## 修士論文

## TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイの 実用化に向けた低温フロントエンド部の開発

Development of cryogenic front-end of TES X-ray microcalorimeter array for practical realization

> 東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系 山崎研究室

> > 千葉 旭

平成27年1月

## Abstract

X 線マイクロカロリメータは X 線光子のエネルギーを素子の温度上昇から求める検出器であり、~ 100 mK という極低温で動作させることで高いエネルギー分解能を達成することができる。その温度計として超伝導遷移端温度計 (TES: Transition Edge Sensor)を用いた TES 型 X 線マイクロカロリメータ (TES カロリメータ)の開発を我々の 研究グループは行ってきた。TES カロリメータのアレイ化によって、未だかつてない精密分光と撮像の両立が可能と なり、将来 X 線天文衛星への搭載が予定されている。2020年代初頭の打ち上げを目指す DIOS 衛星では 256 ピク セル 程度、2028年頃打ち上げ予定の Athena 衛星では 1 桁アレイ数を増やし 4000 ピクセル 程度の搭載が見込まれ ている。

その分光性能の高さから天文学以外の分野でも TES カロリメータへの期待は高い。材料やバイオテクノロジー の分野ではエネルギー分散型分光に TES カロリメータを応用する開発が進められている。我々は TES カロリメー タアレイの地上応用と位置づけ、走査透過型電子顕微鏡 (STEM: Scanning Transmission Electron Microscope) に TES カロリメータアレイを搭載する STEM-TES システム開発を行っている。本開発では、エネルギー分解能 10 eV (FWHM) 以下と計数率 5 kcps を達成するために TES カロリメータ 64 ピクセルをアレイ化し、スノートと呼ば れるプローブの先端部にマウントして X 線を受光させる。

TES カロリメータはアレイ数を増やすことで単ピクセルの場合にはなかった課題が多く生じる。特に 100 mK 近 くに冷却される低温フロントエンド部では顕著である。例えば TES カロリメータの読み出しには SQUID 電流計を 負のフィードバックで用いる必要があるために、1 ピクセルを独立に読み出すために極低温ステージと室温回路を結 ぶ配線が 8 本必要となる。したがって、64 ピクセルを独立に読み出すには 500 本以上の配線が必要となる。配線の 本数は極低温ステージでの引き回しや室温からの熱流入、電極間接続のためのボンディングの回数といった観点から 可能な限り削減する必要がある。

本研究では STEM-TES システムにおける低温フロントエンド部の開発を行った。システムにおける低温フロン トエンド部の課題とその解決方法について提案し、それらの実証実験を行った。

まず、低温と室温を結ぶ配線本数を削減するために、TES カロリメータと SQUID の各バイアス電流を共通化さ せる読み出し方法について提案した。その上で、STEM-TES システムで SQUID に求められる性能について議論し た。そして TES 8 ピクセル、SQUID 8 アレイの各バイアス電流を共通化させるバイアス電流共通型 SQUID チップ について設計を行った。製作後の SQUID を液体へリウム温度で評価し、要求値を満たす SQUID であることを確か めた。これにより、TES 各ピクセルを独立に読み出す場合と比較して配線本数を 40% 削減する目処が立った。

次に、スノート上での電極間接続に必要なボンディングについて検討した。従来行ってきた手動によるワイヤボン ディング方式であると作業負荷や接続保証の観点から懸念があった。そこでフリップチップ実装方式を提案した。フ リップチップ実装の極低温における実証のために、超伝導配線と SQUID チップ、フリップチップ実装を行った試作 品スノートの冷却試験を行った。冷却過程において 1 箇所の断線が確認されたものの、これは接着方式の改良によっ て解決できると考えられる。接続が保持された配線では SQUID の読み出しに 4 K、極低温で成功し、フリップチッ プ実装の実証に成功したと言える。

一方で、スノート冷却試験で使用した Pb 磁気シールドでは磁気遮蔽が不十分であり、スノート冷却の際に使用す る磁気シールドの製作を行う必要が生じた。この磁気シールドの設計を、STEM-TES システムのモデルケースとし て位置づけて行うこととした。設計に先立ち、TES と SQUID の動作に十分な磁気遮蔽を達成する寸法にする必要 があるため、有限要素法による磁場解析の結果と、実験セットアップの双方の観点から設計の最適化を行った。製作 後の磁気シールドを室温にて評価した結果、TES と SQUID の動作に問題がない磁場であることを確かめた。

TES と SQUID の各バイアス電流を共通化させる読み出し方法の実証と、その課題点を洗い出すことを目的とし て、開発したバイアス電流共通型 SQUID チップを用いて TES 7 ピクセルの X 線照射実験を行った。結果、全 7 ピ クセルで X 線パルスの取得に成功したものの、エネルギー分解能はいずれのピクセルでも 20 eV (FWHM) 以上で あった。STEM-TES システムの要求値を達成できていないため、エネルギー分解能の向上を今後の課題としたい。 ii

照射実験では TES パルスに対して 10 % 程度 (peak to peak 値) のクロストークが確認された。このクロストー クについて追実験を行った結果、クロストークの振幅は SQUID に入力される磁束量と関連があり、さらに、磁束が SQUID に入力されたことによる SQUID バイアス電流の変化に起因するものであるという予測と矛盾しない結果で あった。SPICE シミュレーションを行った結果、クロストークは SQUID バイアス電流ラインにおけるインピーダ ンスに強く依存することを示した。追実験とシミュレーションから、クロストークの低減のためには、SQUID バイ アス回路をより理想的な定電流回路にし、また FLL 回路のループゲインを増大することが手段として挙げられるこ とを示した。それを満たす STEM-TES システムで用いる回路を現在製作中であり、照射実験でクロストークの低減 を実証することは今後の課題である。

# 目 次

第1章	序論	1
1.1	X 線天文学における精密分光の重要性	1
	1.1.1 天文衛星搭載 X 線検出器	1
	1.1.2 DIOS ミッション	2
	1.1.3 X 線マイクロカロリメータによる精密分光	4
1.2	極微細組成解析	4
	1.2.1 エネルギー分散型分光 (EDS: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)	5
	1.2.2 TES カロリメータの EDS への応用	5
1.3	本修士論文の目的....................................	6
第2章	TES 型 X 線マイクロカロリメータの原理	9
2.1	X 線マイクロカロリメータの原理	9
	2.1.1 吸収体	10
	2.1.2 温度計	11
2.2	超伝導遷移端温度計 (TES: Transition Edge Sensor)	11
2.3	電熱フィードバック (ETF: Electro Thermal Feedback)	11
	2.3.1 電熱フィードバックのもとでの温度変化に対する応答	12
	2.3.2 電熱フィードバックの一般論と電流応答性	14
2.4	固有ノイズ	17
2.5	最適フィルタ処理とエネルギー分解能	20
第3章	SQUID 電流計を用いた読み出し	23
3.1	dc SQUID の動作原理	23
	3.1.1 原理と等価回路	23
	3.1.2 dc SQUID のノイズ	25
	3.1.3 電流計としての使用	25
3.2	磁東固定ループ (FLL: Flux Locked Loop)	26
3.3	グラジオメータ	28
3.4	SQUID アレイ	28
第4章	低温フロントエンド部の開発	31
4.1	走查透過型電子顕微鏡 (STEM: Scanning Transmission Electron Telescope)	31
4.2	低温フロントエンド部の課題....................................	31
4.3	本修士論文の研究内容	36
第5章	バイアス共通化による読み出し	39
5.1	目的	39
5.2	バイアス共通化	39
	5.2.1 TES のバイアス共通化	39

	٠
1	1
1	

	5.2.2 SQUID のバイアス共通化	42
5.3	バイアス共通型 SQUID の設計	45
	5.3.1 設計目標	46
	5.3.2 STD3 による SQUID 製作プロセス	48
	5.3.3 基板設計	48
5.4	SQUID アレイの評価	49
	5.4.1 測定方法	49
	5.4.2 測定結果	51
	5.4.3 クロストーク測定	55
5.5	まとめ	57
0.0		0.
第6章	極低温実装	<b>5</b> 9
6.1	目的	59
6.2	試作したスノートの概要	59
6.3	冷却セットアップ...................................	61
6.4	冷却試験結果	63
	6.4.1 4 K での確認	63
	6.4.2 極低温での確認	64
6.5	見つかった問題の検証....................................	66
6.6	まとめ	68
Anto		
第7草	磁気シールドの設計	71
7.1	目的	71
7.2	$Amumetal 4K (A4K) \dots \dots$	71
7.3	有限要素法による磁場解析	72
	7.3.1 背景と目的	72
	7.3.2 解析セットアップ	72
	7.3.3 解析結果	75
7.4	設計	78
7.5	性能評価	79
7.6	まとめ	82
箆ջ音	TES カロリメータの基本特性	85
<b>8</b> 1		85
8.2	1107 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	85
8.2 8.3	四人 」 「 」 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	87
0.0	(2) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	87
	8.9.1 (Chilles カロリア )	01
	0.5.2 反用した SQUID	00
	0.3.3 (以血ヘ) ーン	00
0 1	0.9.4 王皿矶の山し凹町 COUD の動作確認	90
8.4 0 F		90
8.5	$\Pi = I$ 例此	92
8.6	1 - V 側足	93
8.7	ハル人側走	94
8.8	クロストーク測定	96
8.9	考祭	97

第9章	バイアス共通読み出しでの X 線照射実験	

9.1 I	目的
9.2	セットアップ
Q	9.2.1 使用した TES と SQUID 99
Q	9.2.2 低温ステージ
Q	9.2.3 室温読み出し系
9.3	SQUID の動作確認
9.4 i	R-T 測定
9.5 İ	$I - V$ 測定 $\dots \dots
9.6	パルス測定
ę	9.6.1 100 mK での結果
ę	9.6.2 150 mK での結果
9	9.6.3 175 mK での結果
9.7	クロストーク測定
9.8	考察
9.9	まとめ

#### 第10章 クロストークの追求

10.	1 クロストークの発生モデル
10.	2 クロストークの再現実験
	10.2.1 目的とセットアップ
	10.2.2 実験結果
10.	3 クロストークの低減実証実験
	10.3.1 目的とセットアップ
	10.3.2 実験結果
10.	4 SPICE シミュレーションによる検証
10.	5 まとめと考察
<b>ATT</b>	
第11	草 まとのと今後 133
11.	1 バイアス電流共通型 SQUID の開発
11.	2 極低温実装
11.	3 磁気シールド
11.	4 バイアス電流共通化の実証とクロストークの追求135
付録	A 負のフィードバックとループゲイン 137
μ. Α	137 1 ループゲイン 137
付録	B 使用した冷凍機 139
В.	1 希釈冷凍機
В.:	2 液体ヘリウムデュワー
付録	C 使用した室温読み出し回路 1/1
ا ب <del>ر</del> ید در ا	С (Клонстания) но цин (141)   Magnicon XXF 1 (141)
0.	i Magnicon AAI-1
U.,	4 マルナナア イル彫刻凹町

**99** 

## 第1章 序論

## 1.1 X 線天文学における精密分光の重要性

宇宙の姿を明らかにするために、人類は多くの波長で観測を行ってきた。最も歴史が古いのは可視光観測である。 光学望遠鏡が発展するまでは、先人達は自らの目のみによって天体の明るさや運動を調べていた。近代では検出器の 進化や飛翔体の登場によって人類が見ることが可能な宇宙のスケールはさらに広がり、かつ精密に観測することが可 能となった。現在では太陽系といった近傍宇宙から、誕生間もない遥か遠くの宇宙まで見ることができる。ガンマ線 から電波に至るまで広い波長範囲での観測が可能になり、その波長ごとに見える宇宙像は異なる。

X線で見える宇宙はどんな姿だろうか?その起源は、高エネルギー電子によるシンクロトロン放射や逆コンプトン 散乱、高温物質からの熱制動放射や黒体放射といった現象である。X線の観測によって、高エネルギー現象を解明す ることが可能となり、宇宙のダイナミクスや化学進化を知る上では非常に重要な光である。

例えば高密度天体であるブラックホールは、その近傍空間をゆっくりと落ちこんでいった物質が降着円盤となって 回転している。この降着円盤は広い波長域で輝くが、波長の大きい (エネルギーの小さい) 範囲では透過力が弱いため に周辺物質によって吸収を受け、観測できる部分は限られる。X 線は透過力が強いために、吸収を受けずに観測が可 能となる。さらに、降着円盤の最内縁部は最も高温となって X 線で明るく輝くため、物質が落ち込む寸前の姿を X 線で捉えることが可能となる。また、高温ガスのを X 線によって観測が可能である。X 線領域である 0.1 ~ 10 keV の間には炭素や窒素、酸素、シリコン、カルシウム、鉄等の宇宙に存在する主要な重元素の K 輝線、K 吸収端が存 在するためである。これら重元素の量や物理状態を X 線観測によって明らかにすることは、宇宙の化学進化の解明 に有効である。

元素の特定やその電離状態、温度や速度といった物理状態を把握するために分光観測が用いられる。観測された X 線光子のエネルギーおよび観測された光子のカウント数からエネルギースペクトルを取得する。X 線は地球大気に よって吸収されるために、分光観測を行うためには X 線に感度の有る検出器を飛翔体に搭載し、観測を行う。検出 器の性能の一つにエネルギー分解能 ΔE がある。これはエネルギースペクトルにおけるピークの幅で定義されるも のである。エネルギー分解能が小さいほど隣接したピーク同士の分離が可能となり、元素の特定が容易になる。また ドップラーシフトによるピークの広がりを精密に測定することが可能となり、元素の運動状態を詳細に調べることが 可能となる。

#### 1.1.1 天文衛星搭載 X 線検出器

ここでは X 線天文衛星に搭載される検出器について述べる。代表的な検出器として、X 線 CCD カメラと回折格 子について述べる。

#### X線 CCD カメラ

1969 年に Bell 研究所で誕生した CCD は 1980 年代にはその感度と応答を背景に天文応用にも急速に普及し、X 線 天文学の分野においても 1987 年の観測ロケットを皮切りにm今日では主力検出器として認知されている [19]。CCD (Charged Coupled Devices) は個々のピクセルが半導体基板となっている。X 線の入射によって、電子 – ホールペア が生じ、電子をバケツリレー方式によって隣のピクセルへと次々に転送されることで信号を読み出す。エネルギー E によって生じる電子の個数 N<sub>e</sub> は

$$N_e = E/\omega \tag{1.1}$$

で与えられる。ここで  $\omega$  は電子 – ホールペアを作り出すために必要なエネルギーであり、典型的には 3.7 eV であ る。5.9 keV の MnK $\alpha$  X 線に対しては 1600 個あまりのペアが作られる事がわかる。これら電子は電子雲となって広 がり、印加電圧によてドリフトする。エネルギー分解能は、生じた電子の揺らぎ  $\sigma_e$  によって原理的に決まる。Fano Factor F を用いて  $\sigma_e = FN_e$  と表され、エネルギー分解能は FWHM で

$$\Delta E_{\rm FWHM} = 2.35 \ \omega \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_{\rm read}^2} \tag{1.2}$$

となる。ここでシリコンの場合、F = 0.12 である。 $\sigma_{read}$  は読み出し系のノイズである。読み出し系のノイズを無視した時、5.9 keV の X 線では 式 (1.2) より原理的なエネルギー分解能は 120 eV 程度となる。

CCD はすざくの XIS、Chandra の ACIS、XMM-Newton の EPIC 等に搭載されている。エネルギー分解能の面では優れていないものの、広い視野と 10<sup>6</sup> ピクセルの画素数によって、広域の画像診断を可能にしている。

#### 回折格子

回折格子は波長ごとに光をわける分散型分光器であり、X 線の波長域で数 eV のエネルギー分解能を達成することができる。X 線天文衛星では Chandra 衛星に透過型回折格子 LETG、HETG が搭載され、XMM–Nnewton 衛星では反射回折格子 RGS が搭載されている。これらが 1 keV 以下のエネルギーで  $E/\Delta E \sim 500$  を達成している。

一方で回折格子のような分散型分光器には何点か欠点がある。まず、波長に比例する分散角度によって光をわける。 このため、波長が短くなるにつれて波長分解能、すなわちエネルギー分解能は悪くなってしまう。例えば Chandra HETG は 1 keV の X 線では 1 eV 程度のエネルギー分解能であるが、5.9 keV の中性鉄輝線に対しては 50 eV 以上 である。次に、波長の情報を位置の情報として読み出すために、高いエネルギー分解能を発揮できるのは点源天体に 限られる。銀河団のガスなど、広がった天体の観測には回折格子は向かない。また、分散された光のみを検出するこ とから、検出効率が非分散型分光器と比較して低い。これは暗い天体の観測には向かないことを意味する。回折格子 はエネルギーの低い軟 X 線領域で明るい点源天体の観測には向くものの、広がった天体や数 keV 以上の X 線領域 の観測には適していない。

#### 1.1.2 DIOS ミッション

現在我々の研究グループが進めている将来天文衛星ミッションについて述べる。

宇宙におけるバリオンがどのような形態で存在しているかを詳細に調べた結果、銀河中の星や X 線を放射する銀河団の高温プラズマがそれぞれ数 10 % を占めているものの、少なくとも半分以上のバリオンは未発見であることが示唆された。この未発見のバリオンをダークバリオンと呼ぶ。シミュレーションによると、ダークバリオンのほとんどは 10<sup>5</sup> – 10<sup>7</sup> K の温度を持ち、銀河団同士をフィラメント状に分布していることが示された [2, 3]。これを中高温銀河間物質 (WHIM: Warm Hot Intergalactic Medium) と呼ぶ。この温度領域では高階電離した酸素輝線からの輝線放射率が高い。酸素は銀河間物質の重元素の中で最も量が多い元素の一つであり、WHIM からの輝線として観測しやすいと考えられる。WHIM は希薄であるために、これまでの検出器では観測にかからなかったと考えられる。測定には高いエネルギー分解能をもった検出器が必要であり、WHIM の輝線の精密分光は、WHIM の状態と運動の解明につながる。さらに、撮像と奥行き方向の赤方偏移観測から、WHIM の 3 次元マッピングが可能となる。

現在、我々はこの WHIM 検出に向けて DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) ミッションを進めている [18]。DIOS ミッションでは 0 < z < 0.3 の範囲にある酸素輝線 O VII (561 eV, 568 eV, 574 eV)、O VIII (653 eV) を精密分光観測し、ダークバリオンの正体が WHIM であるかどうかを検証する。DIOS ミッションではエネルギー 分解能 2 eV を達成する検出器が求められる。また、シミュレーション結果から輝線感度 10<sup>11</sup>erg<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>sr<sup>-1</sup> 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。観測時間は 1 Msec を仮定すると WHIM の検出には、  $S\Omega \sim 100 \text{ cm}^2 \text{deg}^2$  が求められる。図 1.2 に  $S\Omega$  とエネルギー分解能について、衛星ごとの性能を示す。



図 1.1: 宇宙流体シミュレーションによる WHIM の空間分布 [3]



図 1.2: 視野 × 面積とエネルギー分解能の他の衛星 (CCD と X 線マイクロカロリメータ) との比較 [18]。

#### 1.1.3 X 線マイクロカロリメータによる精密分光

DIOS のような次世代の X 線天文衛星に要求される性能を考える。半導体検出器はエネルギー分解能の面で優れて おらず、回折格子はエネルギー範囲が狭く、DIOS の観測対象であるガスといった広がった天体の観測には不適であ る。そこで、次世代の分光検出器としては X 線マイクロカロリメータが使用される予定である。広いエネルギー帯 域で 10 eV 以下といった高いエネルギー分解能をもつ検出器は、現時点で X 線マイクロカロリメータ以外に存在し ない。X 線マイクロカロリメータは光子のエネルギーを素子の温度上昇として捉える検出器である。100 mK といっ た極低温で非常に高いエネルギー分解能を達成する。

2015 年度に打ち上げ予定の ASTRO-H 衛星では、半導体温度計型 X 線マイクロカロリメータ (SXS) を 36 ピク セル搭載し、史上初の X 線マイクロカロリメータによる天体観測に挑む予定である。入射 X 線エネルギー E とエ ネルギー分解能  $\Delta E$  の比  $E/\Delta E$  を resolving power といい、検出器の分光性能を示す値である。図 1.3 に SXS の  $E/\Delta E$  をこれまで述べた X 線観測機器とともに示す。SXS は RGS や HEG といった回折格子と比較して、特に高



図 1.3: X 線のエネルギーと観測機器の resolving power  $(E/\Delta E)$ の関係 [7]。回折格子は高いエネルギーでは分解能 が悪化することが分かる。

いエネルギーで  $E/\Delta E$  で有利なことが分かる。また、全ての X 線エネルギー範囲で CCD カメラと比較して  $E/\Delta E$  が 1 桁向上していることが分かる。SXS は個々のピクセルサイズが 0.8 mm × 0.8 mm がであり、視野 2.9' × 2.9' をカバーする。

SXS の次の検出器として、温度計の感度がさらに良い超伝導遷移端温度計 (TES) を用いた X 線マイクロカロリ メータの開発を我々の研究グループは進めている。我々の研究グループでは 5.9 keV の X 線に対して 2.8 eV のエネ ルギー分解能を達成している [1]。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、DIOS ミッションでは TES を用いた X 線マイクロカロリメータを 16 × 16 ピクセル程度アレイ化する。

### 1.2 極微細組成解析

X 線精密分光は X 線天文学のみならず、地上検出器でもその需要は高い。ここではその例として極微細解析に用いられているエネルギー分散型分光について述べ、その現状と次世代機器の課題を述べる。

#### 1.2.1 エネルギー分散型分光 (EDS: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)

近年では、材料の高性能化や電子部品の微細化、ナノテクノロジーやバイオテクノロジーなどが急速に発展してき ており、微細な領域の組成分析が求められている。とくに走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) や透過型電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscope) といった電子顕微鏡が用いられることで、極微細組 成解析が可能になってきた。

