究者としても、社会人としても、すばらしい考えをお持ちで、今後、理系の人間として社会で生きて いく私にとって、理想の姿であると思いました。そんな先生と接する機会をもてたことを、誇りに思い ます。また、いつまでたっても半人前の私を暖かく見守って下さいました。私が修士論文を完成するこ とができたのは、大橋教授の研究室以外では考えられません。本当にありがとうございました。

石崎准教授には実験のあれこれと、研究に対する姿勢を教えていただきました。私が未熟者の時には、 進め方を教えて下さりました。また、実験をまかされるようになってからも、何か問題が起こると電話 で連絡をとったことが度々ありました。突然の電話にも関わらず、私をしかることもなく適切なアドバ イスをして下さり、とても助かりました。時には現場まで駆けつけて下さりました。実験の現状を素早 く、そして適切に見極める思考や、物事を合理的に判断する姿勢に、実験をする者とはこうあるべきだ と実感させられました。希釈冷凍機を用いた実験は、根性と辛抱が必要な泥臭いテーマでしたが、そう した中でも思考力と合理性を保って実験するように努めた経験は、私の財産となりました。諦めること なく、このテーマをやり通したことを誇りに思います。今後、どんな困難があろうとも実験のことを思 い出して、やり遂げていきたいと思います。本当にありがとうございました。

江副助教には、コミュニティ内の若い世代が周囲に認められるためにはどうあるべきかを、その背中 から学ばせていただきました。様々な場面で一挙手一投足に注目しておりました。また、オンとオフの 切り替え等、その他の些細なことも学ぶことがありました。先生と研究であまり関わりを持てなかった ことを残念に思います。もし実現していたのであれば、もっと多くのことを学ぶことができたと思って おります。ただ、製作関連の質問では初歩的な質問にも嫌な顔一つせず親身になって下さり、大変感謝 しております。一方で、日々の雑談では真面目な内容から冗談めいた内容の話まで、幅広い会話をさせ て頂きました。本当にありがとうございました。

秘書の川上さんには旅費・書類手続きで色々とお世話になりました。

ポスドクの河原さん(現、東大助教)には、嘘をつかないその言動に、自分の気付かなかった未熟さ を教えられました。私自身もあまり嘘をつかないタイプでしたので、河原さんとの会話はとても楽しい 時間でした。頭の片隅でも良いので、私のことを覚えていて下さい。

客員研究員の山田さん(理研ポスドク)には、データ解析や実験で大変お世話になりました。解析が 苦手な私に、何度も根気強くご指導して下さりありがとうございました。また、実験では、私が就職活 動等で実験できない期間に、進めて下さり大変助かりました。そして、研究室配属された4年生から2 年間、基本的に1人で実験をしていた時期は心細くやっていましたが、去年に山田さんが来てくれたこ とで2人で実験することになり、ああ、研究ってのはやっぱりこうだよな。と思えるくらい楽しい時間 を過ごせました。問題が起こっても議論しながら解決していくのも、楽しくもあり山田さんのすごさを 感じる場面でした。また、本修士論文を書き上げるにあたって、言葉では言い表せない程のご指導・ご 協力をして頂きました。書き方、構成から始まり、修論の意義やその他細かなことに至るまで多くを教 えていただきました。お忙しい身であるにもかかわらず、親身に向き合って下さり、本当にありがとう ございました。

赤松さん(現、SRON ポスドク)には、結果が出るまでやり通す根性を学びました。毎日朝から夜遅 くまで研究に打ち込んでいる姿勢を見て、感服しまておりました。このように自分を追い込める人が研 究者となるのだと強く感じました。また、しょうもない私を見捨てることなく、厳しさを持って指導し て下さりました。その甲斐あってか、希釈冷凍機の実験生活にめげることなくいられました。赤松さん の研究姿勢を思い出すと、自分はまだまだだという思いが出てきて、頑張ることができました。一方で、 実験が夜遅くになった時は焼き肉に連れて行って下さりました。その日は、たとえ翌日も朝から実験の 続きだったとしても、頑張ろうと思えました。本当にありがとうございました。