これら電子顕微鏡は、電子ビームを試料に照射し、試料から発せられた特性 X 線によって試料表面の元素を同定 する。特性 X 線の分析方法には、エネルギー分散型分光 (EDS: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)、波長分散 型分光 (WDS: Wavelength Dispersive X-ray Spectroscopy) がある。EDS や WDS によって微小領域を測定し、観 察部位の化学組成を調べることが可能となる。

WDS では分光結晶によって光を波長ごとに分ける。低いエネルギー帯域ではエネルギー分解能が非常に良いものの、高いエネルギーに関しては悪化する。このため、広いエネルギー (波長) 範囲をカバーするには複数の結晶と、それらを駆動するシステムが必要であり、測定時間は長くなる。

EDS では主にリチウムドープシリコンを用いた半導体検出器 (SSD: Solid State Detector) が使われており、これ はエネルギー分解能が 130–140 eV 程度 (MnKα に対して) である。SSD のエネルギー分解能であると、スペクト ルで隣接するピークは重なってしまい、ピークの近い組成物質の判別ができない。微量な元素では定量分析はもちろ ん、検出すらできない場合も生じてしまう。

組成分析において EDS が WDS に劣っている最大の点はエネルギー分解能である。EDS において WDS に劣ら ないエネルギー分解能を達成し、かつ広いエネルギー帯域をカバーする検出器が強く求められている。

#### 1.2.2 TES カロリメータの EDS への応用

我々は EDS におけるエネルギー分解能を SSD と比較して飛躍的に向上させるために、TES カロリメータをその 検出器として搭載する開発をこれまで行ってきた [25, 28, 26, 9]。本開発は文部科学省のリーディングプロジェクト 「次世代の電子顕微鏡要素技術開発」として開始され、物質材料研究機構が代表機関となって共同開発されたもので ある。平成 21 年には、TES カロリメータ単ピクセルを搭載した TEM で 7.6 eV (SiKα に対して)を達成した [26]。 図 1.4 左図 に SSD と TES カロリメータで測定を行った結果を示す。SSD のエネルギー分解能は 117 eV であり、 TES カロリメータによって 1 桁以上エネルギー分解能が改善した。図 1.4 右図はシリコンとタングステンの両方を



図 1.4: TES カロリメータを搭載した TEM によって得られたスペクトルの例。(左図): シリコンの X 線スペクトル。 実線はガウスシアンによるフィッティング結果であり、破線は個々のカーブである。(右図): 半導体デバイス中のシリ コンとタングステンの両方を含む領域からの X 線スペクトル。

含む領域の測定結果である。SSD では分離が不可能であったものが、TES カロリメータによってシリコンとタング ステンのピークが分離できていることが分かる。また、図 1.5 に TES カロリメータを搭載した TEM の外観を示す。 現在取り組んでいる課題の一つに、計数率の向上がある。TES カロリメータ単ピクセルでは計数率が 300~500 cps



図 1.5: TES カロリメータを搭載した TEM の外観。(A): 透過型電子顕微鏡、(B): TES カロリメータ (内部)、(C): 希釈冷凍機、(D): 無冷媒機械式冷凍機と防音室、(E): 半導体検出器による EDS 分析装置。

程度であった。EDS における長時間の測定は、試料のドリフトやコンタミネーションの蓄積の観点から好ましくな く、実用的には 5 kcps 以上が望ましいとされる。

TES カロリメータ素子にとって計数率の向上をさせるためには、素子の検出効率向上と多ピクセル化を行えば良い。特に、多ピクセル化によって検出面積がピクセルの数だけ増えるので、計数率の大幅な増大が確保できる。一方で多ピクセル化は低温ステージでの配線本数の増大や読み出し素子 SQUID の発熱、超伝導配線の綿密な設計等、単ピクセルではなかった課題が数多く生じる。

我々は現在、次世代 TEM 開発として、TEM の一種である 走査透過型電子顕微鏡 (STEM: Scanning Transmission Electron Microscope) のシステム開発 (STEM–TES システム開発) を行っている。この開発は、物質材料研究機構、宇宙航空研究開発機構、九州大学、株式会社日立ハイテクサイエンス、太陽日酸株式会社の共同開発である。 STEM–TES 開発では、TES カロリメータ 64 ピクセルを搭載し、エネルギー分解能 10 eV (FWHM) 以下と、計数 率 5 kcps 以上を目標としている。

### 1.3 本修士論文の目的

我々の研究グループはこれまで TES カロリメータのアレイ化に関する研究を行ってきた。TEM 開発を TES の地 上応用と位置づけ、アレイ化を実現するために重要となる要素技術開発を進めてきた。100 mK 近くの温度を安定的 に維持しなければならない TES にとっては、低温フロントエンド部における課題の解決とその技術の蓄積が TES の 性能を最大限引きだすための鍵を握っている。

本研究では STEM-TES システムにおける低温フロントエンド部の課題に着目する。課題の整理と解決方法の提案 を行い、その実証実験を試みる。課題の整理を行った結果、配線本数の削減と実装方式の改良の必要性が明白となっ 1.3. 本修士論文の目的

た (第4章)。

まず、配線本数の削減のために TES と SQUID を、複数チャネル間でバイアス電流を共通化させる読み出し方法 について提案する。その後、バイアス共通化のための SQUID 基板の設計と性能評価を行う (第 9.3 章)。

実装方式に関しては新しい電気的接続手法を提案する。これまで行ってきた手動によるワイヤボンディングに代わ る方式としてフリップチップボンディング実装方式を提案する。この実装方式の極低温における実証をするために STEM における極低温ステージであるスノートの試作を行い、その冷却試験を行った(第6章)。

また、STEM-TES システムでは TES カロリメータと SQUID の動作に影響がないレベルに磁場遮蔽をする必要 があり。磁気シールドを製作する必要がある。これに先立ち、我々の研究グループが所有する冷凍機への搭載をモデ ルケースとして磁気シールドの設計を行う (第7章)。

さらに、バイアス共通化の読み出しを実証するために、X 線照射試験による TES パルスの取得を行う。独立読み 出しの場合の実験(第8章)と比較して、その検証と課題の追求を行う(第9章、第10章)。

## 第2章 TES型X線マイクロカロリメータの原理

## 2.1 X線マイクロカロリメータの原理

X線マイクロカロリメータとは入射した X線光子を素子の温度上昇として捉える検出器である。その構造は、図 2.1のように吸収体、ピクセル、温度計、サーマルリンク、熱浴から成る。



図 2.1: X 線マイクロカロリメータの構造

吸収体に入射した X 線は光電効果によって吸収されてそのエネルギーは最終的に熱に変わる。入射エネルギー E に対する温度変化  $\Delta T$  はカロリメータピクセルの熱容量を C とすると、

$$\Delta T = \frac{E}{C} \tag{2.1}$$

と書ける。カロリメータピクセルは熱浴とは熱伝導度 G で繋がれている。このため、吸収体で生じた熱はサーマル リンクを通して熱浴に逃げ、やがて元の定常状態に戻る。これは

$$C\frac{d\Delta T}{dt} = -G\Delta T \tag{2.2}$$

と表される。式(2.2)から、素子の温度上昇は時定数

$$\tau_0 = \frac{C}{G} \tag{2.3}$$

で指数関数的に減衰する。

X線マイクロカロリメータのエネルギー分解能は素子の熱揺らぎによって制限される。カロリメータピクセル中の フォノン数 N は、

$$N \sim \frac{CT}{k_{\rm B}T} = \frac{C}{k_{\rm B}} \tag{2.4}$$

とかけるので、素子の熱揺らぎ  $\Delta U$  は

$$\Delta U \sim \sqrt{N} k_{\rm B} T = \sqrt{k_{\rm B} T^2 C} \tag{2.5}$$

となる。より一般的には、[16] で議論されているように X 線マイクロカロリメータのエネルギー分解能は

$$\Delta E_{\rm FWHM} = 2.35\xi \sqrt{k_{\rm B}T^2C} \tag{2.6}$$

となる。ただし <>>> は温度計感度や動作条件等によってきまるパラメータである。熱容量の温度依存性を考えると、エ ネルギー分解能は温度に強く依存することがわかる。このため、X 線マイクロカロリメータを 100 mK といった極 低温で動作させることで非常に高いエネルギー分解能を達成することができるのである。

#### 2.1.1 吸収体

X 線光子は光電効果によって吸収体に吸収される。エネルギー分解能を向上させるためには、式 2.6 より熱容量 *C* を小さく、つまり吸収体のサイズを小さくすれば良いことがわかる。一方で、検出効率を高くするためには吸収体が 大きい方が有利であり、吸収体のサイズはこのトレードオフで決めなければならない。

また、吸収体を選ぶ際には熱化、熱拡散の速さも考慮する必要がある。熱化、熱拡散が遅いと熱が逃げてしまって エネルギー分解能は劣化する。また、吸収位置によって熱化、熱拡散過程がばらついてしまうとイベントごとのパル ス波形のばらつきが生じてしまい、S/N 比とは別にエネルギー分解能を劣化させる要因となる。熱化、熱拡散過程を 一様にするためには TES にエネルギーが移動する前に吸収体内での熱化、熱拡散が一様に起こる必要があり、吸収 体内での熱化、熱拡散の速さが重要となる。

以上の観点から、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、熱化および熱拡散の速さが求められ る。以下に吸収体の用いる候補として物質の種類に応じた特徴を挙げる。

絶縁体と半導体

一般的にバンドギャップの不純物電位に電子が補足されて準安定な状態を作ってしまう。このため、熱化が不完 全であったりばらつくことが多い。

• 常伝導金属

X 線のエネルギー帯域では伝導電子の電子 – 電子相互作用によって熱化され、熱化は数 ns と非常に速い。熱 拡散も伝導電子が担うので非常に速く、熱化および熱拡散の点では有利である。一方で電子比熱が大きいという 特徴を持つので高いエネルギー分解能を達成するためには吸収体のサイズをあまり大きくすることができない。

超電導体

は、超伝導遷移温度よりも十分に低ければ電子比熱が指数関数的に小さくなる。そこで原子番号の大きく、か つデバイ温度が高い超伝導体を用いれば比熱を抑えつつ高い検出効率を実現できる。しかし、そのような低温 では準粒子の寿命は短く、一般的には熱化は非常に遅くなる。

半金属

ビスマスなどの半金属は電子比熱が小さいために熱容量を抑えつつ、吸収体のサイズを大きくすることができ る。また、熱化が非常に速いことが特徴である。

これら各物質の特徴を考慮して、吸収体としては金、銅、スズ、ビスマス、水銀テルルなどが用いられている。本研 究で扱ったカロリメータの吸収体は金を用いている。 2.2. 超伝導遷移端温度計 (TES: Transition Edge Sensor)

#### 2.1.2 温度計

抵抗型温度計は、半導体や金属の抵抗値が温度に依存して変化することを利用したものである。その温度計感度 α を

$$\alpha \equiv \frac{d\ln R}{d\ln T} = \frac{T}{R} \frac{dR}{dT}$$
(2.7)

と定義する。ここで T は温度計の温度、R は温度計の抵抗値である。例えば半導体温度計を用いた XRS では  $|\alpha| \sim 6$  である。温度計感度  $\alpha$  を大きくすることでカロリメータの分解能を改善することが可能となる。次に述べる超伝導 遷移端型温度計 (TES) を用いれば  $\alpha$  を飛躍的に大きくすることができる。

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

超伝導遷移端温度計 (TES: Transition Edge Sensor) とは、超伝導 – 常伝導遷移端の急激な抵抗変化を利用した温度計である。超伝導遷移は典型的には数 mK という非常に狭い温度範囲で起こり、式 (2.7) の温度計感度  $\alpha$  は 1000 にも達する。



図 2.2: 超伝導遷移端

温度計に TES を用いたカロリメータのエネルギー分解能は、半導体温度計カロリメータと比較してエネルギー分 解能を原理的には1桁以上向上させることが可能である。また、TES カロリメータでは吸収体の熱容量に関するマー ジンは大きくなるために、熱化の物質を使用したり、大きな吸収体を用いて受光面積を増やすといったことが可能と なる。

TES を用いる場合にはカロリメータの動作温度は TES の遷移温度にしなければならないため、動作温度は TES の遷移温度によって決定されてしまう。しかし、TES を二重薄膜にすることで近接効果によって臨界温度をコント ロールすることが可能である。近接効果とは、超伝導体に常伝導帯を接触させるとクーパー対が常伝導帯に漏れだし、 膜厚の比に依存して超電導体の臨界温度が低下する効果である。

## 2.3 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ものの、感度がある温度域数 mK と非常に狭いために、動作点 を遷移端中に保たなければならない。これは TES を定電圧バイアスで動作させ、強いフィードバックバックをかけ ることで実現する。これを電熱フィードバックと呼ぶ (ETF: Electro-Thermal Feedback) と呼ぶ ([11, 10])。この説 では電熱フィードバック中でのカロリメータの動作について述べる。

#### 2.3.1 電熱フィードバックのもとでの温度変化に対する応答

図 2.3 左図に示すような定電圧バイアスで TES を動作させたケースを考える。熱入力によって TES の温度が上昇 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、ジュール発熱は減少する。このように熱入力



図 2.3: (左図): 定電圧バイアス、(右図): シャント抵抗を用いて作る擬似的定電圧バイアス

を打ち消す方向に、ジュール発熱量が急激に変化し、負のフィードバックが働くので素子の温度は安定に保たれる。 実際には配線抵抗のが存在するために電流源と、TES に並列につなぐシャント抵抗によって擬似的定電圧バイアスで TES を動作させる (図 2.3 右図)。以下では理想的な定電圧バイアスで動作させているものとする。

熱伝導度は

$$G \equiv dP/dT \tag{2.8}$$

で定義される。付録に示すように、熱伝導度は一般的には温度依存性を持って

$$G = G_0 T^{n-1} \tag{2.9}$$

と温度に対するべき n を用いて表される。ここで  $G_0$  は定数である。電子が熱伝導を担う場合には n = 2、格子振動が熱伝導を担う場合には n = 4 となる。熱浴と TES の間の熱伝導を考える。両者の温度をそれぞれ  $T_{\text{bath}}$ 、T とする。一般には  $T \gg T_{\text{bath}}$  であるので、熱伝導による熱の流れは

$$P = \int_{T_{\text{bath}}}^{T} GdT = \frac{G_0}{n} (T^n - T_{\text{bath}}^n)$$
(2.10)

と積分で計算できる。

平衡状態を考える。TES の温度を  $T_0$ 、動作点での TES の抵抗値を  $R_0$ 、バイアス電圧を  $V_b$  とするととして TES におけるジュール発熱  $P_n \equiv V_b^2/R_0$  とカロリメータピクセルから熱浴へ流れる熱浴へ流れる熱量がつりあっている ので

$$P_{\rm b} = \frac{G_0}{n} (T_0^n - T_{\rm bath}{}^n)$$
(2.11)

とかける。

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収支に等しいので、

$$C\frac{dT}{dt} = \frac{V_{\rm b}^2}{R(T)} - \frac{G_0}{n}(T^n - T_{\rm bath}^n)$$
(2.12)

2.3. 電熱フィードバック (ETF: Electro Thermal Feedback)

が成り立つ。温度上昇  $\Delta T$  は 1 次の近似で

$$C\frac{d\Delta T}{dt} \simeq -\frac{V_{\rm b}^2}{R_0^2} - G_0 T^{n-1} \Delta T$$
$$= \frac{P_{\rm b}\alpha}{T} \Delta T - G \Delta T \qquad (2.13)$$

となる。最後の項にある G は温度 T での TES の熱伝導度 G である。以後、単に G と書いた場合にはこれを表す ものとする。式 (2.13)の解は、

$$\Delta T = \Delta T_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{eff}}}\right) \tag{2.14}$$

と書ける。ただし、

$$\tau_{\text{eff}} \equiv \frac{C/G}{1 + P_{\text{b}}\alpha/GT}$$
$$= \frac{\tau_0}{1 + P_{\text{b}}\alpha/GT}$$
(2.15)

は有効時定数である。式 (2.11)、式 (2.15) より T<sub>eff</sub> は、

$$\tau_{\rm eff} = \frac{\tau_0}{a + \frac{\alpha}{n} \left(1 - \left(\frac{T_{\rm bath}}{T}\right)^n\right)}$$
(2.16)

のように書ける。さらに、熱浴温度が TES の温度よりも十分低い場合  $T_{\text{bath}}^n \ll T^n$  の場合には、

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{\tau_0}{a + \frac{\alpha}{n}}$$
$$\simeq \frac{n}{\alpha} \tau_0 \tag{2.17}$$

と近似できる。ただし式 (2.17) は α/n ≫ 1 の場合である。このように、α が大きい場合に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、

$$\Delta I = \frac{V_{\rm b}}{R(T + \Delta T)} - \frac{V_{\rm b}}{R(T_0)}$$
$$\simeq -\frac{\Delta R}{R} I$$
$$\simeq -\alpha \frac{E}{CT} I \tag{2.18}$$

となる。

#### 2.3.2 電熱フィードバックの一般論と電流応答性

定電圧バイアスで動作するカロリメータに、時間依存する微小なパワー  $\delta Pe^{i\omega t}$  が入射したときの応答について考える。系の応答は線形であり、入射  $\delta Pe^{i\omega t}$  に対する温度変化は  $\delta Te^{i\omega t}$  で表されるとする。フィードバックがかかっていない時には

$$P_{\rm bgd} + \delta P e^{i\omega t} = \bar{G}(T - T_{\rm bath}) + G\delta T e^{i\omega t} + i\omega C\delta T e^{i\omega t}$$
(2.19)

が成り立つ。ただし、 $P_{\text{bgd}}$ はバックグラウンドのパワー、 $\bar{G}$ は平均の熱伝導度である。定常状態では、

$$P_{\rm bgd} = \bar{G}(T - T_{\rm bath}) \tag{2.20}$$

である。式 (2.19)、(2.20) から、δT は δP を用いて

$$\delta T = \frac{1}{G} \frac{1}{a + i\omega\tau_0} \delta P \tag{2.21}$$

と表される。ここで  $\tau_0 \equiv C/G$  は系の固有時定数である。 電熱フィードバックがかかった状態でエネルギー保存を表す式は、

$$P_{\rm bgd} + \delta P e^{i\omega t} + P_{\rm b} + \delta P_{\rm b} e^{i\omega t} = \bar{G}(T - T_{\rm bath}) + G\delta T e^{i\omega t} + i\omega C\delta T e^{i\omega t}$$
(2.22)

となる。また、定電圧バイアスでは以下の関係が成り立つ。

$$\delta P_{\rm b} \mathrm{e}^{i\omega t} = \frac{dP_{\rm b}}{dI} \delta \mathrm{e}^{i\omega t} = V_{\rm b} \delta I \mathrm{e}^{i\omega t}$$
(2.23)

$$\delta I e^{i\omega t} = \frac{dI}{dR} \delta R e^{i\omega t} = \frac{d}{dR} \left( \frac{V_{\rm b}}{R} \right) = -\frac{V_{\rm b}}{R^2} \delta R e^{i\omega t}$$
(2.24)

$$\delta R e^{i\omega t} = \frac{dR}{dR} \delta T e^{i\omega t} = \alpha \frac{R}{T} \delta T e^{i\omega t}$$
(2.25)

これらを使うと、式 (2.22) は、

$$P_{\rm bgd} + \delta P e^{i\omega t} + \frac{V_{\rm b}^2}{R} - \frac{V_{\rm b}^2 dR}{R^2} \frac{dR}{dT} \delta T e^{i\omega t} = \bar{G}(T - T_{\rm bath}) + G\delta T e^{i\omega t} + i\omega C\delta T e^{i\omega t}$$
(2.26)

と書き換えられる。式 (2.26) の解は、

$$\delta T e^{i\omega t} = \frac{1}{\alpha \frac{P_{\rm b}}{T} + G + i\omega C}$$
$$= \frac{1}{G} \frac{1}{1 + \frac{\alpha P_{\rm b}}{GT}} \frac{1}{1 + i\omega \tau_{\rm eff}} \delta P e^{i\omega t}$$
(2.27)

ここで

$$\tau_{\rm eff} \equiv \frac{1}{1 + \frac{\alpha P_{\rm b}}{GT}} \frac{C}{G}$$
(2.28)

は、電熱フィードバックがかかった状態での実行的な時定数である。



図 2.4: 電熱フィードバックのダイアグラム

一般的なフィードバックの理論に当てはめて考える。電熱フィードバックのダイアグラムを図 2.4 のように書くことができる。

フィードバック量bと系のループゲイン $\mathcal{L}(\omega)$ はそれぞれ、

$$b = -V_{\rm b}$$

$$\mathcal{L}(\omega) = \frac{1}{G(1+i\omega\tau_0)} \alpha \frac{R}{T} \left(-\frac{I}{R}\right) (-V_{\rm b})$$

$$= \frac{\alpha P_{\rm b}}{GT} \frac{1}{1+i\omega\tau_0}$$

$$\equiv \frac{\mathcal{L}_0}{1+i\omega\tau_0}$$
(2.30)

とかける。ただし、ここで

$$\mathcal{L}_0 \equiv \frac{\alpha P_{\rm b}}{GT} \tag{2.31}$$

は $\omega = 0$ でのループゲインである。閉ループでの伝達関数

$$S_I(\omega) \equiv \frac{\delta I}{\delta P} \tag{2.32}$$

は、電流応答性 (current responsivity) と呼ばれることがある。これは、 $\mathcal{L}(\omega)$  を用いて

$$S_{I}(\omega) = \frac{1}{b} \frac{\mathcal{L}(\omega)}{1 + \mathcal{L}(\omega)}$$

$$= -\frac{1}{V_{\rm b}} \frac{\mathcal{L}_{0}}{\mathcal{L}_{0} + 1 + i\omega\tau_{0}}$$

$$= -\frac{1}{V_{\rm b}} \frac{\mathcal{L}_{0}}{\mathcal{L}_{0} + 1} \frac{1}{1 + i\omega\tau_{\rm eff}}$$
(2.33)

とかける。ただし、

$$\tau_{\rm eff} = \frac{\tau_0}{\mathcal{L}_0 + 1} \tag{2.34}$$

である。式 (2.33) より、ループゲインが十分に大きい場合 ( $\mathcal{L}_0 \gg 1$ ) では、

$$S_I(\omega) = -\frac{1}{V_{\rm b}} \frac{1}{1 + i\omega\tau_{\rm eff}} \tag{2.35}$$

となる。さらに、 $\omega \ll 1/\tau_{\text{eff}}$ を満たす周波数範囲では、

$$S_I(\omega) = -\frac{1}{V_{\rm b}} \tag{2.36}$$

となって、バイアス電圧  $V_b$ の逆数で表される。入力  $P(t) = E\delta(t)$ に対する応答は次のように計算される。角周波数空間  $-\infty < \omega < \infty$  での入力は、

$$P(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E\delta(t) e^{i\omega t} dt$$
$$= \frac{E}{2\pi}$$
(2.37)

である。出力はそれに式 (2.33) で表される電流応答性  $S_I(\omega)$  をかけることで、

$$I(\omega) = S_I(\omega)P(\omega)$$
  
=  $-\frac{E}{2\pi V_{\rm b}}\frac{\mathcal{L}_0}{\mathcal{L}_0 + 1}\frac{1}{1 + i\omega\tau_{\rm eff}}$  (2.38)

と表される。これを逆フーリエ変換し、時間軸に戻して考えると

$$I(t) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\omega) e^{-i\omega t} d\omega$$
  
$$= -\frac{1}{2\pi} \frac{E}{V_{\rm b}} \frac{\mathcal{L}_0}{\mathcal{L}_0 + 1} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\omega t}}{1 + i\omega \tau_{\rm eff}} d\omega$$
  
$$= -\frac{E}{V_{\rm b} \tau_{\rm eff}} \frac{\mathcal{L}_0}{\mathcal{L}_0 + 1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\rm eff}}\right)$$
  
$$= -\frac{\alpha E}{CT} I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\rm eff}}\right)$$
(2.39)

となって、式 (2.18) と一致することが分かる。ただし、 $I_0$  は平衡状態で TES を流れる電流である。一方、入力  $P(t) = E\delta(t)$ による温度上昇は、

$$\Delta T(\omega) = \frac{1}{G(1+i\omega\tau_o)} \frac{1}{1+\mathcal{L}(\omega)} P(\omega)$$
$$= \frac{1}{2\pi} \frac{E}{G(1+\mathcal{L}_0)} \frac{1}{a+i\omega\tau_{\text{eff}}}$$
(2.40)

とかけるので、同様に逆フーリエ変換によって時間軸に戻して考えると、

$$\Delta T(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta T(\omega) e^{-i\omega t} d\omega$$
  
$$= \frac{1}{2\pi} \frac{E}{G} \frac{1}{1 + \mathcal{L}_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\omega t}}{1 + i\omega \tau_{\text{eff}}} e\omega$$
  
$$= \frac{E}{G\tau_{\text{eff}}} \frac{1}{1 + \mathcal{L}_0} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{eff}}}\right)$$
  
$$= \frac{E}{C} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{eff}}}\right)$$
(2.41)

となる。また、ループゲイン Lo が一定とみなせる時には式 (2.39) より

$$\int V_{\rm b}I(t)dt = -\frac{\mathcal{L}_0}{1+\mathcal{L}_0}E\tag{2.42}$$

となることが分かる。X 線入射に伴うジュール発熱の積分量は入射エネルギーに比例する。入射エネルギーは、  $\mathcal{L}_0/(1+\mathcal{L}_0)$ はジュール発熱の変化に使われ、残り  $1/(1+\mathcal{L}_0)$ が熱浴に逃げていくことになる。式 (2.42) より  $\mathcal{L}_0 \gg 1$ の場合には、X 線入射エネルギーはジュール発熱の変化の積分量に一致する。

## 2.4 固有ノイズ

エネルギー分解能を見積もるためにはノイズレベルを評価する必要がある。ノイズには熱浴の温度揺らぎ、外部の 磁場、1/f ノイズ、rf ノイズ等さまざまである。X 線マイクロカロリメータでは、ジョンソンノイズとフォノンノ イズは避けることはできない。原理的なエネルギー分解能はこれらで制限される。ここではジョンソンノイズをフォ ノンノイズについて述べる。また、ここでは理想的な定電圧バイアスの場合で定式化する。

ジョンソンは温度計の抵抗で発生するノイズであり、フォノンノイズは熱浴とカロリメータとの熱伝導度が有限で あるために発生するノイズである。図 2.5 はこれらのノイズの寄与も含めた電熱フィードバックのダイアグラムであ る。ジョンソンノイズはカロリメータの抵抗に起因し、フォノンノイズは熱起源であるために、両者の伝達の仕方は 異なる。



図 2.5: ノイズの寄与も考慮した電熱フィードバックバックのダイアグラム

微小な熱揺らぎ  $\delta P_{\rm ph}$  がもたらす電流の揺らぎは、

$$\delta I_{\rm ph} = -\frac{1}{V_{\rm b}} \frac{\mathcal{L}(\omega)}{1 + \mathcal{L}(\omega)} \delta P_{\rm ph}$$
  
=  $S_I(\omega) \delta P_{\rm ph}$  (2.43)

である。これより、フォノンノイズの電流密度は、

$$I_{\rm ph}^{2} = |S_{I}(\omega)|^{2} \delta P_{\rm ph}^{2}$$
  
=  $\frac{a}{V_{\rm b}^{2}} \left(\frac{\mathcal{L}_{0}}{\mathcal{L}_{0}+1}\right)^{2} \frac{1}{1+\omega^{2} \tau_{\rm eff}^{2}} \delta P_{\rm ph}^{2}$  (2.44)

となる。[13] によると、フォノンノイズのパワースペクトル密度は $0 \leq f < \infty$  で

$$\delta P_n^2 = 4k_{\rm B}GT^2 \frac{\int_{T_{\rm bath}}^T \left(\frac{t_{\kappa}(t)}{T_{\kappa}(t)}\right)^2 dt}{\int_{T_{\rm bath}}^T \frac{\kappa(T)}{\kappa(T)} dt}$$
  
$$\equiv 4k_{\rm B}GT^2\Gamma \qquad (2.45)$$

と表される。ここで  $\kappa(T)$  はサーマルリンクを構成する物質の熱伝導度である。 $\theta \equiv T_{\text{bath}}/T$  として  $\kappa(T)$  は  $\kappa(T) = \kappa(T_{\text{bath}})\theta^{-(n-1)}$  と表されると近似すると  $\Gamma$  は、

$$\Gamma = \frac{n}{2n+1} \frac{1 - \theta^{2n+1}}{a - \theta^n}$$
(2.46)

となる。式 (2.45) を式 (2.44) に代入すると、フォノンノイズの電流密度は、

$$\delta I_{\rm ph}^{2} = 4k_{\rm B}GT^{2}\Gamma|S_{I}(\omega)|^{2}$$
  
= 
$$\frac{4k_{\rm B}GT^{2}\Gamma}{V_{\rm b}^{2}} \left(\frac{\mathcal{L}_{0}}{\mathcal{L}_{0}+1}\right)^{2} \frac{1}{1+\omega^{2}\tau_{\rm eff}^{2}}$$
(2.47)

となる。次に、ジョンソンノイズについて考える。ジョンソンノイズ V<sub>J</sub> による電流のゆらぎ I<sub>J</sub> は、

$$\delta I_{\rm J} = \frac{\delta V_{\rm J}}{R} \tag{2.48}$$

であり、この揺らぎが系に入力されると出力の揺らぎは

$$\delta I_{\rm J} = \frac{1}{1 + \mathcal{L}(\omega)} \delta I_{\rm J}^{0}$$

$$= \frac{\frac{1}{\mathcal{L}_0 + 1} + i\omega\tau_{\rm eff}}{1 + i\omega\tau_{\rm eff}} \frac{\delta V_{\rm J}}{R}$$

$$= \frac{1}{\mathcal{L}_0 + 1} \frac{1 + i\omega\tau_0}{1 + i\omega\tau_{\rm eff}} \frac{\delta V_{\rm J}}{R} \qquad (2.49)$$

となる。ジョンソンノイズの電圧密度は  $0 \le f < \infty$  で  $V_J^2 = 4k_BRT$  と与えられる。これを用いて出力電圧密度は、

$$\delta I_{J}^{2} = \frac{4k_{B}T}{R} \left(\frac{1}{\mathcal{L}_{0}+1}\right)^{2} \left|\frac{1+i\omega\tau_{0}}{1+i\omega\tau_{eff}}\right|^{2}$$

$$= \frac{4k_{B}T}{R} \left(\frac{1}{\mathcal{L}_{0}+1}\right)^{2} \frac{1+\omega^{2}\tau_{0}^{2}}{1+\omega^{2}\tau_{eff}^{2}}$$

$$= \begin{cases} \frac{4k_{B}T}{R} \left(\frac{1}{\mathcal{L}_{0}+1}\right)^{2} & \text{for } \omega \ll \tau_{0}^{-1} \\ \frac{4k_{B}T}{R} & \text{for } \omega \gg \tau_{eff}^{-1} \end{cases}$$
(2.50)

となる。 $\omega \ll \tau_0^{-1}$ の範囲ではジョンソンノイズは電熱フィードバックによって抑制され、 $\omega \gg \tau_{\text{eff}}^{-1}$ の範囲では元の値にあることがわかる。

2.4. 固有ノイズ

全ての電流密度の和は、フォノンノイズとジョンソンノイズの電流密度の自乗和で与えられる。 $0 \le f < \infty$ の周波数範囲では、

$$\delta I^{2} = \delta I_{J}^{2} + \delta I_{ph}^{2}$$

$$= \frac{4k_{B}T}{R} \Big(\frac{1}{\mathcal{L}_{0}+1}\Big)^{2} \frac{1+\omega^{2}\tau_{0}^{2}}{1+\omega^{2}\tau_{eff}^{2}} + \frac{4k_{B}GT^{2}\Gamma}{V_{b}^{2}} \Big(\frac{\mathcal{L}_{0}}{\mathcal{L}_{0}+1}\Big)^{2} \frac{1}{1+\omega^{2}\tau_{eff}^{2}}$$

$$= \frac{4k_{B}T}{R} \frac{\frac{1+\Gamma\alpha\mathcal{L}_{0}}{(\mathcal{L}_{0}+1)^{2}} + \omega^{2}\tau_{eff}^{2}}{1+\omega\tau_{eff}^{2}}$$
(2.51)

となる。強い電熱フィードバックの極限では、

$$\delta I^{2} = \frac{4k_{\rm B}T}{R} \frac{n/2 + \omega^{2} \tau_{\rm eff}^{2}}{1 + \omega \tau_{\rm eff}^{2}}$$
(2.52)

となる。図 2.6 にノイズ電流密度と信号の周波数特性の例を示す。



図 2.6: ノイズ電流密度の例。左図は α = 100 の場合、右図は α = 1000 の場合。実践が信号、破線がジョンソン ノイズ、点線がフォノンノイズを表す。低い周波数帯域ではジョンソンノイズは電熱フィードバックによって抑制さ れる一方で、フォノンノイズの周波数特性は信号と同一となる。

フォノンノイズとジョンソンノイズの周波数特性における関係をみるために、比をとってみると、

$$\frac{I_{\rm ph}^2}{I_{\rm J}^2} = \frac{\alpha \mathcal{L}_0 \Gamma}{1 + \omega^2 \tau_0^2} \tag{2.53}$$

となる。低い周波数ではジョンソンノイズが抑制されてフォノンノイズの方が  $\alpha \mathcal{L}_0 \Gamma$  倍大きいことがわかる。 $\omega > \tau_0^{-1}$ からジョンソンノイズの寄与が大きくなり始め、  $\omega \gg \tau_{\text{eff}}^{-1}$ ではジョンソンノイズが支配的となる。一方でパルスとフォノンノイズとの比は、

$$\frac{\delta P_{\text{signal}}^2}{\delta P_{\text{n}}} = \frac{2E^2}{4k_{\text{B}}GT^2\Gamma} \tag{2.54}$$

となって周波数に依存しない。これは、パルスとフォノンノイズの周波数依存性が同一であるためである。 式 (2.33) と式 (2.50) より、ジョンソンノイズは電流応答性 *S*<sub>I</sub>(ω) を用いて

$$\delta I_{\rm J}^{\ 2} = \frac{4k_{\rm B}T}{R} \frac{b^2(1+\omega^2\tau_0^2)}{\mathcal{L}_0^{\ 2}} |S_I(\omega)|^2 \tag{2.55}$$

とかける。式 (2.47) と式 (2.50) から、固有ノイズは、g

$$\delta I^2 = \frac{4k_{\rm B}T}{R} \frac{1 + \omega^2 \tau_0^2}{\mathcal{L}_0^2} b^2 |S_I(\omega)|^2 + 4k_{\rm B}GT^2 \Gamma |S_I(\omega)|^2$$
(2.56)

となる。雑音等価パワー NEP (Noise Equivalent Power) は、信号のパワーと NEP(f) の比が、S/N 比となる値とし て定義され、

$$\operatorname{NEP}(f)^{2} = \left| \frac{\delta I}{S_{I}(\omega)} \right|^{2}$$
(2.57)

と計算される。これより固有ノイズに対する NEP(f) は、

$$NEP(f) = \frac{4k_{\rm B}T}{R} \frac{b^2}{\mathcal{L}_0^2} \left( 1 + (2\pi f)^2 + \frac{\mathcal{L}_0^2}{b^2} GTR\Gamma \right) = 4k_{\rm B}TP_{\rm b} \left( \frac{1 + (2\pi f)^2 \tau_0^2}{\mathcal{L}_0^2} + \frac{\alpha\Gamma}{\mathcal{L}_0} \right)$$
(2.58)

となる。

### 2.5 最適フィルタ処理とエネルギー分解能

X 線マイクロカロリメータは、原理的には非常に高いエネルギー分解能を達成できる。しかし、実際にはパルス波 形はノイズによって変形されて単純にパルスのピーク値のみでエネルギーを推定する方法では良いエネルギー分解能 は得ることはできない。そこで、最適フィルタ処理を行うことによってその誤差を小さくすることを考える [10, 22]。 測定によって得られたパルスを D(t) とする。周波数空間では

$$D(f) = A \times M(f) + N(f) \tag{2.59}$$

のように表されるとする。ここで A は振幅で、M(f) と N(f) はそれぞれ理想的なパルス (電流応答性  $S_I(\omega)$  と同 等のものであり、以後、モデルパルスと呼ぶこととする) とノイズスペクトルである。実際に得られたパルスとモデ ルパルスの差が小さくなるように、振幅 A の値を最小自乗法によって決定する。実際に得られたパルスとモデルパ ルスとの差を次のように定義する。

$$\chi^2 \equiv \int \frac{|D(f) - A \times M(f)|^2}{|N(f)|^2}$$
(2.60)

 $\chi^2$ を最小にする A は、

$$A = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{DM^* + D^*}{2|N|^2} df}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|M|^2}{|N|^2} df}$$
(2.61)

で与えられる。D(f) と M(f) は実関数のフーリエ成分であり、 $D(-f) = D(f)^*$ 、 $M(-f) = M(f)^*$ を満たす。した がって、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{D(f)M(f)^*}{2|N|^2} = -\int_{-\infty}^{\infty} \frac{D(-f)M(-f)^2}{2|N|^2} df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{M(f)D(f)^*}{2|N|^2} df$$
(2.62)

が成り立つ。よって A は

$$A = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{DM^*}{|N|^2} df}{\int_{-\infty}^{\infty} \left|\frac{M}{N}\right|^2 df} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{D}{M} \left|\frac{M}{N}\right|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} \left|\frac{M}{N}\right|^2 df}$$
(2.63)

となる。式 (2.63) はさらに、

$$A = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} D(t) \mathcal{F}^{-1}\left(\frac{M(f)}{|N(f)^2|}\right) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} \left|\frac{M}{N^2}\right|}$$
(2.64)

と変形できる。ここで  $\mathcal{F}^{-1}$  は逆フーリエ変換を表し、 $T(t) \equiv \mathcal{F}^{-1} \left( \frac{M(f)}{|N(f)|^2} \right)$  を最適フィルタのテンプレートと呼ぶ こととする。したがって、テンプレートを用いると、パルスハイト H は

$$H = N \int_{-\infty}^{\infty} D(t)T(t)dt$$
(2.65)

あるいは離散的なデータ点に対して

$$H = N \sum_{i} D_i(t) T_i(t) \tag{2.66}$$

となる。ただし、N は最適な規格化定数、 $D_i(t)$  と $T_i(t)$  がそれぞれデジタル化されたパルスデータとテンプレート である。モデルパルスとしては、実際に得られた X 線パルスの平均を用いればよい。

最適フィルタ処理を行った場合のエネルギー分解能の限界 (1σ エラー) は式 (2.60) が最適値より 1 だけ増える A の変化分で計算できる。これは雑音等価パワー NEP(f) を用いて

$$\Delta E_{\rm rms} = \left(\int_0^\infty \frac{4 \, df}{NEP^2 f}\right)^{-\frac{1}{2}} \tag{2.67}$$

と表される [16]。

固有ノイズによるエネルギー分解能を計算する。式 (2.58) を式 (2.67) に代入するとエネルギー分解能は、

$$\Delta E_{\rm rms} = \left( \int_0^\infty \frac{4 \, df}{\frac{4k_{\rm B}T}{R} \frac{b^2}{\mathcal{L}_0^2} \left( (1 + (2\pi f)^2 \tau_0^2) + \frac{\mathcal{L}_0}{b^2} GTR\Gamma \right)} \right)^{-\frac{1}{2}}$$
$$= \sqrt{\frac{4k_{\rm B}T}{R} \frac{b^2}{\mathcal{L}_0^2} \tau_0 \sqrt{1 + \frac{\mathcal{L}_0^2}{b^2} GTR\Gamma}}$$
$$= \sqrt{4k_{\rm B}T^2 C \frac{b^2}{GTR\mathcal{L}_0^2} \sqrt{1 + \frac{\mathcal{L}_0^2}{b^2} GTR\Gamma}}$$
(2.68)

となる。 くを

$$\xi \equiv 2 \sqrt{\frac{b^2}{GTR\mathcal{L}_0^2}} \sqrt{1 + \frac{\Gamma}{\frac{b^2}{GTR\mathcal{L}_0^2}}}$$
(2.69)

と定義すると、エネルギー分解能は半値全幅 (FWHM: Full-Width Half-Maximum) で

$$\Delta E_{\rm FWHM} = 2.35\xi \sqrt{k_{\rm B}T^2C} \tag{2.70}$$

となる。式 (2.69) に式 (2.30) と (2.31) を代入すると、

$$\xi = 2\sqrt{\frac{1}{\alpha \mathcal{L}_0}}\sqrt{1 + \alpha \mathcal{L}_0 \Gamma}$$
(2.71)

のように書ける。 $T_{\text{bath}} \ll T$ の場合では $\Gamma \sim 1/2$ 、 $P_{\text{b}} \sim GT/n$ 、 $\mathcal{L}_0 \sim \alpha/n$ であり、この時  $\xi$  は

$$\xi \simeq 2\sqrt{\frac{\sqrt{n/2}}{\alpha}} \tag{2.72}$$

となる。 $\alpha^{-1/2}$  に比例して、固有ノイズによるエネルギー分解能は良くなることが分かる。例えば  $\alpha \sim 1000$  の場合 には  $\xi$  は 0.1 以下にもなる。

実際には読み出し系のノイズや熱浴温度の揺らぎ、原因の不明なノイズなどによってエネルギー分解能は制限され、 一般的には式 (2.70) とは異なる依存性を持つ。パルス波形がイベントごとにばらついたり、パルスの saturation が 起こってしまう場合には、S/N 比から計算されるエネルギー分解能より実際のエネルギー分解能は悪くなる。

## 第3章 SQUID 電流計を用いた読み出し

TES の抵抗変化は擬似定電圧バイアスによって電流変化 (~ 10  $\mu$ A) として読み出す。この電流変化を精度良く読み出すためには低インピーダンスかつ高感度の電流計が必要である。TES の読み出しには高感度磁束計である超伝導量子干渉計 (SQUID: Superconducting QUantum Interference Device) が使われる。SQUID はコイルとともに使うことで高感度の電流計として用いることができる。本章では SQUID の原理および SQUID による TES の読み出し方法について述べる。

## 3.1 dc SQUID の動作原理

#### 3.1.1 原理と等価回路

2つの超伝導体の間に厚さ数 nm の薄膜をはさみ各波動関数が重なりを持つ程度に接近させると、その間に各波 動関数の位相差に比例した電流が流れる。この現象をジョセフソン効果といい、超伝導体と薄膜の接合をジョセフソ ン接合と呼ぶ。SQUID はこのジョセフソン効果を利用した素子である。本研究で使用した SQUID は我々の研究グ ループが TES の読み出しのために開発を行ってきたものである ([28, 20])。我々の研究グループでは超伝導体は Nb を使用し、薄膜 (絶縁膜) は AlO<sub>x</sub> を使用して開発を行っている。

SQUID には rf SQUID (radio frequency SQUID) と dc SQUID (direct current SQUID) がある。rf SQUID は超 伝導リングに一つのジョセフソン接合があり、dc SQUID は接合が二つある。図 3.1 に dc SQUID の模式図と等価回 路 (RCSJ モデル) を示す [4]。



図 3.1: (左図): dc SQUID の模式図、 (右図): 等価回路 (RCSJ モデル)

超伝導リング内に外部磁場 H がかけられると、2つの接合の臨界電流の和である  $I_c$  が磁束量子  $\Phi_0 = h/2e$  を周期 に変調する。この  $I_c$  を読み出せば SQUID に印加された磁場 H を精密に測定することができる。一般的には SQUD に  $I_c$  より高いバイアス電流を流し、SQUID に発生する電圧を読み出す。