ポスドクの三石さんには、主にご飯の席でお世話になりました。昼、夕のどちらも頻繁に御一緒しま した。2人で食べる時も少なくなく、そうした時にする会話はとても楽しいものでした。特に、修論の 提出時期が近づくと車で近隣の希望した店に連れて行って下さり、辛い時は美味い飯を食う、というこ とを身をもって教わりました。また、雑談のときもそうでしたが、よく漫画の話題で盛り上がりました。 このマイナーな漫画は知らないだろうと思い教えると、殆どを知っていました。さすがだと思いました。

林さんには、学会発表等の練習でお世話になりました。違う研究チームなのに、親身に練習につきあっ て下さりありがとうございました。また、時々 XRT チームの飲み会に誘って下さい。待っています。佐 藤さんには、喫煙所でお世話になりました。研究室内の数少ない喫煙者仲間として、煙草を吸いながら 様々な話をしましたね。吸ってる姿が渋くてかっこ良かったです。石川さんには、色々なあだ名やレッ テルを付けられました。不思議なキャラにしてくれてありがとうございました。自分でも結構楽しんで ました。

阿部さん、石津さん、塩野目さん、辺見さんにもお世話になりました。特に阿部さんには、実験のい ろはを教えていただきとても感謝しております。今こうして卒業を迎えられるのは、阿部さんの存在無 しには成し得ませんでした。本当にありがとうございました。皆さん、お仕事頑張って下さい。

大石さん、榎さん、森山さんにもお世話になりました。大石さんには、他人を巻き込んで自分の仕事 をしていく方法を学びました。私の予定にかまうことなく試作品の測定をどんどん要求してきたにもか かわらず、説得を受けるうちに何とかなると思わされました。今後、自分がそのような立場になったら 参考にしたいと思います。榎さんには、実験において液体へリウム転送をはじめとした2人掛かりで行 う作業を頻繁に手伝っていただきました。榎さんが修論を書く時期でも、私の無茶な要求に応えて下さ り大変感謝しておりました。この場を借りてお礼を言わせて下さい。本当にありがとうございました。 森山さん、結局森山さんのアパートでワインを飲むことは叶いませんでした。行きたかったです。

同期の市原君、小川君にもお世話になりました。実験室がバラバラで、月に一度程度しか会わず、さらに飲み会くらいしかまともに会話する機会がありませんでした。しかしその飲み会では個性の強い2人といるのがとても楽しかったです。小川君は博士後期課程へ進学ですね。就職するよりも大変な、イバラの道かと思われます。いっそう頑張って下さい。市原君は一緒に新社会人になりますね。とりあえず、入社後三年は離職しないようにお互い頑張りましょう。どうしようもない時は Skype でもして、顔をくしゃくしゃにしながら愚痴を言い合いましょう。

後輩の鳥羽さん、飯島さんにも世話になりました。2人とも私の初歩的なものも含めて製作関連の様々 な質問にまじめに考えて答えてくれて嬉しく思っていました。中には忙しいのにとか、くだらねー、と か思ったのもあったと思うけど、嫌な顔一つせずにいてくれて助かりました。

宇宙研の満田教授、山崎准教授、竹井助教をはじめ、満田・山崎研の皆様にも研究でお世話になりま した。特に竹井助教には放射線耐性試験の研究でお世話になりました。また、同期の永吉君、山本君、 二人は小川君と同様に進学ですね。2人がカロリチームに来て以来の付き合いですが、会う度に知識が 深まっていくのをすごいなと思っていました。そんな2人なら、すばらしい研究者になれると信じてい ます。頑張って下さい。

金沢大の藤本准教授をはじめ、藤本研の皆様にもお世話になりました。特に同期の國久君は大分で開 催された天文学会では、空き時間を使って一緒に旅行に行きましたね。最終学年の思い出の中でも上位 に入る程楽しかったです。また機会があったら、あんな小旅行をしたいですね。私と入れ替わりで来年 度から八王子に来ますが、とてもいいところです。八王子ライフを満喫して下さい。

企業の方々にも大変お世話になりました。特に SIINT の田中さん、SII の師岡さんには積層配線の開 発関連でお世話になりました。素子の断面観察、元素分析では無理なお願いにも関わらず、詳細なデー タの取得をして下さり、とても参考になりました。本当にありがとうございました。

最後に、これまで支えてきてくれた家族、友人に心から感謝したいと思います。 皆様、本当にありがとうございました。