ジョセフソン接合には電流 – 電圧特性にヒステリシス特性がある。バイアス電流 *I* を上げていくと、 *I*<sub>c</sub> を境に出 力が生じるが、逆に下げていく場合にはこの値を大きく下回らなければならない。SQUID を利用する際、このヒス テリシス特性は排除する必要があり、接合と並列にシャント抵抗 R を接続することで減少させることができる。電流 – 電圧特性におけるヒステリシスは Stewart-McCumber parameter

$$\beta_c = \frac{2\pi}{\Phi_0} I_0 R^2 C \tag{3.1}$$

で特徴づけられる [4, 14, 21]。ここで C は接合の容量、  $I_0$  は各接合の臨界電流である。 $\beta \ll 1$  では 接合容量 C を 無視でき、RCSJ モデルは RSJ モデルとして考えることができる。このときヒステリシスは無視できるほど微小と なり、SQUID の利用に適する。

バイアス電流 IB は接合を流れる電流をそれぞれ I1、I2 とすると図 3.1 において

$$I_B = I_1 + I_2 (3.2)$$

と書ける。ジョセフソン効果によって各接合に流れる電流は、

$$I_i = I_0 \sin(\Delta \theta_i) \tag{3.3}$$

である。ここで、 $\Delta \theta_i$ は位相差であり、

$$\Delta \theta_1 = \theta_{1A} - \theta_{1B} \tag{3.4}$$

$$\Delta \theta_2 = \theta_{2A} - \theta_{2B} \tag{3.5}$$

と表される。i = 1, 2として、位相差  $\delta_i$ と外部磁場  $\Phi_{\text{ext}}$ には

$$\Delta \theta_i = \theta_{iA} - \theta_{iB} \quad (i = 1, 2) \tag{3.6}$$

$$= 2\pi \frac{\Phi_{\text{ext}}}{\Phi_0} \tag{3.7}$$

の関係がある。また、SQUID を貫く全磁束は、外部磁束と自身が作る磁束の和で表され、

$$\Phi_{\text{total}} = \Phi_{\text{ext}} + LJ \tag{3.8}$$

となる。ここで *L* は超伝導体リングの自己インダクタンス、*J* は循環電流であり接合を流れる電流をそれぞれ  $I_1$ 、  $I_2$  とすると、 $2J = I_1 - I_2$  で与えられる。*L* が 0 のときには、バイアス電流は

$$I_{\rm B} = I_0(\sin(\Delta\theta_1) + (\Delta\theta_2))$$
  
=  $2I_0 \sin\left(\pi \frac{\Phi_{\rm ext}}{\Phi_0} + \Delta\theta_i\right) \cos\left(\pi \frac{\Phi_{\rm ext}}{\Phi_0}\right) \quad (i = 1 \text{ or } 2)$  (3.9)

となる。これより SQUID が超伝導でいることができる最大の電流である臨界電流は、

$$I_c = 2I_0 \left| \cos\left(\pi \frac{\Phi_{\text{ext}}}{\Phi_0}\right) \right| \tag{3.10}$$

となって、 $2I_0$ を振幅として外部磁場によって周期的に変動する。実際には SQUID の自己インダクタンス L が無視 できず、この変動度合いは減少する。この減少度合いは、screening parameter  $\beta_L$ 

$$\beta_L \equiv \frac{2LI_0}{\Phi_0} \tag{3.11}$$

で表現され、 $1/(1 + \beta_L)$  倍減少する。

SQUID に 2 $I_0$  より大きなバイアス電流を流すことで、電圧の出力が生じる。各接合の SQUID のシャント抵抗を R として、 $\beta \ll 1$ の時 SQUID 両端に生じる発生電圧は

$$V = \frac{R}{2}\sqrt{I^2 - I_c^2}$$
(3.12)

と表される [4]。これより SQUID の出力は、印加電圧によって周期的に変動することが分かる。

外部磁束に対する SQUID の出力変化を考える。SQUID の磁場に対する出力の傾きは 式 (3.12) を 外部磁束  $\Phi_{\text{ext}}$  で微分することで与えられ、

$$\frac{\partial V}{\partial \Phi_{\text{ext}}} = -\frac{2\pi R I_0}{\Phi_0 \sqrt{I^2 - I_c^2}} \cos\left(\pi \frac{\Phi_{\text{ext}}}{\Phi_0}\right) \sin\left(\pi \frac{\Phi_{\text{ext}}}{\Phi_0}\right)$$
(3.13)

となる。 $I = I_c$  で発散してしまうことがわかるが、実際にはノイズ等の寄与によって発散しないで有限の値となる。 式 (3.13)の最大値を磁束電圧変換係数

$$V_{\Phi} \equiv \left| \frac{\partial V}{\partial \Phi_{\text{ext}}} \right|_{\text{max}} \tag{3.14}$$

と定義する。発生電圧の peak to peak 値は、外部磁束が  $\Phi_0/2$  と 0 の場合の差で与えられ、

$$V(\Phi_{\text{ext}} = \Phi_0/2) - V(\Phi_{\text{ext}} = 0) = 2RI_0 \left(\frac{I}{2I_0} - \sqrt{\left(\frac{I}{2I_0}\right)^2 - 1}\right)$$
(3.15)

となり、 $I = 2I_0$ のときに  $RI_0$ となって最大値をとることが分かる。実際には screening parameter  $\beta_L$  によって、磁 束電圧変換係数  $V_{\Phi}$  は  $1/(1 + \beta_L)$  倍減少する。

#### 3.1.2 dc SQUID のノイズ

ジョセフソン接合のシャント抵抗で与えられるノイズのパワースペクトル S<sub>V</sub> は、

$$S_V = 4k_{\rm B}TR\tag{3.16}$$

と与えられ、これが SQUID の出力や超伝導の循環電流の揺らぎを与える。SQUID には循環電流の揺らぎ  $\delta J$  があり、これは磁束の揺らぎ  $\delta \Phi$  を与える。出力 V は磁束の関数であることから、両者は相関を持つ。

#### 3.1.3 電流計としての使用

TES の抵抗変化は数 mΩ 程度であり、擬似定電圧バイアスによって 10µA 程度の電流変化として読み出す。この 微小な電流変化を精度よく測定するには、高感度の電流計は必須である。また、TES の出力インピーダンスは 1 Ω 程度と小さいため、低インピーダンスであることが望まれる。TES の読み出しには SQUID が用いられる。SQUID は磁束量子 ( $\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$  Wb) を周期とする高感度磁束計であるが、超伝導コイルと結合させて用いれば、極 低温で TES の電流変化を読み出す電流計として使用することができる。

使用される超伝導コイルは TES と直列につなぎ、SQUID と 数十 ~ 数百 pH 程度で結合させる。両者の結合は 相互インダクタンス  $M_{\rm in}$  で決まる。この相互インダクタンスと SQUID の磁束電圧変換係数  $V_{\Phi}$  の積、

$$Z_{\rm tran} = M_{\rm in} V_{\Phi} \tag{3.17}$$

は電流を電圧に変換する係数であり、トランスインピーダンスゲインと呼ばれる。このように SQUID はコイルとも に使用することで電流電圧変換器 (トランスインピーダンスアンプ) として使用することができる。 SOUID の発熱の最大値はシャント抵抗 R として バイアス電流 I – 9I – 中力が V – DI の些で

$${
m QUID}$$
 の発熱の最大値はシャント抵抗  $R$  として、バイアス電流  $I=2I_0$ 、出力が  $V=RI$  の時で

$$P = VI = 2RI_0^2 \tag{3.18}$$

となる。

また、SQUID へ磁束が  $\Phi_{in} = \Phi_b$  と入力されているとき、バイアス電流 *I* によって出力電圧 *V* は変化する。その 微小変化量は、動抵抗として表される。

$$R_{\rm dyn} = \frac{\partial V}{\partial I}\Big|_{\Phi_{\rm in} = \Phi_{\rm b}} \tag{3.19}$$

SQUID は 1 Φ<sub>0</sub> を周期に非線型的な応答を示すので、線形範囲のみを使用しようとするとダイナミックレンジは 非常に狭い。広い範囲に対して SQUID 電流計を使用する際には、次に示すように負のフィードバックで用いる必要 がある。

## 3.2 磁束固定ループ (FLL: Flux Locked Loop)

SQUID は磁束量子  $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15}$  Wb を 1 周期とする非線型応答素子である。SQUID を電流計とし て用いる場合、コイルとは相互インダクタンス 100 pH 程度でカップルする。このコイルは TES とは直列に接続さ れる。ここで SQUID 電流計を TES の読み出しに用いるケースを考える。X 線が入射した TES に流れる電流変化 は典型的には 10  $\mu$ A 程度である。すると、SQUID への入力磁束は ~ 0.48  $\Phi_{0,0p}$  となる。SQUID の入出力の線形性 は ±0.25  $\Phi_0$  に限られるため、TES の電流変化を読み出す際、この線形範囲を超えてしまって出力が頭打ちとなって しまう。

SQUID 電流計は一般的に、広く応答に関して線形性を確保するためにに負のフィードバックのもとで用いられる。 この方式は SQUID への実質の入力磁束が一定に保たれるようにフィードバックをかけることから磁束固定ループ (FLL: Flux Locked Loop) と呼ばれる。図 3.2 に FLL の模式図、FLL のダイアグラムを図 3.3 に示す。

インプットコイルに入力された電流は相互インダクタンス  $M_{\rm in}$  によって磁束  $\Phi_{\rm in}$  に変換されて SQUID に入力さ れる。その磁束は SQUID で磁束ー電圧変換 (ゲイン  $V_{\Phi}$ ) され、室温回路に電圧として送られる。室温のプリアンプ と積分器にてゲイン  $A(\omega)$  で増幅された信号は、フィードバック抵抗  $R_{\rm FB}$  にて電流に変換されてフィードバックコ イルに送られる。フィードバックコイルは SQUID と相互インダクタンス  $M_{\rm FB}$  にて結合されており、SQUID には 磁束  $\Phi_{\rm FB}$  がフィードバックされる。FLL 回路のループゲイン  $\mathcal{L}(\omega)$  は次式で与えられる。

$$\mathcal{L}(\omega) = V_{\Phi} \frac{A(\omega)}{R_{\rm FB}} \frac{M_{\rm FB}}{\Phi_0}$$
(3.20)

フィードバックによって SQUID に実質に入力される磁束 Φ<sub>act</sub> は、

$$\Phi_{\text{act}} = \Phi_{\text{in}} - \Phi_{\text{FB}} 
= \frac{\Phi_{\text{in}}}{1 + \mathcal{L}(\omega)}$$
(3.21)

SQUID の線形性が保たれ、かつ FLL が安定して動作するためには

$$\Phi_{\rm act} < \frac{1}{4} \Phi_0 \tag{3.22}$$

である必要がある。これを超えると SQUID のゲインが逆転し FLL が成り立たなくなる。このとき SQUID の動作 点は 1 Φ<sub>0</sub> 分飛んでしまうフラックスジャンプと呼ばれる現象が生じる。フラックスジャンプを起こさないためには (3.21)、(3.22) 式より、



図 3.2: FLL の模式図



図 3.3: FLL のダイアグラム

$$\frac{\Phi_{\rm in}}{1+\mathcal{L}(\omega)} < \frac{1}{4}\Phi_0 \tag{3.23}$$

である必要がある。*L*(ω) が大きいほど広い入力に対して線形性を保証でき、かつ FLL を安定的にかけられることが わかる。

FLL をかけたとき、 SQUID の電流 – 電圧変換係数 Ξ は

$$\Xi = \frac{V_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = \frac{\mathcal{L}(\omega)}{1 + \mathcal{L}(\omega)} \frac{M_{\text{in}}}{M_{\text{FB}}} R_{\text{FB}}$$
$$\simeq \frac{M_{\text{in}}}{M_{\text{FB}}} R_{\text{FB}}$$
(3.24)

となる。ただし最後の近似式には  $\mathcal{L}(\omega) \gg 1$  を用いた。

### 3.3 グラジオメータ

SQUID はその高感度さゆえに外来ノイズに対しても非常に敏感である。したがって、通常は SQUID をマウント したステージは磁気シールドで覆う必要がある。磁気シールドが使用できない、または磁気遮蔽が十分にできない場 合にはコイルを逆向きに接合したグラジオメータが使用される。グラジオメータでは垂直方向あるいは水平方向の磁 束の差分をとることで、外来磁場を取り除く効果がある。前者を平面型グラジオメータ、後者を軸型グラジオメータ と呼ぶ。図 3.4 にグラジオメータの概念図を示す。グラジオメータはコイル同士を逆相につなぐ。これによって、実



図 3.4: (左図):磁束計 (マグネトメータ)、(中央):軸型グラジオメータ、(右図):平面型グラジオメータ

質的に入力される磁束は 2 つのリングの差分になるので、コイルの面で磁束が一様であれば、キャンセルすることが 可能となる。

## 3.4 SQUID アレイ

単体ではゲインが小さい SQUID をアレイ化することでゲインを増幅させることができる。アレイ化の利点は低温 で信号を増幅させることができるために読み出しノイズを相対的に抑えることができ、さらに SQUID 単体に比べて 室温回路とのインピーダンス整合がとりやすいことがあげられる。一般的な SQUID アレイでは dc SQUID が数十 ~数百ほどアレイ化される。図 3.5 に SQUID アレイの読み出しの概念図を示す。



図 3.5: SQUID アレイの概念図。全ての SQUID に電流を流し、アレイ両端の電圧を測定することでアレイ数に応じた出力を取り出すことができる。

ここで直列数 n、並列数 m にアレイ化した SQUID アレイを考える。SQUID 単体の場合の磁束電圧変換係数を  $V_{\Phi}$ 、電圧ノイズパワースペクトルを  $S_V$ 、電流ノイズを  $I_N$ 、トランスインピーダンスを  $Z_{tran}$ 、発熱を P とする。ま た、アレイ化の場合をそれぞれ  $\tilde{V}_{\Phi}$ 、 $\tilde{S}_V$ 、 $\tilde{Z}_{tran}$ 、 $\tilde{P}$ とする。磁束電圧変換係数と、電圧ノイズパワースペクトルは、

$$\tilde{V}_{\Phi} = nV_{\Phi} \tag{3.25}$$

$$\tilde{S}_V = nmS_V \tag{3.26}$$

となり、アレイ化にともなって増加することが分かる。fトランスインピーダンスゲイン、電流ノイズは式 (3.25)、式 (3.26) より、

$$\tilde{Z}_{\text{tran}} = M_{\text{in}}\tilde{V}_{\Phi} = nZ_{\text{tran}}$$
(3.27)

$$\tilde{I}_{\rm N} = \frac{\sqrt{S_V}}{\tilde{Z}_{\rm tran}} = \sqrt{\frac{m}{n}} I_{\rm N}$$
(3.28)

となる。直列数を増やすことによって、トランスインピーダンスゲインは増加し、また電流ノイズは減少することが わかる。発熱は、

$$\tilde{P} = nmP \tag{3.29}$$

となってアレイ化にともなって増加する。SQUID のアレイ化は、トランスインピーダンスゲインと電流ノイズの観 点で利点があるが、発熱が増大する。アレイ化数は使用する系の要求によって最適化を行えば良い。
# 第4章 低温フロントエンド部の開発

数 eV という高いエネルギー分解能を達成する TES カロリメータをアレイ化することにより、精密分光と撮像の両 立が可能となる。近年では TES は単ピクセルではなくアレイ化して用いることが多く、アレイ化と高いエネルギー 分解能の達成のための技術開発が活発に行われている。

X 線天文学の分野では TES カロリメータアレイの搭載が将来衛星で見込まれている。2020 年代初頭の打ち上げを 目指す DIOS 衛星では 256 ピクセル程度 [18]、2028 年頃打ち上げ予定の Athena 衛星では 4000 ピクセル程度を搭 載予定である。また、材料やバイオテクノロジーの分野では EDS に TES カロリメータアレイを用いることで、微 細組織の精密な化学分析が可能になり、応用が期待されている。

一方で、アレイ化の達成のためには単ピクセルの読み出しでは問題とならない技術的な課題が数多く生じてくる。 特に、100 mK 近くの冷却環境を安定して作り出さらなければならない低温フロントエンド部では顕著である。本章 では、現在我々の研究グループが進めている走査透過型電子顕微鏡の開発における低温フロントエンド部の課題につ いて整理し、解決の手法について議論を行う。合わせて、本修士論文の内容について簡潔に述べる。

# 4.1 走査透過型電子顕微鏡 (STEM: Scanning Transmission Electron Tele-scope)

序章で述べた通り、我々は透過型電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscope) に TES を搭載するこ とで 1.7 keV の X 線に対して 7.6 eV というエネルギー分解能を単素子で達成した [26]。単素子での計数率は 300 ~ 500 cps 程度であった。長時間の測定では試料のドリフトやコンタミネーションが問題となってくるために測定時間 は短いほど良い。そのため、実用的には計数率は 5 kcps が望ましいとされる。計数率の増大が今後の TEM 開発に おける重要な課題である。

計数率を増やすためには、素子の大規模化とアレイ化が考えられるが、TES は素子を大きくすると熱容量が大きく なり、エネルギー分解能の劣化を招く。したがって計数率の確保のためにはアレイ化を行い実質的な検出面積の増大 を果たすことが必須である。

我々の研究グループは TES カロリメータアレイの天文衛星搭載に向けた地上応用として TEM の検出器開発を 続けてきた [28, 25]。現在は TEM の一種である走査透過型電子顕微鏡 (STEM: Scanning TransmissionElectron Telescope) に TES カロリメータアレイを搭載するシステム (STEM–TES システム)の開発を行っている。図 4.1 に STEM–TES システムの低温フロントエンド部の概念図を示す。

STEM-TES システムでは、計数率の要求値としては 5 kcps としている。これまでの TEM 開発では 1 ピクセル の計数率が約 300 cps であった。これと同程度の計数率とすると、約 4 倍のマージンをとってアレイ化数を 64 (約 19 kcps) とした。また、エネルギー分解能の面では 10 eV (0.3 keV ~ 15 keV) 以下という目標がある。

本研究では、TES カロリメータアレイの実現に向けて、STEM–TES システムにおける低温フロントエンド部の 開発を行った。次章からは TES 64 ピクセルアレイを読み出す際、低温フロントエンド部で課題となる点について議 論する。

# 4.2 低温フロントエンド部の課題

TES カロリメータアレイを実現するためには、低温フロントエンド部の課題が大きく3つある。



図 4.1: STEM-TES システムにおける低温フロントエンド部の概念図

第一に、安定した冷却を実現できる系である必要がある。TES は 100 mK 近くの極低温で動作させなければなら ず、さらに高感度なセンサであるがゆえに温度揺らぎに対して非常に敏感である。冷凍機の冷却能力には限界があり、 特に宇宙用の冷凍機ではそれが顕著である。DIOS 衛星では 640 nW と厳しい制限があり、低温フロントエンド部で の発熱や室温配線からの熱流入は大きな問題となりうる。冷凍機の冷却能力以下の発熱を維持し、極低温ステージと 室温回路を結ぶ配線本数を削減して熱流入を抑制することが求められる。

第二に、系は可能な限りコンパクトで簡素である必要がある。極低温ステージに物や配線が多い場合、それらを配置するスペースが必要となって、系は大きくなる。これは熱容量の増加を招き、均一に冷却することが難しくなるほかに、室温回路からの熱流入も増加してしまう。特に宇宙機の場合では空間的な余裕が無く、冷凍機システムが小型化が望まれる。冷却とサイズの双方の観点から、系にはコンパクトさと簡素さが求められる。

第三に、TES のエネルギー分解能を最大限引き出す系である必要がある。先述した熱的な問題の他に、外部磁場が 分解能劣化を招く一因となる。TES は外部磁場が大きいほど温度計感度 α が減少、パルスハイトは小さくなって分 解能の劣化を招く [12, 24]。また、SQUID は、磁場の影響によって出力が減少してしまう<sup>1</sup>。一般に磁気シールドは 開口端直径が大きくなるほど侵入磁場は大きくなるので、直径を小さくするには極低温ステージの周囲に配置するこ とが好ましい。熱揺らぎを抑制する他に、外部磁場を遮蔽し、TES の分解能を最大限引き出す磁気シールドが低温フ ロントエンド部に求められる。

以下に低温フロントエンド部の各コンポーネントごとに上記の課題を解決するための視点から、その手段について 議論を行う。

#### TES, SQUID

TES を独立的に読み出す場合、極低温ステージと室温回路を結ぶ配線本数は、TES バイアス、SQUID バイアス、 SQUID 出力、フィードバックの各 2 本で合計 8 本が必要である。STEM-TES システムで 64 ピクセルを独立的に 読み出す場合には 8 × 64 = 512 本の室温配線が極低温ステージで必要である。配線本数の削減は室温配線からの熱 流入が軽減できる他に、配線や配線間ピッチが占める面積の減少や、配線の引き回し方法を簡素化できるという大き なメリットがあり、系はコンパクトになる。配線本数を削減方法としては、信号多重化やバイアス共通化といったこ とが挙げられる。

信号多重化は、我々は異なる周波数帯域 (MHz) で TES を駆動して TES の信号を変調し、室温で復調する周波数 分割方式 (FDM) による読み出しの研究開発をこれまで行ってきた [15, 27, 23, 20]。これまで TES 2 ピクセルの信 号多重化に成功し、現在は室温読み出し系のデジタル化での実証や、低温に配置する LC バンドパスフィルタの開発 を行っている。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>正確には、出力を増大するために多用されるアレイ化をされた SQUID である。



図 4.2: FDM の概念図

FDM では N ピクセルの信号多重化を行った場合に必要な室温配線が 8 本となる。例えば TES 8 ピクセルの信号 多重化を行う場合、64 ピクセルを読み出すためには室温配線は 64 本となり、実に独立読み出しの場合 (512 本) と 比較して 80 % 近く削減することが可能である。また、多重化を行う分だけ SQUID の数を減らせるというメリット があり、このケースでは SQUID 8 アレイで済む。これらの大きなメリットのために、DIOS 衛星や Athena 衛星で は FDM の採用が見込まれている [18]。一方で TES の交流駆動下での物性理解や、LC バンドパスフィルタの最適 設計等といた、直流駆動にはないコンポーネントが課題となってくる。

バイアス共通化では TES、SQUID をそれぞれ複数チャネル間で各バイアス電流を共通化する。この場合、TES は 直流駆動である<sup>2</sup>。図 4.3 にその概念図を示す。バイアス共通化を行うチャネル数を  $N_{\rm com}$ 、TES のアレイ数を  $N_{\rm array}$ とすると、必要な室温配線の本数  $N_{\rm total}$  は

$$N_{\text{total}} = (4N_{\text{com}} + 4) \times \frac{N_{\text{array}}}{N_{\text{com}}}$$

$$\tag{4.1}$$

となる。表 4.1 に  $N_{\text{array}} = 64$  とした場合について、必要な配線本数と、独立読み出し (配線本数 512 本) と比較した際の削減率の例を挙げる。

表 4.1: 64 ピクセル読み出し (N <sub>array</sub> = 64	の場合のバイアス共通化によ	る配線本数の削減
---	---------------	----------

$N_{\rm com}$	$N_{\rm total}$	削減率 (%)
64	260	49.3
32	264	48.4
16	272	46.9
8	288	43.8
4	320	37.5
2	384	25.0

例えば TES 8 ピクセル、SQUID 8 アレイ間でバイアス共通化を行った場合には 64 ピクセルの読み出しに 288 本 の室温配線が必要で、独立読み出しと比較して 40 % 以上の削減となる。バイアス共通化では、削減本数は FDM に は及ばないものの、我々は実績として直流駆動で数 eV の分解能を出している (例えば [1])。また、極低温回路、室 温回路ともに単ピクセルを読み出す際とそれほど大きな違いはなく、システム的には FDM の場合と比較してシンプ ルになる。ただし、SQUID の数は各 TES ピクセルに対して必要であるために、この場合 64 アレイが必要であり、 冷凍機の冷却能力を考慮して使用する SQUID は低発熱型を用いる必要がある。さらに、極低温ステージでの配線の 引き回し方法やボンディング等について工夫が必要となるであろう。

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>勿論 FDM と連動させて交流駆動をする手法もあるが、ここでは直流駆動に限って話を進める。



図 4.3: 直列にバイアス共通化をした場合の概念図

STEM-TES システムでは TES 64 ピクセルの読み出しをして、エネルギー分解能 10 eV という目標がある。先 行研究での実績を考え、TES の直流駆動での読み出しを STEM-TES システムでは実施したい。この観点から、直 流駆動ができるバイアス共通化での読み出しを配線本数を削減する手法として採用することとした。

先にも述べたが、バイアス共通化での一つの課題に SQUID の発熱がある。我々は以前の開発で、160 アレイ (200 nW) や 80 アレイ (90 nW) の SQUID を使用しており、発熱が問題で複数ピクセルを読む際には安定的な冷却が実現できないという問題が発生していた。

発熱の問題を解決するために、先行研究で低発熱型 SQUID に独自開発を開始した [28, 20]。目的に応じた多種多様な設計と、製作後の SQUID 評価をその都度行い、結果を設計にフィードバックさせることで技術を培ってきた。 発熱の面で言うと、SQUID 1 アレイの発熱が 20 nW で、かつ一定の性能を持つ SQUID の開発に成功している。これを用いれば 64 アレイで 1280 nW で済む計算である。

STEM–TES システムでは使用する冷凍機では、冷却能力が 100 mK で 3  $\mu$ W 程度 <sup>3</sup> であるため、SQUID 64 ア レイを動作させることは可能であると考えられる <sup>4</sup>。

続いて、TES と SQUID のバイアス共通化の数について考える。

表 4.1 にあるように、TES、SQUID それぞれ 8 チャネル以上の共通化ではそれほど削減率は変わらない。全 64 ピ クセルを共通化させたとしても、例えば 16 ピクセルを共通化させた場合と比較して、本数は 12 本しか変わらない のである。TES は X 線パルスを取得する際、最適なバイアス電流を流すことによって、その分光性能を最大限引き 出すことができる。裏を返せば各ピクセルごとに、この最適なバイアス電流が過度に異なる場合、バイアスを共通化 させた場合には分光性能を最大限引き出せずに損をしてしまう。このため、TES には共通化させたピクセル間では特 性 (*R* – *T* 特性、*I* – *V* 特性) の均一性が求められる。共通化させる数が増えるほど、均一性への要求は厳しくなる。 これらの観点から、STEM–TES システムでは TES と SQUID を 8 チャネルでバイアス共通化させることとした。

# 実装方式

電気回路において、素子間や素子 – コネクタ間の電極を電気的に接続する方法をボンディングと呼ぶ。ワイヤボン ディングによって結線をする手法が一般的に多用されている。これまで、我々の研究グループではアルミワイヤボン ディングを手動で行うことによって低温回路の電気的な接続を確立してきた。アルミは 1.2 K で超伝導となって抵抗 が 0 になることから、その温度以下の極低温では TES の信号読み出しに適している。ボンディング回数は配線本数

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>最も温度が低い mixing の近くに熱負荷を与えた場合の実験結果より。

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>DIOS 衛星では冷却能力が 640 nW であるためにバイアス共通化のみを採用することは現実的ではなく、信号多重化が必要である。

に応じて増えるが、STEM-TES システムにおいては先に述べたバイアス共通化を行っても、数百箇所のボンディン グが必要となる。この回数を手動で行うには、作業負荷や長期的な接続保証の観点から懸念がある。実際、TEM の 先行開発においては、冷却サイクルを繰り返す中でワイヤの断線や、組み込みの際の物理的な衝撃でワイヤの破損し たケースがあった。特に今回の STEM-TES システムでバイアス共通化を行う上では、例えば TES バイアスの電気 接続がなくなった場合、共通化しているピクセル数だけ X 線パルスに取得が不可能となってしまい致命的である。手 動ワイヤボンディングに頼らずに、電気的接続を保証する手法の確立が重要である。

そこで今回、STEM-TES システムではフリップチップ実装方式によってボンディングをすることとした。この手 法ではワイヤを用いずにバンプと呼ばれる突起物質を用いることで電極間の電気的接続をとる。バンプにははんだや 金、銅といった材料が主に使用され、バンプと電極パッドを加熱や加圧、接着剤の利用によって電気的な接続を確立 する。図 4.4 に概念図を示す。



図 4.4: フリップチップ実装の概念図

フリップチップ実装の利点は二点あると考えられる。まず、電極間の距離がワイヤによる方式と比較して短くなる ために電気特性が向上し、ノイズ耐性が増す。また、一度に多数の電極をボンディングできるために作業時間の短縮 が可能となる。一方で、我々の研究グループではフリップチップ実装は初の試みである。歩留まり 100 % を達成す るためにはボンディング形成プロセスの条件出しが必要であり、長時間かつ多数の冷却サイクルの中で電気接続が保 証され続けるかは実験をしてみないと分からない。

しかしフリップチップ実装方式はその利点から、将来的に数百ピクセルのアレイ化で応用できる可能性が大いに考 えられる。STEM-TES システムではそのための要素技術開発と位置づけ、このフリップチップ実装方式を採用する こととした。

## スノート

STEM-TES では TES や SQUID がマウントされる極低温ステージはプローブ状の細長い形状となる。これはス ノートと呼ばれ、希釈冷凍機の極低温ステージに接続される。TES はスノートの先端に配置され、SQUID はその発 熱が TES に伝わるのを防ぐために一定の距離を置くのが好ましい。また、1  $\mu$ W を超えうる SQUID の発熱を考え ると、希釈冷凍機の最も冷却される mixing に近い部分に SQUID を配置する方がよい。この観点から、スノートの 側面、かつ TES と一定の距離をとった mixing の近い位置に SQUID を配置にマウントすることとした。

これまでの TEM 開発で用いたスノートを図 4.5 に示す。これまでの TEM 開発で、スノート上の配線は 3 次元超 伝導配線を用いてきた [28]。STEM-TES システムでもこの超伝導配線を用いることとした。超伝導配線の本数は数 百本となるが、この歩留まりを 100 % に近づけることが重要である。歩留まりの検証はスノート製作における課題 としたい。

また、配線本数の増大や SQUID 基板の数が増えることから、スノートはこれまでの TEM 開発で使用したプロー ブ (図 4.5) と比較して大型化する。TES がマウントされるスノート先端部や SQUID がマウントされる側面が極低 温状態に安定して保たれるかどうかはスノートを実際に製作し、冷却を行ってみないと分からない。これはスノート 冷却試験を行うことで確かめたい。



図 4.5: TEM 開発で使用したスノート

#### 磁気シールド

TES はピクセルを垂直に貫く磁場によって温度計感度 α が小さくなる。その結果、パルスハイトは小さくなり、 分解能の劣化を招いてしまう [12, 24]。また、高感度磁束計である SQUID は外部磁場の影響を受けることで出力は 減少し、電流計として使用する際にゲインで損をしてしまう。

そのため、TES や SQUID は磁気シールドで周囲を覆う必要がある。STEM-TES システムではスノートとサー マルシールドの間に磁気シールドを配置する。このため、磁気シールドは低温フロントエンド部の最も外側に位置す る。系をコンパクトにするためには磁気シールドは小型であることが望まれるが、小型にしすぎると冷凍機にマウン トをする際のスノートとの干渉や、冷却サイクル中での物理的な接触が考えられて好ましくない。最適なサイズかつ 磁場を十分に遮蔽する磁気シールドを開発することが重要である。

# 4.3 本修士論文の研究内容

本修士論文では STEM-TES システムにおける低温フロントエンド部の開発を行った。以下にその内容について 簡潔にまとめる。

# バイアス共通化による読み出し

STEM-TES システムでは、スノートと室温回路を結ぶ配線本数を削減するための手法として、TES と SQUID の各バイアス電流を 8 チャネル間で共通化して読み出す。まず、STEM-TES システムで要求される SQUID の性 能について議論し、その要求値を満たすようにバイアル共通型 SQUID 基板の設計を行った。そして、プロセス後の SQUID 基板について液体ヘリウム環境下で評価試験を行い、性能が要求を満たしているかを確かめた。

#### 極低温実装

SQUID、超伝導配線、フリップチップ実装が施されたスノートの試作品の製作を行い、このスノートの冷却試験を 行った。熱容量が大きく細長い形状であるスノートの冷却の可否を、SQUID と TES がマウントされる位置に温度 計を配置することで調べた。また、フリップチップ実装方式の実証をするために、SQUID の読み出しを試みると同 時に、サーマルリサイクルに耐えうるかを調べた。

#### 磁気シールド

TES と SQUID を動作させる際には磁場を遮蔽する必要があり、STEM-TES システムにおいてはスノートを覆 う磁気シールドを開発する予定である。本修士論文では、STEM-TES システムに特化したものではないが、我々の 研究室でスノートの冷却試験を試みる際に必要となる磁気シールドの設計製作を行った。

磁気シールドは一般的に、開口端の直径が小さいほど遮蔽能力は高く侵入磁場は小さくなる。一方でスノートの最 太部の長さからある程度のマージンを取らなければ、磁気シールドの冷凍機への接続が困難となる。このため、磁気 シールドの開発には開口端直径を最適にする必要がある。そこで、有限要素法による電磁界シミュレータを用いて磁 気シールドの設計最適化を行った。このシミュレーション結果は、STEM-TES システムで製作される磁気シールド に活用される予定である。

#### X線照射試験および追実験

バイアスを共通化した TES と SQUID を用いて、読み出し方法の実証と課題点の洗い出しを目的として X 線照射 実験を行い、TES 7 ピクセルでの X 線パルスの取得を試みた。予備実験では、使用する TES の基本特性を知り、バ イアス共通化での読み出しを行った際の課題を明らかにすることを主目的として独立読み出しでの X 線照射実験を TES 3 ピクセルを用いて行った。両実験を比較することによって、バイアス共通読み出しでの課題について議論をし た。また、見つかった課題を解決するための追実験を行った。

本修士論文は STEM-TES システムに TES カロリメータアレイを搭載することに向けた開発を行ったが、扱った いずれの技術開発は TES カロリメータアレイを実現する上では広く応用が効くものである。私は将来、数百ピクセ ル以上の TES カロリメータアレイを実現する上においても、本研究は基盤となる技術開発であると位置づけ、研究 に着手した。

# 第5章 バイアス共通化による読み出し

# 5.1 **目的**

STEM-TES システムでは極低温ステージにおける配線本数を削減するために、TES と SQUID それぞれ 8 チャ ネル間でバイアス電流の共通化を行う。本章では、バイアス共通化を行うことで発生すると考えられるクロストーク について考察を行った。次に、STEM-TES システムで SQUID に求められる性能について整理を行った。次に、要 求を満たす SQUID を開発するために先行研究 [20, 28] によって開発された低発熱型 SQUID をベースとして、バイ アス電流共通型 SQUID の設計を行ったプロセス後の SQUID に関して試験を行い、性能が要求を満たしているかを 確かめた。本章ではこれらの詳細について述べる。

本研究における SQUID の開発には産業技術総合研究所 (AIST) の御協力を頂き、超伝導アナログ – デジタル用ク リーンルーム (CRAVITY) にてプロセスを行った。

# 5.2 バイアス共通化

TES、SQUID 8 チャネル間でバイアスを共通化させることで、配線本数を 40 % 以上削減することが可能となる。 ここでは、バイアスを共通化させることで考えられる懸念点である特性の均一性と、クロストークについて議論する。 バイアスを共通化させる手段として、直列に共通化、並列に共通化の二つが挙げられる。双方の場合のクロストーク の大きさを見積もり、採用する読み出し方法を決定する。

クロストークの大きさとしては 5.9 keV の MnKα X 線に対して 10 eV を達成するための一つの指標として、0.2 eV/5.9 keV ~ 0.2 % を要求値とする。共通化の方法を選ぶ際には、この要求値を満たしているかどうかを考慮する こととする。

#### 5.2.1 TES のバイアス共通化

#### ピクセル間の特性のばらつき

TES は適切なバイアス電流を流すことでパルスを取得する際の動作点を遷移端に置く。TES はバイアス電流の値 によってそのパルスハイト、ノイズレベルは大きく変化する。バイアスを共通化させることで、TES 8 ピクセルそれ ぞれにとって最適な動作点を選ぶことは不可能となるものの、8 ピクセル間で特性 (*R* – *T* 特性、*I* – *V* 特性) が均一 であれば、あるバイアス電流を選んだ時の抵抗値を揃えることができる。ばらつきの許容値は最終的にはエネルギー 分解能で評価される。特性の均一さは TES の素子製作によって決まり、製作前段階では不明な点が多い。このため、 TES の特性の均一さの追求は STEM–TES システム開発を進めていく上での課題としたい。

#### TES の抵抗変化がもたらすクロストーク

TES に X 線が入射すると数 mΩ の抵抗変化が起きる。バイアス抵抗を用いて定電流を流す場合、この TES の抵 抗変化によって TES バイアス電流が変化する。TES バイアス電流の変化は、X 線が入射していない他のチャネルに も伝わり、クロストークとなって出力に現れる。ここでは、クロストークの大きさについて見積もる。

図 5.1 左図のように並列に接続した場合を考える。共通化数を n、TES の X 線入射前の抵抗値を R<sub>T</sub>、入射後の



図 5.1: TES のバイアス共通化の概念図。(左図): 並列にバイアスを共通化させた場合、(右図): 直列にバイアスを共 通化させた場合

抵抗値を $R_T'$ 、シャント抵抗の値を $R_s$ とする。また、TES バイアス電圧を $V_{TB}$ 、TES バイアス抵抗を $R_{TB}$ とする。このとき、X線入射前の TES n ピクセルとシャント抵抗の合成抵抗 R は、

$$R = \left(\frac{1}{R_{\rm s}} + \frac{n}{R_{\rm T}}\right)^{-1} \tag{5.1}$$

となる。このとき、TES バイアス電流 I<sub>TB</sub> は、

$$I_{\rm TB} = \frac{V_{\rm TB}}{R_{\rm TB} + R} \tag{5.2}$$

と表される。TES1ピクセルへ流れる電流 I は、

$$I = \frac{R}{R_{\rm T}} I_{\rm TB} \tag{5.3}$$

となる。X 線が ある TES に入射すると、その抵抗値<br/>が $R_{\rm TES}'$ に変化する。入射後の TES n ピクセルとシャント抵抗の合成抵抗を<br/> R'とすると、

$$R' = \left(\frac{1}{R_{\rm s}} + \frac{n-1}{R_{\rm T}} + \frac{1}{R_{\rm T}'}\right) \tag{5.4}$$

と変化する。入射後の TES バイアス電流 を  $I_{TB}'$  とすると、

$$I_{\rm TB}' = \frac{V_{\rm TB}}{R_{\rm TB} + R'}$$
(5.5)

である。この電流変化によって、X線が入射していない TES1ピクセルあたりに流れる電流 I' は、

$$I' = \frac{R'}{R_{\rm T}} I_{\rm TB}' \tag{5.6}$$

と変化する。TES1ピクセルを流れる電流の変化がクロストークを及ぼすと考えられ、その寄与を

$$\frac{\delta I}{I} = \frac{I' - I}{I} \tag{5.7}$$

#### として見積もることとする。

クロストークの見積もりのために、典型的なパラメータの値を表 5.1 のように設定する。このとき、TES を並列に 接続した場合のクロストークについて、計算結果を図 5.2 に示す。図 5.2 では、入射前の TES 抵抗に対する *δI/I* の 計算結果を示している。

表 5.1: クロストーク見積もりのための設定値					
項目		値 (並列)	値 (直列)		
共通化数	n	8	3		
バイアス電圧	$V_{\rm TB}$	10 V			
バイアス抵抗	$R_{\rm TB}$	2 1	xΩ		
シャント抵抗	$R_{\rm s}$	$5/n \ \mathrm{m}\Omega$	$5~\mathrm{m}\Omega$		
X 線入射前 TES 抵抗值	$R_{\mathrm{T}}$	$10 \sim 1$	$00 \ \mathrm{m}\Omega$		
X 線入射後 TES 抵抗値	$R'_{\mathrm{T}}$	$R_{\mathrm{T}} + \$$	$50 \ \mathrm{m}\Omega$		



図 5.2: TES を並列に接続した場合のクロストーク

図 5.2 より、X 線入射前の TES の抵抗値が 50 mΩ の場合、0.57 % であり、クロストークの許容値である 0.2 % を超えている。

次に、TES を直列に接続し、バイアスを共通化した場合のクロストークを考える。X 線が入射する前の TES と シャント抵抗の合成抵抗を R<sub>1</sub>、TES n ピクセルとシャント抵抗が作る合成抵抗を R とすると、

$$R_{1} = \left(\frac{1}{R_{\rm s}} + \frac{1}{R_{\rm T}}\right)^{-1} \tag{5.8}$$

$$R = n \left(\frac{1}{R_{\rm s}} + \frac{1}{R_{\rm T}}\right)^{-1} \tag{5.9}$$

である。TES とシャント抵抗に流れるバイアス電流 ITB は、

$$I_{\rm TB} = \frac{V_{\rm TB}}{R + R_{\rm TB}} \tag{5.10}$$

1 ピクセルに流れる電流 I は、

$$I = \frac{R_1}{R_{\rm T}} I_{\rm TB} \tag{5.11}$$

である。1 ピクセルに X 線が入射して抵抗値が  $R_{
m T}$  から  $R_{
m T}'$  に変化すると、TES とシャント抵抗による合成抵抗は

$$R' = \left(\frac{1}{R_{\rm s}} + \frac{1}{R_{\rm T}'}\right)^{-1} + (n-1)\left(\frac{1}{R_{\rm s}} + \frac{1}{R_{\rm T}}\right)^{-1}$$
(5.12)

となる。このとき、TES1ピクセルに流れる電流 I' は

$$I' = \frac{R_1}{R_T} I_{TB}' \tag{5.13}$$

$$= \frac{R_1}{R_{\rm T}} \frac{V_{\rm TB}}{R' + R_{\rm TB}} \tag{5.14}$$

と変化する。式 (5.7) と同様に、 $\delta I/I$  を計算した結果を図 5.3 に示す。計算に必要なパラメータは表 5.1 に示したものを用いた。また、図 5.3 では図 5.2 と同様に、X 線入射前の TES の抵抗値  $R_{\rm T}$  に対するクロストークの応答を結果として示した。



図 5.3: TES を直列に接続した場合のクロストーク

図 5.3 より、例えば  $R_{\rm T} = 50 \ {\rm m}\Omega$  の時にはクロストークの寄与は  $10^{-5}$  % であり、並列に接続した場合に比べて 4 桁以上小さい。また、この大きさは要求値である 0.2 % を大きく下回る計算結果である。

TES のバイアス共通化の方法に関してはこのクロストークの計算結果より、直列化を採用することとする。

#### 5.2.2 SQUID のバイアス共通化

SQUID はバイアス電流を共通化させることにより、各 SQUID を最適な動作点に置くことは難しくなる。一方で、 各 SQUID に対して磁束や電圧のオフセットを設定することが可能であり、各 SQUID の動作点の選定では比較的自 由度が高い。このため、TES に比べて SQUID への性能の均一さへの要求は厳しくはない。よって、ここでは SQUID のバイアスを共通化させることによるクロストークのみについて議論する。

#### SQUID の動抵抗変化がもたらすクロストーク

X 線が入射した TES を読み出す SQUID は、入力される磁束が変化するために動抵抗が変化する。ここで動抵抗 は、SQUID への磁束が  $\Phi_{in} = \Phi_b$  と入力されているとき、バイアス電流 I と出力電圧 V の各微小変化で定義される。

$$R_{\rm dyn} = \frac{\partial V}{\partial I}\Big|_{\Phi_{\rm in} = \Phi_{\rm b}} \tag{5.15}$$

動抵抗の変化は SQUID バイアス電流の変化となり、他のチャネルにクロストークとして現れることが考えられる。 ここではそのクロストークについて考える。

図 5.4 左図のように、SQUID を並列に接続してバイアスを共通化させた場合を考える。まず、X 線入射前の状態



図 5.4: SQUID のバイアス共通化の概念図。(左図): 並列にバイアスを共通化させた場合、(右図): 直列にバイアスを 共通化させた場合

では並列に接続された SQUID n チャネルの各動抵抗を  $R_{dvn}$ 、それらの合成抵抗を  $R_{SQ}$  とすると、

$$R_{\rm SQ} = \frac{R_{\rm dyn}}{n} \tag{5.16}$$

であり、SQUID バイアス電流 I<sub>SB</sub> は SQUID バイアス電圧 V<sub>SB</sub>、SQUID バイアス抵抗 R<sub>SB</sub> を用いて、

$$I_{\rm SB} = \frac{V_{\rm SB}}{R_{\rm SB} + R_{\rm SQ}} \tag{5.17}$$

と表される。SQUID 1 チャネルに流れるバイアス電流 I は、

$$I = \frac{R_{\rm SQ}}{R_{\rm dyn}} I_{\rm SB} \tag{5.18}$$

である。X 線入射後に 1 つの SQUID の動抵抗が  $R_{dyn}$  から  $R_{dyn}'$  と変化した時、合成抵抗は  $R_{SQ}$  から

$$R_{\rm SQ}' = \left(\frac{1}{R_{\rm dyn}'} + \frac{n-1}{R_{\rm dyn}}\right)^{-1}$$
(5.19)

へと変化する。変化後の SQUID バイアス電流  $I_{SB}'$ は、

$$I_{\rm SB}' = \frac{V_{\rm SB}}{R_{\rm SB} + R_{\rm SQ}'}$$
(5.20)

となり、変化後の SQUID 1 チャネルに流れるバイアス電流 I' は、

$$I' = \frac{R_{\rm SQ}'}{R_{\rm dyn}} I_{\rm SB}' \tag{5.21}$$

となる。クロストークの寄与  $\delta I/I = (I' - I)/I$  に関して計算した結果を図 5.5 に示す。図 5.5 では、X 線が入射す る前の SQUID の動抵抗を 100 ~ 300  $\Omega$  の範囲での結果を示した。また、計算に必要なパラメータは表 5.2 に示した ものを用いた。

表 5.2: SQUID のクロストーク見積もりのための設定値

項目		値
共通化数	n	8
バイアス電圧	$V_{\rm SB}$	2.0 V
バイアス抵抗	$R_{\rm SB}$	100 k $\Omega$
X 線入射前の動抵抗	$R_{\rm dyn}$	$100\sim 300~\Omega$
X 線入射後の動抵抗	$R_{\rm dyn}'$	$R_{\rm dyn} + 50 \ \Omega$



図 5.5: SQUID を並列に接続し、バイアスを共通化した場合のクロストーク

図 5.5 より、SQUID を並列に接続した場合のクロストークは、数 % のオーダーであることが分かる。例えば典型 的な動抵抗の値である 200 Ω では、クロストークは 2.5 % 程度である。これは要求値である 0.2 % に比べて一桁大 きい値である。

次に、SQUID を直列に接続してバイアスを共通化させた場合 (図 5.4 右図) を考える。n チャネルの SQUID の合成抵抗  $R_{SQ}$  は  $R_{SQ} = nR_{dyn}$  であり、X 線入射前の SQUID バイアス電流は、

$$I_{\rm SB} = \frac{V_{\rm SB}}{R_{\rm SB} + R_{\rm SQ}} \tag{5.22}$$

である。SQUID は直列に接続されているので、各 SQUID に流れる電流 I は SQUID バイアス電流 I<sub>SB</sub> に等しい。

よって、

$$I = I_{\rm SB} \tag{5.23}$$

$$= \frac{V_{\rm SB}}{R_{\rm SB} + R_{\rm SQ}} \tag{5.24}$$

X 線が入射した時、そのチャネルの動抵抗は  $R_{\rm dyn}$  から  $R_{\rm dyn}'$  へと変化する。入射後の SQUID の合成抵抗を  $R_{\rm SQ}'$  とすると、

$$R_{\rm SQ}' = (n-1)R_{\rm dyn} + R_{\rm dyn}' \tag{5.25}$$

と表せる。これより、X 線入射後の SQUID バイアス電流  $I_{SB}'$  および各 SQUID に流れる電流 I' は、

$$I' = I_{\rm SB}' \tag{5.26}$$

$$= \frac{V_{\rm SB}}{R_{\rm SB} + R_{\rm SQ}'} \tag{5.27}$$

となる。表 5.2 の値を用いてクロストークの寄与  $\delta I/I = (I' - I)/I$  を計算した結果を図 5.6 に示す。図 5.6 では、X 線が入射する前の SQUID の動抵抗を 100 ~ 300  $\Omega$  の範囲でのクロストークの計算結果を示した。



図 5.6: SQUID を直列に接続し、バイアスを共通化した場合のクロストーク

図 5.6 より、SQUID を直列に接続した場合のクロストークは、1 % 以下のオーダーであることが分かる。例えば 典型的な動抵抗の値である 200 Ω では、クロストークは 0.15 % 程度である。これは要求値である 0.2 % に比べて 小さい。また、SQUID を並列に接続して共通化した場合と比較して一桁小さい値である。よって、SQUID のバイア ス共通化も TES と同じく、直列に接続する方法を採用することとする。

# 5.3 バイアス共通型 SQUID の設計

5.2 で行ったクロストークの計算結果より、TES と SQUID のバイアスを共通化させるために直列に接続する方法 を採用することとした。

ここではバイアスを共通化させるために必要な低温基板の設計について述べる。この低温基板では、TES と SQUID の各 8 チャネル間でバイアスを共通化を実現し、スノート上で配線が可能となるようにレイアウト設計を行うことが 求められる。 基板上に配置する SQUID は、先行研究 [28, 20] によって開発されたものを用いる。SQUID はコイルとともに用 いることで電流電圧変換器 (トランスインピーダンスアンプ) と使用することができる。その性能はトランスインピー ダンスゲイン  $Z_{\text{tran}}$ 、発熱 P、電流ノイズ  $I_N$ 、動抵抗  $R_{\text{dyn}}$ 、コイルとの相互インダクタンス  $M_{\text{in}}$ 、 $M_{\text{FB}}$ で決まる。 これら性能について STEM–TES システムでの要求を満たす SQUID を製作するために最適な設計を行う。

#### 5.3.1 設計目標

STEM-TES システムで SQUID の性能において特に重要となる トランスインピーダンスゲイン  $Z_{\text{tran}}$ 、発熱 P についてその設計目標を述べる。

トランスインピーダンスゲイン  $Z_{\text{tran}}$  は、TES の典型的な電流ノイズ ~ 20 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$  と室温プリアンプの入力電 圧ノイズの観点から考える。TES の分解能を劣化させないためには、SQUID によって増幅された TES の電流ノイ ズがこのプリアンプの入力電圧ノイズよりも大きければよい。STEM–TES システムでは仕様が ~ 2 nV/ $\sqrt{Hz}$  程度 である FET アンプをプリアンプとして使用することとしている。したがって、設計する SQUID は  $Z_{\text{tran}} > 100 \Omega$ は欲しい。よって  $Z_{\text{tran}} = 100 \Omega$  を目標値とし、75  $\Omega$  を許容値とすることとした。

発熱 *P* は冷凍機の冷却能力の観点から考える。STEM–TES システムで使用する冷凍機の冷却能力はスノートを 100 mK で維持するためには 3  $\mu$ W 程度である。この値から SQUID は 64 アレイ必要であるために、1 アレイでの 発熱は 47 nW 以下である必要がある。また、300 本程度となる室温配線からの熱流入を考えると発熱はさらに小さ くなければならない。これら観点から、SQUID 1 アレイあたりの発熱は *P* = 20 nW を目標値、40 nW を許容値と した。

今回、低発熱型と同時に高ゲイン型 SQUID の開発も同時に行った。この SQUID に関してはゲイン、発熱ともに 低発熱型 SQUID の 2 倍の目標値と許容値を設け、この高ゲイン型 SQUID は発熱が低発熱型と比較して大きいこと から、冷凍機の冷却能力に余裕があり、TES の読み出しで S/N 比を向上させたいときに使用したいと考えている。 表 5.3 にバイアス電流共通型で開発する SQUID アレイの設計目標についてまとめる。

X O.S. SQUE / FISIKITEK						
性能パラメータ	記号	低発熱型		号 低発熱型 高ゲー		イン型
		目標値	許容値	目標値	許容値	
トランスインピーダンスゲイン	$Z_{\mathrm{tran}}(\Omega)$	> 100	> 75	> 200	> 150	
発熱	P (nW)	< 20	< 40	< 40	< 80	

表 5.3: SQUID アレイの設計目標

我々はこれまで TES の読み出しのための SQUID の開発を独自に行ってきた。宇宙科学研究所 SQUID アレイシ リーズ (ISAS SQUID Array Series: ISAS) として目的に応じて多様な設計がなされ、7 種類の SQUID アレイの開 発がこれまで行われた。先行研究 [28, 20] によって開発されたこれらの SQUID の性能について、表 5.4 にまとめる。 本研究ではこの ISAS SQUID Array Series を用いて、表 5.3 を満たすバイアス電流共通型 SQUID を設計する。

SQUID のアレイ数を考える。SQUID の直列アレイ数をn、並列アレイ数をmとすると、トランスインピーダンスゲイン  $Z_{\text{tran}}$ 、発熱 P は以下の関係がある。

$$Z_{\rm tran} \propto n R I_0 M_{\rm in}$$
 (5.28)

$$P \propto nmRI_0^2$$
 (5.29)

2 式よりアレイ化数の増加にともないトランスインピーダンスゲイン、発熱が増えることが分かる。さらに、臨界電流値 *I*<sub>0</sub> が重要なパラメータであることが分かる。

AX 0.4.	X 5.4. ISAS SQUID ATTAY Series (7) Eff2 [28, 20]						
性能項目	記号	$^{\rm A,C}$	В	D	Е	G	Η
臨界電流密度	$J_{\rm c}~({\rm kA/cm^2})$	1.0	1.0	1.0	2.5	1.0	1.0
接合面積	$A~(\mu { m m}^2)$	1.0	1.0	2.0	1.0	0.81	1.0
シャント抵抗	$R~(\Omega)$	10	15	8	10	10	10
自己インダクタンス	L (pH)	100	100	50	40	120	100
Stewart-McCumber パラメータ	$eta_{ m C}$	0.182	0.410	0.448	0.456	0.120	0.182
Screening パラメータ	$eta_{ m L}$	0.967	0.967	0.948	0.948	0.940	0.967
	$I_0$ ( $\mu$ A)	10	10	20	25	8.1	10
トランスインピーダンスゲイン	$Z_{ m tran}$ ( $\Omega$ )	7.0	10.6	5.3	7.2	6.9	7.0
発熱	P (nW)	2.0	3.0	6.1	12.5	1.3	2.0
発熱に対するゲイン	$Z_{\rm tran}/P~(\Omega/{\rm nW})$	3.5	3.5	0.87	0.58	5.3	3.5
電流ノイズ (4.2 K)	$I_{\rm N}~({\rm pA}/{\sqrt{{\rm Hz}}})$	13.5	11.0	16.3	13.6	13.6	13.5
動抵抗	$R_{ m dyn}(\Omega)$	7	11	6	7	7	7
入力コイル相互インダクタンス	$M_{\rm in}~({\rm pH})$	75	75	35	40	90	75

表 5.4: ISAS SQUID Array Series の性能 [28, 20]

まず、低発熱型 SQUID の設計を考える。発熱に対するゲイン、 $Z_{\text{tran}}/P$  が 5.3  $\Omega/\text{nW}$  と最も優れている ISAS-G が まずは候補となる。トランスインピーダンスが目標値を満たす最小アレイ数として 15 アレイ化すると、 $Z_{\text{tran}} = 103 \Omega$ 、 P = 20 nW となっていずれも目標値を満たす。これを ISAS-G15 として低発熱型 SQUID アレイの候補とする。

ISAS-G は接合面積 0.81  $\mu$ m<sup>2</sup> と小さい。これまでの開発で、プロセスにおいて接合面積が小さくなり臨界電流値 が設計値に比べて小さくなるという結果がある。臨界電流値が小さくなると、発熱は抑えられるがゲインも減少して しまう。ISAS-G より接合面積 (臨界電流値) が大きく、 $Z_{tran}/P$  が優れているのは ISAS-A、C、H で、これを用い て低発熱型の開発も行うこととする。

ISAS-A と ISAS-H は SQUID とコイルの位置関係が異なるのみで、性能は同一だが両者の結合定数の観点では ISAS-H の方が優れている。ISAS-H を発熱が許容値を超えない範囲でアレイ化すると、20 アレイとなる。このとき  $Z_{\text{tran}} = 141 \Omega$ 、P = 40 nWとなる。これを ISAS-H20 として安定した臨界電流値を実現するという位置づけで候補 とする。

ISAS-C は ISAS-A に外部磁場耐性を持たせたグラジオメータ型 SQUID である。今回、低発熱型かつ磁場耐性を 両立する SQUID アレイを設計したい。ISAS-C の接合面積 A のみを ISAS-G と同一の 0.81  $\mu$ m<sup>2</sup> とする ISAS-J を 新たに設計する。この ISAS-J を 16 アレイ化すると  $Z_{tran} = 94 \Omega$ 、P = 21 nW となる。トランスインピーダンスゲ インは目標値には届かないが、発熱を抑えたいためにあまりアレイ数は多くできない。これを ISAS-J16 として低発 熱かつ磁場耐性をもった SQUID アレイという位置づけで候補とする。

次に、高ゲイン型 SQUID アレイを1つ設計する。トランスインピーダンスゲイン、発熱ともに目標値を満たすためには ISAS-G を 30 アレイ化すると良い。このとき  $Z_{tran} = 206 \Omega$ 、P = 40 nWとなる。これを ISAS-G30 として高ゲイン型として採用することとする。表 5.5 にバイアス共通型で設計する SQUID アレイのパラメータについてまとめる。

表 5.5: 表 5.4 をもとに計算したバイアス共通型 SQUID アレイの設計値

		佢	5発熱型	ĩ	高ゲイン型
性能項目	記号	G15	H20	J16	G30
トランスインピーダンスゲイン	$Z_{\mathrm{tran}}(\Omega)$	103	141	94	206
発熱	P (nW)	20	40	21	40

# 5.3.2 STD3 による SQUID 製作プロセス

本開発では SRL 10 kA/cm<sup>2</sup> Nb 標準プロセス (STD3) にて SQUID のプロセスを行った。以下に STD3 の概要に ついて述べる。

STD3 は、超伝導工学研究所 (SRL) の 臨界電流密度 2.5 kA/cm<sup>2</sup> Nb 標準プロセス 2 (STD2) を基本にし、臨界 電流密度 10 kA/cm<sup>2</sup> のアドバンストプロセス (ADP) の成果を取り入れたものである [17]。図 5.7 に STD3 のデバ イス構造を示す。



図 5.7: STD3 のデバイス構造 [17]。

導電層は GP、BAS、COU、CTL の4層からなり、膜厚は図 5.7 に示した通り、300~500 nm である。表 5.6 に 各層の詳細についてまとめる。AU 層と PL 層 (Au) は必要に応じて付加するもので、本開発では電極パッドに使用 した。抵抗は標準ではモリブデンであるが 1 K 程度で超伝導転移をしてしまうので、TES の動作温度 ~100 mK で は使用できない。そこで本開発では代わりにパラジウム金 (Pd/Au) を用いた。また、本開発では臨界電流密度 10 kA/cm<sup>2</sup> は大きすぎるために、1 kA/cm<sup>2</sup> を用いた。

#### 5.3.3 基板設計

基板レイアウト設計 CAD ツールには 米 Whiteley Research 社の Xic (Version 3.2.30) を用いた。Xic はレイアウトデータを電磁界解析ツールの FastCap/FastHenry へ直接連携することが可能であり、インダクタンス計算や抵抗 値の計算等を行う SQUID 設計では非常に便利な CAD ツールである。

設計する SQUID 基板は 5 mm 角とした。この基板上にバイアスを共通化させる SQUID 8 アレイの設計を行うと ともに、TES 8 ピクセルのバイアスを共通化するように配線のレイアウト設計を行う。本開発では TES の立ち上が り時定数を大きくする効果を持たせるためのダンピングコイルを設計した。そのインダクタンスの値  $L_{damp}$  は 0 ~ 500 nH とした。本論文では同一の SQUID アレイでも  $L_{damp}$  の値で SQUID 基板を区別し、例えば H20 (250 nH)、 G15 (500 nH) というように表記する。

電極パッドは 150  $\mu$ m<sup>2</sup> 角とし、パッド間のピッチは 100  $\mu$ m<sup>2</sup> とした。電極パッドは基板の 4 面に配置されている。そのうち 3 面は室温配線用であり、合計 36 個配置されている。残る 1 面は TES と結線される電極パッドであり、16 個配置されている。

TES に並列に接続されるシャント抵抗は全てのレイアウトで 5 m $\Omega$  として設計を行った。図 5.8 に設計した基板 のレイアウト図を示す。

	X 5.0. 51D5 9 盾件风 [1	<i>1</i> ] <sub>0</sub>	
レイヤ名	機能	材料	膜厚 (nm)
GP	グランド面	Nb	300
	層間絶縁膜	$\mathrm{SiO}_2$	150
RES	抵抗 (Mo)	Mo	35
	層間絶縁膜	$\mathrm{SiO}_2$	150
$\mathbf{RC}$	RES/BAS 間のコンタクト		
$\operatorname{GC}$	GP/BAS 間のコンタクト		
BAS	接合の下部電極および下部配線	Nb	300
JP	接合のプロテクション	Al, AlOx	
JJ	接合	Nb	150
	JJ のプロテクション (陽極酸化)	$Nb_2O_5$	(20)
	層間絶縁膜	$SiO_2$	400
BC	BAS/COU 間のコンタクト		
$\operatorname{JC}$	JJ/COU 間のコンタクト		
COU	接合の上部電極および上部配線	Nb	400
	層間絶縁膜	$SiO_2$	500
$\mathbf{C}\mathbf{C}$	COU/CTL 間のコンタクト		
$\operatorname{CTL}$	最上部の配線またはシールド層	Nb	500
AU	パッド用金スパッタ	Au	300
PL	パッド用金めっき	Au	3000

表 5.6: STD3 の層構成 [17]。

# 5.4 SQUID アレイの評価

本開発では4種類のバイアス共通型 SQUID アレイの開発を行った。STD3 による SQUID 基板プロセス後、SQUID の性能が設計目標を満たしているかを調べるために評価実験を行った。また、ノイズレベルを知るためにノイズスペクトルの取得を行った。

#### 5.4.1 測定方法

測定は液体ヘリウム環境下で行った。測定では、プローブの先端に SQUID 基板をマウントし、それを液体ヘリウムを溜めたデュワーに挿入することで SQUID を超伝導状態にして測定を行った。磁気シールドにはクライオパームを使用し、外部磁場を遮蔽した。図 8.4 に製作した低温ステージの例を示す。

G15、J16、G30 の測定にはマルチチャネル駆動回路を用いた。この駆動回路は最大 10 チャネルを読み出し可能な ヘッドアンプと連動している。また、SQUID コントロール PC と接続されており、バイアス電流やフィードバック (FLL) の ON/OFF 等の操作を PC から簡易的に行う事ができる。ヘッドアンプの仕様は付録 A の表 C.2 に示した 通りである。

H20 の測定には Magnicon 社 XXF-1 を使用した。XXF-1 を使用することによって TES と SQUID に流す電流 や、SQUID のフィードバックの制御等をコンピュータから簡易的に行うことが可能となる。XXF-1 の主な仕様は付録 A の表 C.1 に示した通りである。

SQUID の基本的な特性は  $\Phi - V$  特性から評価することができる。 $\Phi - V$  特性から臨界電流値  $I_0$ 、相互インダク タンス  $M_{\rm in}$ 、 $M_{\rm FB}$ 、トランスインピーダンスゲイン  $Z_{\rm tran}$ 、動抵抗  $R_{\rm dyn}$  を求めることができる。

トランスインピーダンスゲインの導出方法を述べる。入力コイルに電流を入力すると SQUID は周期を 1  $\Phi_0$  とする応答を示す。SQUID の 1 周期に相当する電流を求めれば、その 1  $\Phi_0 = 2.07 \times \text{Wb}$  をその電流値で割ることによっ



図 5.8: 設計した SQUID 基板のレイアウト図。(左上): ISAS-G15 (500 nH)、(右上): ISAS-H20 (250 nH)、(左下): ISAS-J16 (0 nH)、(右下): ISAS-G30 (500 nH)。基板はいずれも 5 mm 角である。電極パッドは各基板に 36 箇所あ り、いずれも一辺が 150 µm の正方形である。

て、入力コイル相互インダクタンス  $M_{\rm in}$  が求まる。(同様にフィードバックコイルに電流を流せば  $M_{\rm FB}$  が求まる。) 取得した  $\Phi - V$  特性を連続的に直線フィッティングすることで、傾き  $\partial V/\partial \Phi$  が求まる。本測定では、 $0 \sim 0.5 \Phi_0$  に おける  $\Phi - V$  特性の傾きを磁束 – 電圧変換係数  $V_{\Phi}$  とした。トランスインピーダンスゲインは

$$Z_{\rm tran} = M_{\rm in} V_{\Phi} \tag{5.30}$$

で求めることができるので、先述の方法で求めた $M_{\rm in}$ をこの $V_{\Phi}$ にかけてやればよい。

発熱の評価方法を述べる。 $\Phi - V$ 特性でコイルを介した入力信号が 0  $\Phi_0$  のとき、SQUID バイアス電流  $I_{SB}$  をあ げていくとある電流値で SQUID の出力が 0 でなくなる。このときの  $I_{SB}$  は臨界電流値  $I_0$  と

$$I_{\rm SB} = 2I_0$$
 (5.31)

の関係があり、ここから臨界電流値を求めることができる。SQUID の発熱は接合部のシャント抵抗 R で発生する ジュール熱であり、その最大発熱量 P は

$$P = n \times 2RI_0^2 \tag{5.32}$$



図 5.9: SQUID 基板をプローブにマウントした低温ステージ

で求まる。ただし n は SQUID の直列アレイ数である。この値を発熱量として評価することとする。

本測定で  $\Phi - V$  特性の取得には 入力コイル (またはフィードバックコイル) に周期 1 Hz の sin 波を入力し、その 入力信号と open loop での SQUID 出力波形を取得することで測定した。波形取得には横河波形取得器 DL708E を 使用した。

ノイズの測定方法を述べる。ノイズは SQUID 動作点が 0.25  $\Phi_0$  での出力電圧ノイズを FFT アナライザで取得し、 それを SQUID の入力に換算することで評価した。FFT アナライザは HP 社の 35670A を使用した。ノイズは open loop (開ループ) のときと FLL (閉ループ) の場合で取得を行った。

35670A で取得するノイズは電圧ノイズであり、SQUID のノイズを評価するには SQUID の入力電流換算する必要がある。open loop の場合、ヘッドアンプのゲインを G、測定した SQUID の動作点でのトランスインピーダンス ゲインと  $Z_{\text{tran}}$ 、35670A で測定したノイズを  $V_{\text{N}}$  とすると、open loop での SQUID の入力電流換算されたノイズ  $I_{\text{N, open}}$  は

$$I_{\rm N, \ open} = \frac{V_{\rm N}}{GZ_{\rm tran}} \tag{5.33}$$

で求めることができる。FLL で取得した場合、同様に取得した電圧ノイズを入力電流換算した *I*<sub>N, FLL</sub> は、回路の ループゲインが1に比べて十分大きい場合の近似式で相互インダクタンス *M*<sub>in</sub>、*M*<sub>FB</sub>、フィードバック抵抗 *R*<sub>FB</sub> より

$$I_{\rm N, \ FLL} = \frac{M_{\rm in}}{M_{\rm FB}} \frac{V_{\rm N}}{R_{\rm FB}} \tag{5.34}$$

より求めることができる。ただし、測定するノイズは SQUID に由来するもの以外にプリアンプのノイズや外来ノイズまでを含めたものである。

図 5.10 に室温回路としマルチチャネル駆動回路を使用した測定セットアップ図を示す。

#### 5.4.2 測定結果

#### ISAS-G15の測定

低発熱型である ISAS-G15 の設計値は、臨界電流値  $I_0 = 8 \mu A$ 、相互インダクタンス  $M_{in} = 90 \text{ pH}$ 、トランスイ ンピーダンスゲイン  $Z_{tran} = 103 \Omega$ 、発熱 P = 20 nW、電流ノイズ  $I_N = 3.5 \text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  (4.2 K)、接合シャント抵抗  $R = 10 \Omega$  である。



図 5.10: ヘッドアンプを用いた場合の SQUID 測定 (G15、J16、H20) セットアップ図

図 5.11 に測定した ISAS-G15 の  $\Phi - V$  特性とトランスインピーダンスゲイン  $(0 \sim 0.5 \Phi_0)$ 、ノイズの測定結果を示す。 $\Phi - V$  特性はフィードバックコイルから信号を入力することで取得した。ノイズは SQUID 動作点 0.25  $\Phi_0$  で取得した。



図 5.11: G15 測定結果:  $\Phi - V$  カーブ (上段左)、 $\Phi - V$  カーブから求めた磁束電圧変換係数  $V_{\Phi}$  (上段右)、トランス インピーダンスゲイン (下段左)、入力電流換算したノイズスペクトル (下段右)

図 5.11 の  $\Phi - V$  特性から臨界電流値は  $I_0 \sim 7 \mu A$  と求まり、設計値 8  $\mu A$  より 1  $\mu A$  小さい結果であった。また、 フィードバックコイル相互インダクタンスは  $M_{\rm FB} = 75.3 \text{ pH}$  と求まった。異なるセットアップの実験ではあるが、 ISAS-G15 を測定した結果で入力コイル相互インダクタンスは  $M_{\rm in} = 82.7 \text{ pH}$  と求まっている。この  $M_{\rm in}$  によって 求めたトランスインピーダンスゲイン (図 5.11 左下) は設計目標値である 100  $\Omega$  を多くの動作点で満たすことができ た。また、(5.32) 式によって求めた発熱は 15 nW であった。これも目標値 20 nW を満たすものであった。

#### ISAS-H20の測定

低発熱型である ISAS-H20 の設計値は、臨界電流値  $I_0 = 10 \ \mu$ A、相互インダクタンス  $M_{in} = 75 \ p$ H、トランスインピーダンスゲイン  $Z_{tran} = 141 \ \Omega$ 、発熱  $P = 40 \ n$ W、電流ノイズ  $I_N = 3.0 pA/\sqrt{Hz}$  (4.2 K)、接合シャント抵抗  $R = 10 \ \Omega$  である。

図 8.3 に測定した ISAS-H20 の  $\Phi - V$  特性とトランスインピーダンスゲイン (0 ~ 0.5  $\Phi_0$ )、ノイズの測定結果を 示す。ノイズは SQUID 動作点 0.25  $\Phi_0$  で open loop のみ取得した。また、臨界電流値を詳細に調べるために I - Vカーブを取得した。臨界電流値の取得ではコイルを介して SQUID に信号を入力せず、SQUID バイアス電流として 24  $\mu A_{nn}$  の電流を流すことによって測定した。

図 8.3 の  $\Phi - V$  特性から臨界電流値を求めることは難しい。I - V カーブからも臨界電流値をはっきりと決めることは難しいが、 $I_{SB} = 19 \ \mu A$  付近で急激に出力が増加していることから、 $I_0 \sim 9.5 \ \mu A$  を臨界電流値として判定する。

フィードバックコイル相互インダクタンスは  $M_{\rm FB} = 70.6$  pH と求まった。入力コイル相互インダクタンスは  $M_{\rm in} = 75.7$  pH と求まり、設計値とほぼ一致した。 $M_{\rm in}$ を用いて求めたトランスインピーダンスゲイン (図 8.3 左下) は設計目標値である 100  $\Omega$  を多くの動作点で満たすことができた。また、(5.32) 式によって求めた発熱は 36 nW で あった。これは目標値を超すものの、許容値を満たす値であった。

#### ISAS-J16の測定

低発熱型かつグラジオメータ型である ISAS-J16 の設計値は、臨界電流値  $I_0 = 8 \mu A$ 、相互インダクタンス  $M_{in} = 75$  pH、トランスインピーダンスゲイン  $Z_{tran} = 94 \Omega$ 、発熱 P = 21 nW、電流ノイズ  $I_N = 4.1 \text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  (4.2 K)、接合 シャント抵抗  $R = 10 \Omega$  である。

図 5.13 に測定した ISAS-J16 の  $\Phi - V$  特性とトランスインピーダンスゲイン  $(0 \sim 0.5 \Phi_0)$ 、ノイズの測定結果を示す。

図 5.13 の  $\Phi - V$  特性から臨界電流値は  $I_0 \sim 8.5 \mu$ A と求まった。入力コイル相互インダクタンスは  $M_{in} = 107.1$  pH で設計値より 30 % 程度大きかった。フィードバックコイル相互インダクタンスは  $M_{FB} = 86.1$ pH と求まった。  $M_{in}$  を用いて求めたトランスインピーダンスゲイン (図 5.13 左下) は設計目標値である 100  $\Omega$  を多くの動作点で満 たすことができた。また、(5.32) 式によって求めた発熱は 23 nW であった。これは目標値 20 nW を超えてしまった ものの、許容値 40 nW の範囲内であった。

#### ISAS-G30の測定

高ゲイン型である ISAS-H30 の設計値は、臨界電流値  $I_0 = 8 \mu A$ 、相互インダクタンス  $M_{in} = 90 \text{ pH}$ 、トランス インピーダンスゲイン  $Z_{tran} = 206 \Omega$ 、発熱 P = 40 nW、電流ノイズ  $I_N = 2.5 \text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$  (4.2 K)、接合シャント抵抗  $R = 10 \Omega$  である。

図 5.14 に測定した ISAS-G30 の  $\Phi - V$  特性とトランスインピーダンスゲイン  $(0 \sim 0.5\Phi_0)$ 、ノイズの測定結果を示す。ノイズは SQUID 動作点 0.25  $\Phi_0$  で取得した。

図 5.14 の  $\Phi - V$  特性から臨界電流値は  $I_0 \sim 8.5 \mu A$  と求まった。入力コイル相互インダクタンスは  $M_{in} = 81.7$  pH で設計値より 10 % 程度小さかった。フィードバックコイル相互インダクタンスは  $M_{FB} = 72.9$  pH と求まった。  $M_{in}$ を用いて求めたトランスインピーダンスゲイン (図 5.14 左下) は設計目標値である 200  $\Omega$  を多くの動作点で満



図 5.12: H20 測定結果:  $\Phi - V$  カーブ (上段左)、: $\Phi - V$  カーブから求めた磁束電圧変換係数  $V_{\Phi}$  (上段右)、トランス インピーダンスゲイン (中段左)、入力電流換算したノイズスペクトル (中段右)、I - V カーブ (下段)



図 5.13: J16 測定結果:  $\Phi - V$  カーブ (上段左)、 $\Phi - V$  カーブから求めた磁束電圧変換係数  $V_{\Phi}$  (上段右)、トランス インピーダンスゲイン (下段左)、入力電流換算したノイズスペクトル (下段右)

たすことができた。また、(5.32) 式によって求めた発熱は 43 nW であった。これは目標値 40 nW を超えてしまったものの、許容値 80 nW の範囲内であった。

#### 5.4.3 クロストーク測定

ISAS-G15 (500 nH) を用いてクロストーク測定を行った。液体ヘリウム環境下にて CH1,2,5 の読み出しを行った。 CH1 のフィードバックコイルから TES の応答の典型的な周波数帯域である 5.787 kHz の sin 波を波形発生器 nF WF 1974 で入力した。CH1 の出力 (信号) と CH2 と CH5 の出力 (クロストーク) をロックインアンプを用いて取得 した。ロックインアンプには WF 1974 で 5.787 kHz の sin 波を参照し、この周波数の強度を測定できるようにセッ トアップした。SQUID へはバイアス電流 13  $\mu$ A を流し、動作点は 0.25  $\Phi_0$  で測定を行った。図 5.15 に測定結果を 示す。

図 5.15 より CH2、CH5 の 2 つのクロストークは入力磁束量にともなって大きくなることが分かる。その寄与は信号との比で 1 % には満たないものの、0.5 % 以上であり、要求値 0.2 % を超えている。また、5.2 で行った計算結果より数倍大きい値である。

測定されたクロストークは、要求値より大きかったものの、TES のパルスに対してどれほどのクロストークが現れ るかは、実際に TES に対して照射実験を行ってみないと不明である。本研究では SQUID のバイアス電流の変化に 起因するクロストークは計算値に比べて数倍大きかったものの、実際に X 線照射実験を行ってクロストークを評価 することとした。



図 5.14: G30 測定結果:  $\Phi - V$  カーブ (上段左)、 $\Phi - V$  カーブから求めた磁束電圧変換係数  $V_{\Phi}$  (上段右)、トランス インピーダンスゲイン (下段左)、入力電流換算したノイズスペクトル (下段右)



図 5.15: クロストーク測定結果。(左図): 入力磁束に対するクロストーク、(右図): クロストークの信号に対する比

5.5. まとめ

# 5.5 まとめ

本章ではまず、バイアス共通化の懸念点について、特にクロストークについて議論と計算を行った。そして、直列 接続の方が並列接続と比較してクロストークの寄与が小さいという計算結果を得たことより、直列に TES と SQUID の各 8 チャネルを接続してバイアスを共通化する方法を採用した。

続いてバイアス共通型 SQUID 基板の設計と評価を行った。STEM-TES システムで SQUID アレイに要求される 性能値について、トランスインピーダンスゲイン、発熱から検討を行った。本開発では低発熱型と高ゲイン型の2種 の SQUID アレイを開発することとし、トランスインピーダンスゲイン、発熱のそれぞれに目標値と許容値を設定し た。SQUID アレイは低発熱型として ISAS-G15、ISAS-H20、ISAS-J16 を設計し、高ゲイン型として ISAS-G30 の 合計 4 基板を設計した。AIST CRAVITY でのプロセス後、液体ヘリウム環境下でその性能値の評価を行った。以下 に 4 基板の評価結果についてまとめる。

ISAS-G15 はトランスインピーダンスゲインを目標値 100  $\Omega$  を満たし、最大値は 200  $\Omega$  程度であった。発熱は 15 nW で目標値を満たし、開発した SQUID の中で最も低かった。STEM–TES システムにおいて実用的な SQUID アレイであるということが言える。

ISAS-H20 はトランスインピーダンスゲインを目標値 100 Ω を満たした。最大値は 250 Ω 程度であり、ゲインの 面で有用である。発熱は 36 nW で目標値を大きく超えたものの、許容値 40 nW は満たした。この H20 は ISAS-G や ISAS-J と比較してジョセフソン接合サイズが大きいことから、プロセスに起因する臨界電流値のばらつきがそれ らに比べて安定するという利点、信頼性がある。そうした意味で目標値 20 nW と比較して発熱量は大きいが、冷凍 機の冷却能力に猶予があれば、実用的な SQUID アレイであるということが言える。

ISAS-J16 はトランスインピーダンスゲインを目標値 100 Ω を満たした。最大値は 230 Ω 程度であった。発熱は 23 nW で目標値 20 nW を若干満たさなかったものの、許容値内である。また、この ISAS-J16 はグラジオメータ型 であり磁場耐性があるという大きな特徴を持ち、発熱を許容すれば非常に実用的である。磁場耐性の評価を今後の課 題とする。

高ゲイン型である ISAS-G30 はトランスインピーダンスゲインを目標値 200  $\Omega$  を満たした。最大値は 400  $\Omega$  程度 であった。発熱は 43 nW で目標値 40 nW を満たさなかったものの、許容値内である。この SQUID アレイは冷凍 機の冷却能力に猶予がある場合で、S/N 比を向上させたいときに使用する SQUID アレイとしたい。

まとめると、トランスインピーダンスゲインと発熱に関して STEM-TES システムでも求められる性能値を満た す SQUID アレイを開発することができた。さらに、グラジオメータ型 SQUID アレイを開発できたことも意義は大 きいと考える。グラジオメータ型の磁場耐性に関する評価を今後の課題としたい。

TES の典型的な周波数帯域でクロストーク測定を行った結果、信号に対して 0.60 ~ 0.85 % と計算結果の数倍大 きい値を得た。測定されたクロストークは要求値 0.2 % 以下を満たしていないものの、実際に TES の信号に対して クロストークがどれほどの大きさとなるかは照射実験を行ってみないと不明である。クロストークについてはバイア スを共通化させた照射実験で測定を行い、その大きさから、低減のための追求をするか否かを決めることとした。

# 第6章 極低温実装

# 6.1 目的

第4章で議論した通り、STEM-TES システムでは、スノート上の実装方式にフリップチップ実装を採用すること とした。フリップチップ実装は超伝導配線 – 低温コネクタ電極間と、超伝導配線 – SQUID 電極間で行い、スノート 先端部にマウントされる TES は従来通りワイヤボンディングを行う。フリップチップ実装の技術検証を行うために、 スノートに実際に実装し、歩留まりの確認と冷却への耐久性や SQUID の読み出し可否の確認のために、スノートの 冷却試験を試みた。スノート自体はこれまでの TEM 開発に比べ、読み出す TES ピクセルの数が増えたことから大 型化している。大型化し、熱容量が従来に比べて増大したスノートが冷却されるかどうかの検証も本試験では兼ねて いる。また、本試験では TES はマウントせず、SQUID のみを実装したスノートを使用した。本章では、試作した スノートにおける冷却試験について述べ、フリップチップ実装の技術検証とスノート開発における課題の洗い出しを 行った結果について述べる。

本章におけるスノート製作、フリップチップ実装のプロセスはフォトプレシジョン株式会社、株式会社マニュファ クチャリングソリューションに御協力を頂いた。

# 6.2 試作したスノートの概要

図 6.1 に試作したスノート上で SQUID を実装した側面部の外観を示す。スノートの細長い部分は 9 mm 角、長さ 120 mm で先端に TES がマウントされるスペースがある。SQUID が配置される位置は一辺 30 mm の立方体となっ ておりまた、R5 の曲面で立方体部分は細長い部分はつながっている。試作したスノートの全長は 165 mm である。



図 6.1: 試作スノートの側面部付近の外観。立方体部分の各側面に SQUID 基板が 2 枚ずつ実装されている。

SQUID 基板は立方体部分の各側面に 2 枚ずつ実装されており、これは第 9.3 で開発したバイアス電流共通型 SQUID である。ISAS-G15 (500 nH) と ISAS-H20 (250 nH) の 2 種類が各側面に 1 枚ずつ、計 8 枚が実装されている。また、各 SQUID 基板は異なる種類の接着剤でスノート表面と固定されている。接着剤の種類や位置によって SQUID

基板の電極と、超伝導配線電極間の接合度合いは異なる。スノートの試作では、この接着剤の種類や位置の最適化の ための条件出しを行うために、各面で異なる接着手法を採用した。

側面部1面は低温コネクタの固定が弱く、フリップチップ実装の歩留まりの確認を正確に行えなかった。フリップ チップ実装の歩留まりを1面のうちの確認可能な箇所と、その他の面で導通確認を行うことで調べた結果、全体では 70 % 程度であった。実装プロセスにおける条件出しが確立されていない段階での試作ではあったものの、歩留まり の向上は今後の課題である。

読み出す対象の SQUID を決めるために導通が確認された配線箇所を整理し、SQUID アレイは ISAS-G15 (500 nH) 計 8 アレイを読み出し対象とすることとした。読み出しの際に便宜的に用いる SQUID のチャネル番号を、各面の接着手法とともに表 6.1 に示す。

	フリップチップ実	SQUID 読み	は出し対象		
スノート面	接着剤位置と種類	歩留まり	Array Number	CH Number	
1	基板四隅 (JU-41LBK)		読み出しせず		
0	其板山山 (III 411 DV)	70 07	Array 2	CH9	
2	<b>奉似中大 (JU-41LDK)</b>	18 %	Array 3	CH10	
3	基板中央 (JU-90LT)	50~%	Array 4	CH7	
			Array 1	CH1	
			Array 2	CH2	
4     接着剤なし	100~%	Array 3	CH3		
		Array 4	CH4		
			Array 5	CH5	

表 6.1: 読み出し対象とした SQUID アレイ

ISAS-G15 (500 nH) を液体ヘリウム環境下で測定した結果を図 6.2 に示す。図 6.2 の測定の際には磁気シールドに クライオパームを使用した。図 6.2 から、SQUID 出力の波高値は SQUID バイアス電流が 14  $\mu$ A の時に 0.7 mV<sub>pp</sub> 程度であることが分かる。この SQUID の応答結果を、本測定における SQUID の測定の際の参考として使用する。 ISAS-G15 (500 nH) の性能について設計値を表 6.2 に示す。



図 6.2: 磁気シールドにクライオパームを使用し、液体ヘリウム環境下で ISAS-G15 (500 nH) を測定した際の  $\Phi - V$ 応答結果。横軸は SQUID に入力される磁束で、磁束量子  $\Phi_0$  単位で示している。13 ~ 16  $\mu$ A の SQUID バイアス 電流の範囲での応答をプロットしている。

表 6.2: 読み出し対象とした ISAS-G15	(500 nH)	の性能設計値
臨界電流値	$I_0$	$8 \ \mu A$
発熱	P	20  nW
トランスインピーダンスゲイン	$Z_{\rm tran}$	103 $\Omega$
入力コイル相互インダクタンス	$M_{ m in}$	90 pH

# 6.3 冷却セットアップ

冷却には希釈冷凍機を使用した。この冷凍機は最低到達温度が 60 mK 程度の実績があり、最も冷却される mixing の外部の真鍮部分に  $\phi$ 3.3 の貫通穴が 3 箇所あり、この穴でスノートを固定することが可能となっている。図 6.3 に スノート接続部分を示す。



図 6.3: 希釈冷凍機のスノート接続部分。金色の真鍮部分が mixing 外部に相当し、最低到達温度は 60 mK 程度である。この部分の 3 つの貫通穴を用いてスノートを固定する。

冷凍機が最低到達温度に達した際のスノート上の温度を調べるために、スノート上に温度計を配置した。温度計は 酸化ルテニウム (RuIx) 温度計のベアチップタイプを使用した。RuOx はスノート上で SQUID がマウントされる立 方体部分と、TES のマウント箇所である先端部分にワニスによって固定し、読み出すための配線は Nb/Ti ツイスト ペアのルームワイヤを用いた (図 6.4)。

SQUID を動作させるためには外部磁場を遮蔽する必要がある。本実験では磁気シールドに鉛 (Pb) シールドを使 用した。鉛は 7.2 K で超伝導に転移し、それ以下の温度では磁場をピン止め効果によって遮蔽できる。鉛は 1.5 mm 厚の平板状のものを加工し、スノートに最も近いサーマルシールドである 1 K シールドの周囲に 1 回巻くことによっ て完全に覆った。シールドの合わせ目はハンダ付を行った。図 6.5 にスノートを希釈冷凍機に接続した様子と製作し た Pb 磁気シールドを取り付けた様子を示す。

本実験で SQUID の読み出しにはマルチチャネル駆動回路を用いた (付録 C)。この駆動回路は SQUID 出力を増幅 するヘッドアンプと連動しており、最大 SQUID 10 チャネルを SQUID コントロール PC から制御することができ る。図 6.6 に本実験の外観を示す。



図 6.4: (左図): スノート先端部に固定された RuOx 温度計、(右図):スノート側面部に固定された RuOx 温度計。4 端子法で読み出すために Nb/Ti ルームワイヤを 4 本づつ配線している。



図 6.5: (左図):スノートを希釈冷凍機にマウントした様子、(右図): 磁気シールドを取り付けた様子



図 6.6: (A): 希釈冷凍機、(B): GM 冷凍機、(C): ガスハンドリングユニット、(D): ヘッドアンプ、(E): SQUID コン トロール PC

# 6.4 冷却試験結果

#### 6.4.1 4 K での確認

#### 導通の確認

GM 冷凍機での4K までの冷却過程において、導通確認を行ったところ、4面に配置された SQUID チップ上の 1箇所の断線が確認された。SQUID の読み出しには問題がない TES バイアス電流用の配線であったために、断線 原因は冷凍機の昇温後にスノートを冷凍機から取り出してから明らかにすることとし、実験を続行した。

#### SQUID 動作確認

4 K での SQUID の動作確認を行った。SQUID の  $\Phi - V$  特性を取得するための方法を述べる。信号発生器 WF1974 を用いて sin 波の電圧を発生させ、バイアス抵抗 10 kΩ で電流 ~ 100  $\mu$ A<sub>pp</sub> 程度 (~ 3  $\Phi_0$  に相当) に変換し、フィー ドバックコイルに流す。その SQUID 出力をヘッドアンプで増幅して波形を取得する。 $\Phi - V$  特性を取得するには SQUID への入力、出力の双方の波形を取得する必要がある。WF1974 と SQUID 出力をオシロスコープ (IWATSU DS-5324) につないでモニタをしつつ、波形取得器 (横河 DL708E) で波形取得を行った。図 6.7 にセットアップ概要 図を示す。

側面部 4 面に配置された CH1~CH5 の  $\Phi - V$  特性を図 6.8 に示す。図 6.8 から SQUID の出力はいずれのチャネ ルも最大で 0.55 mV<sub>pp</sub> 程度であることが分かる。事前に行った液体ヘリウム温度での  $\Phi - V$  特性 である図 6.2 で は、出力の最大値は 0.7 mV<sub>pp</sub> 程度であることから、20 % 程度の減少が見られた。

2 面に配置された SQUID である CH9、CH10 についてバイアス電流を 13  $\mu$ A の場合のみ  $\Phi - V$  特性を取得した。測定結果を図 6.9 に示す SQUID 出力の最大値は 0.5 mV<sub>pp</sub> 程度であり、図 6.2 と比較して 20 % 程度の低下が認められた。

SQUID の出力の減少の要因を考える。まず、各 SQUID 基板に特有のものではなく、測定した全てのチャネルに 出力の減少が見られたことから、SQUID 製造プロセスにおける問題や、フリップチップ実装に問題があるとは考え にくい。また、本実験で取得した  $\Phi - V$  特性は図 6.2 と比較して、応答の形状に歪みが見られる。これらの結果か ら、SQUID が磁場をトラップしている可能性が示唆される。使用した SQUID ISAS-G15 (500 nH) は、SQUID リ



図 6.7: SQUID を読み出す際のセットアップ

ングが直列に 15 個アレイ化され、その両端の発生電圧を出力している。この 15 リングのうち、磁束トラップが存 在するリングは磁束のオフセットを持つ。各リングが異なるオフセットを持つとき、SQUID アレイの出力は、オフ セットが揃った状態 (あるいはいずれのリングもオフセットがない場合) と比較して減少し、Φ – V 特性は理想的な sin 波状とはならずに歪んだような形状となる。

この考察から、SQUID への磁気遮蔽が不十分であったことが示唆された。Pb 磁気シールドに代わる新たな磁気 シールドが必要である。SQUID の応答の確認には可能であるために、冷却実験は続けた。

#### 6.4.2 極低温での確認

#### 最低到達温度

希釈冷凍機の最低到達温度を表 6.3 に示す。これは SQUID を動作させていない状態の温度である。最も温度が低

表 6.3: 最低到達温度に達した際の各温度計が示した温度					
温度計	mixing	mixing 外部	スノート側面	スノート先端	
温度 (mK)	57.3	63.7	237.8	68.8	

い mixing とスノート先端部との温度差は 10 mK 程度であった。スノート全体の温度は、先端部の温度計が示す温 度 70 mK 程度に冷却されていることが考えられる。スノート先端部を 100 mK 以下に冷却できたことから、冷凍機 は TES を動作できる温度環境を実現できることを実証した。今後は SQUID を動作させた状態でのスノート先端部 の温度について検証する。

一方で、側面部の温度は mixing と比較して 180 mK 程度高かった。側面部は mixing と先端部の中間に位置する ことから先端部とこれだけ温度差があることの要因として、側面部の温度計 (RuOx) を読み出す Nb/Ti 配線が 1 K シールドと接触することによる熱流入が示唆された。実際の確認は冷凍機昇温後に行うこととした。

#### 耐久性の確認

GM 冷凍機による予冷が終了した 4 K から極低温までの冷却過程においては、いずれの配線も断線は確認されな かった。フリップチップ実装は極低温においても剥がれず、電極間の接合に問題はなかった。この結果をもって、極



図 6.8: 4 K で取得した SQUID の Φ − V 特性。(上段左): CH1、(中段右): CH2、(中段左): CH3、(中段右): CH4、 (下段): CH5。各図において複数の SQUID バイアス電流の測定結果を合わせてプロットしている。


図 6.9: 4 K で取得した CH9、CH10 の Φ – V 特性。いずれも SQUID バイアス電流 13 μA で取得した。

低温での耐久性を確認することができた。

#### SQUID 動作確認

熱浴温度 70 mK で SQUID の  $\Phi - V$  特性を 6.4.1 で述べたものと同一の方法で取得した。測定結果を図 6.10 に示 す。図 6.10 から、CH3 ~ CH5 は 4 K での  $\Phi - V$  特性と大きな違いは見られない。一方で CH1 と CH2 はその形 状に歪みが大きく、また出力も 4 K での測定結果と比較して 4 割程度に減少している。出力の減少は、SQUID のゲ インとなる  $\partial V/\partial \Phi$  ( $\Phi - V$  特性における傾き) の低下につながってしまう。また、特に CH1 は線形的な応答範囲が 少なく TES の読み出す際にはダイナミックレンジが狭い。4 K から 70 mK への冷却過程での  $\Phi - V$  特性の変化は 磁場トラップのみによって説明できるか否か、詳細な検証はここでは行わないが、CH1 や CH2 のような  $\Phi - V$  特 性をもった SQUID では TES の性能を最大限発揮できないことは明白である。

一方で、本実験結果ではフリップチップ実装がされた SQUID を極低温においても動作させることができた。 $\Phi - V$ 特性の結果から、実装による SQUID の性能劣化が合ったとは考えにくい。この点と先述した導通確認の結果から、極低温におけるフリップチップ実装の実証ができたと考える。

## 6.5 見つかった問題の検証

冷却試験において見つかった問題に関して、冷凍機昇温後に検証を行った。以下に、各問題に対する検証結果を述 べる。

#### 予冷段階における断線

6.4.1 で述べた導通の確認の際に、予冷段階で生じた 1 箇所の断線の要因を検証した。該当するスノート側面部 4 面の SQUID 基板を確認した結果、SQUID 電極と超伝導配線間の接続が劣化しており、固定状態が悪化していた。

SQUID 基板は、表 6.1 に示した通り、スノートの表面との固定のための接着剤について、その種類と固定位置の条件出しを行っている段階であった。冷却実験で電極間の接続が劣化した SQUID は側面部 4 面にあった基板であり、 接着剤なしでフリップチップ実装のためのリフロー工程を経た基板であった。今回の試験結果から、リフロー工程に おいて接着剤を施すことを採用することとする。今後はフリップチップ実装の歩留まりの観点から、接着剤の種類や 位置の決定を行っていきたい。



図 6.10: 70 K で取得した SQUID の Φ − V 特性。(上段左): CH1、(中段右): CH2、(中段左): CH3、(中段右): CH4、 (下段): CH5。各図において複数の SQUID バイアス電流の測定結果を合わせてプロットしている。

#### スノート側面部と先端部の温度差

6.4.2 で述べた通り、最低到達温度を確認した際ではスノート側面部の温度が先端部と比較して 170 mK 程度高かっ た。検証を行った所、側面部に配置した RuOx 温度計を読み出す Nb/Ti 配線が スノートの外側に位置する 1 K シー ルドと接触していることが確認された。このことから、側面部と先端部の温度差は、1 K シールドから Nb/Ti 配線 を介して RuOx 温度計に伝わる熱流入であったと結論づけた。

#### SQUID の出力低下

SQUID の出力の低下が Pb 磁気シールドの磁気遮蔽効果に依存するかをさらに定量的に調べるために、強磁性体 であるクライオパームシールドとの比較実験を行った。液体ヘリウム中にて SQUID (ISAS-A20) を動作させ、 $\Phi - V$ 特性を取得し、2 つの磁気シールドで SQUID の  $\Phi - V$  特性の差を調べた。SQUID バイアス電流は 12  $\mu$ A とした。  $\Phi - V$  特性と、 $\Phi - V$  特性から求めた磁束電圧変換係数について図 6.11 に示す。



図 6.11: クライオパームと Pb 磁気シールドによる SQUID の応答の差。 (左図):  $\Phi - V$  特性、(右図):  $0 \sim 0.5 \Phi_0$  区間での  $\Phi - V$  特性の勾配から求めた磁束電圧変換係数。

図 6.11 の  $\Phi - V$  特性から、出力の最大値は Pb 磁気シールドの方がクライオパームシールドと比較して 15 % 程度低かった。SQUID のゲインに相当する磁束電圧変換係数 ( $\Phi - V$  特性における傾き) は、その最大値に 1.5 倍程度の差があった。本測定の結果から、Pb 磁気シールドは SQUID の駆動には磁場遮蔽が不十分であり、SQUID のゲインの低下の要因となることが確認できた。同時に、スノート冷却試験において使用した Pb 磁気シールドに代わる磁気シールドを今後は使用する必要性が示唆された。

## 6.6 まとめ

本章では SQUID 基板にフリップチップ実装が施されたスノート試作品の冷却試験を行い、その実装方式の実証を サーマルサイクルをかけた際の抵抗チェックや SQUID の測定をすることで試みた。

フリップチップ実装の歩留まりは全体の 70 % 程度であった。4 K までの冷却過程で 1 箇所の断線が確認された が、これは SQUID 電極と超伝導配線間の接続が劣化したことに起因するものであった。該当する SQUID はスノー ト表面に固定する接着剤がなかったために、固定状態が悪化してしまったことと考えられる。一方で、接着剤で固定 された他の SQUID 基板は、冷却による断線はなかったことから、極低温においても固定が保てるということを 1 度 の冷却では実証できた。今後 SQUID 基板はリフロー工程における接着剤を使用することとしたい。フリップチップ 実装の歩留まりの改善と最適な接着手法が今後の課題である。

4 K および極低温での SQUID の読み出すことができ、フリップチップ実装での SQUID の動作に成功した。4 K から極低温に至る冷却過程においては、電気的接続の劣化は確認されなかった。また、SQUID の出力の低下は使用し

6.6. まとめ

た Pb 磁気シールドの磁気遮蔽能力が不十分であり、SQUID の磁場トラップによって示されることを検証実験で明 らかにした。スノートの冷却試験において十分な磁気遮蔽を実現できる磁気シールドを新たに製作する必要がある。

スノート先端部の温度は最低到達時に 70 mK 程度であり、mixing との温度差は 10 mK 程度であった。スノート 先端部を 100 mK 以下に冷却できたことから TES の動作をスノート先端で実現できる目処が立った。今後は SQUID 64 アレイを動作させた状態でのスノートの温度について検証していきたい。

# 第7章 磁気シールドの設計

## 7.1 目的

第6章で行ったスノート冷却試験の結果から、使用した Pb 磁気シールドでは磁場の遮蔽が不十分であることが示 唆された。検証実験の結果、Pb 磁気シールドを使用した場合はクライオパームシールドを使用した場合に比べて SQUID の出力が小さくなるという結果を得た。SQUID 出力の減少はトランスインピーダンスゲインの減少につなが り、TES パルスを読み出す際に S/N 比の劣化を招いてしまう。このことから今後のスノートを用いた冷却試験に向 けて、十分な磁気遮蔽能力を持つ新たな磁気シールドを設計製作することが必要となった。これを STEM-TES シ ステムで製作する磁気シールドのモデルケースとして設計することとする。

設計に先立ち、磁気シールドの設計を最適化するために、有限要素法による磁場解析を行った。磁性材料として Amumetal 4K を選定し、その寸法最適化を磁場解析の結果をもとに試みた。磁気シールド内において TES と SQUID の位置の磁場を計算し、双方の動作に問題がない程度に磁気遮蔽ができることを確認した上で、磁気シールドの設計 製作を行った。製作後の磁気シールドを室温にて簡易的に測定することで、TES や SQUID の動作に影響がないシー ルドを製作することができたかどうかを検証した。

本章における磁気シールドの製作には仁木工芸株式会社と米国 Amuneal 社に御協力を頂いた。

# 7.2 Amumetal 4K (A4K)

磁性体材料としては 鉄 – ニッケル合金である Amumetal 4K (A4K) を使用することとした。従来、我々の研究グ ループではクライオパームを磁気シールドとして使用することが多かったが、A4K の透磁率がクライオパームと比 較して優れていることから採用することとした [5, 6]。表 7.1 に示した通り、A4K は透磁率の面で他の材料と比較し て優れていることが分かる。

1、1、11、1141上户"内村"/11日	V) [] (V-9400	Amunear (11. Merk)
材料	飽和磁場 (H/m)	比透磁率 (最大値)
Amumetal (80 $\%$ Nickel)	8,000	400,000
Amunickel (48 $\%$ Nickel)	$15,\!000$	12,000
Cryoperm 10	9,000	250,000
Ultra Low Carbon steel	22,000	4,000

表 7.1: 磁性体材料の特性の一例 (いずれも Amuneal 社 提供)

A4K は極低温においても高い透磁率を発揮するために、クライオパームに代わる磁気シールドとして 2010 年に製造が広く開始されて以来、利用が広まっている。図 7.1 に A4K の透磁率に関する性能を示す。図 7.1 から 4K では A4K はクライオパームと比較して透磁率で優れていることが分かる。



図 7.1: (左図): 4 K における A4K とクライオパームの比透磁率の比較、(右図): DC の磁場に対する A4K の BH 曲線 (1 Oe = 79.6 A/m)[6]

## 7.3 有限要素法による磁場解析

#### 7.3.1 背景と目的

A4K シールドはスノートとサーマルシールド間に配置される。今回対象となる希釈冷凍機との接続を考えると、 シールドは円筒形となる。底面には外部ジェネレータから発生させた X 線を通すための窓を設ける必要がある。

シールドを設計するにあたり、その寸法を決定する必要がある。 磁気シールドは開口部の内径が大きいほど侵入 磁場は大きくなるために、内径は小さい方がよい。一方で、スノート上で SQUID がマウントされる最も太い部分よ りもある程度のマージンを設けなければならない。また、X 線窓の半径によって TES への侵入磁場の大きさが変わ ることが予測される。これも小さいほど TES への磁場の影響は小さくなるが一方で、適度な大きさにしなければ、 ジェネレータから発生させた X 線が TES に当たるようアライメントへの要求が厳しくなる。TES と SQUID にとっ ての侵入磁場の大きさと実験セットアップの双方の観点から、A4K 磁気シールドの設計を最適化する必要がある。

TES への侵入磁場は、文献 [12] を参考に、TES を貫く磁場によるパルスハイトの低下が無視できるように、1  $\mu$ T 以下を要求値とする。これは東京近辺の地磁気の大きさの 1/50 程度である。また、SQUID への侵入磁場は極力小 さいほど好ましいが、この要求値も TES と同程度の 1  $\mu$ T 以下とした。

この要求値を満たし、かつセットアップやアライメントへの要求が無理なく現実的となるように、有限要素法によ る磁場解析を行った。シミュレーションには有限要素法解析システム Femtet (ムラタソフトウェア社)を使用した。 Femtet の磁場解析機能を用いて地磁気に対する A4K シールド内の磁場をシミュレーションする。

スノートの設計図からスノートに配置される TES と SQUID の位置は把握することができる。この位置をもとに、 両者への侵入磁場の大きさをシールド内径  $r_{cyl}$  と X 線窓半径  $r_{win}$  を変えることによって計算した。なお、製作を依 頼した Amuneal 社より製作可能な A4K の厚みが 1 mm のみであるという打診があったために厚みは 1 mm とした。

#### 7.3.2 解析セットアップ

解析を行うにあたり、必要なパラメータの値を決める必要がある。

まず、与える磁場の大きさを決めた。本解析では、地磁気を模した磁場を与える空間を用意した。この磁場は宇宙 科学研究所における地磁気の大きさ **B**<sub>isas</sub> を国土地理院ホームページ 2010 年の磁気図データより採用し、

$$\boldsymbol{B}_{\text{isas}} = (3.00, \ 0.369, \ -3.48) \times 10^{-5} (\text{T}) \tag{7.1}$$

とした。空気の透磁率  $1.26 \times 10^{-6}$  (H/m) から磁場の大きさ  $H_{isas}$  は、

$$H_{\text{isas}} = (24, \ 3.0, \ -28)(\text{A/m})$$
 (7.2)

と計算される。式 (7.2) の磁場を地磁気の値として Femtet で設定した。

地磁気は実験室内部では、建造物や電子機器の影響によってその向きを変えられている可能性がある。そこで、本 解析で計算する地磁気の値として地磁気の各成分  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$ の2乗和を計算することで、その最大値を見積もる こととした。 $H_{isas}$ を空気中で与え、内部に円筒シールドを置いた時の磁場として与えた時の解析結果の一例を図 7.2 に示す。



図 7.2: 解析結果の一例。立方体中が空気に相当し、円筒が A4K 磁気シールドに相当する。

図 7.2 にあるように、結果はベクトル量として Femtet では出力される。図 7.2 中の任意の平面におけるデータを 出力することで、その面の各座標における磁場を求めることができる。

次に、メッシュサイズと空間のサイズを決めた。有限要素法では、メッシュのサイズによって解析精度が異なり、 サイズが小さいほど精度が良くなる一方で計算回数が増す。メッシュサイズによる計算精度を確かめるために、一辺 が 300 mm の立方体を空気のサイズとして、その中心に円筒シールド ( $r_{cyl} = 23 \text{ mm}, r_{win} = 5 \text{ mm}$ )を配置した。 円筒の中心線上 (x = y = 150)における z 座標と磁場について解析した。図 7.3 にメッシュサイズによる内部磁場計 算結果を示す。

図 7.3 から分かるように、メッシュサイズが大きいときにはプロットが不連続となる箇所が見受けられる。磁場の 変化は理想的には連続となることが期待されるので、不連続の解が出力されるメッシュサイズを設定するべきではな い。検証の結果、メッシュサイズが 10 mm ではおおむね内部磁場が連続となることが分かったので、10 mm 以下を 解析では採用したい。ただし、本解析で用いた計算機メモリの上限から、10 mm より小さいサイズでは計算が困難 であった。そのため、計算可能な最小のメッシュサイズである 10 mm を設定した。<sup>1</sup> このメッシュサイズから地磁 気を与える空気の箱は、箱各辺と A4K の間の距離がメッシュサイズよりも大きくなるように、100 mm × 100 mm × 250 mm とした。

続いて A4K の透磁率について設定した。Femtet では透磁率の設定の際に、磁束密度と磁場の大きさの関係が線形 か、非線形かの選択をする。線形の場合には固定値を設定し、非線形の場合は磁性材料の磁化曲線 (BH 曲線) のデー タを設定する。A4K の BH 曲線は他の磁性材料と同様に非線形であるために、その代表点を Femtet で設定するこ

 $<sup>^{1}</sup>$ メッシュサイズは空間の各点によって計算精度が同一となるように、adaptive mode でなく normal mode とした。



図 7.3: メッシュサイズの違いによる内部磁場の変化

とによって透磁率の応答を再現することが可能である。A4K の BH 曲線の厳密なデータを得ることはできなかった ために、図 7.1 から読み取れるデータ (4 K での BH 曲線) を代表点として、Femtet で設定することとした。表 7.2 にその代表点を示す。

H (mOe)	B (G)
0	0
50	4600
100	5500
150	6000
200	6300
250	6500
300	6700

表 7.2: 図 7.1 から読み取った BH 曲線の代表点

実際に Femtet で設定する際には、真空中の透磁率との比である比透磁率を設定する。表 7.4 に比透磁率  $\mu_s$ の違いによるシールド効果の結果を図 7.4 に示す。図 7.4 から分かるように、比透磁率が高いほどシールド内での最小磁場の大きさが小さく、遮蔽能力が高いことが分かる。また、図 7.1 から A4K の比透磁率は DC で 7 ×10<sup>4</sup> 以上である。地磁気はほとんど一定の磁場で DC と考えることができるために、図 7.4 の結果は A4K の比透磁率を再現していると考えられる。この結果から表 7.2 に示した代表点によって A4K の磁気遮蔽を再現できるとし、比透磁率の設定データとして採用することとした。

以上の結果より、円筒内径  $r_{cyl}$  と X 線窓半径  $r_{win}$  を解析するためのセットアップとして、解析パラメータを表 7.3 のように決定した。



図 7.4: 比透磁率 µ<sub>s</sub> の違いがもたらす磁気遮蔽の効果。ダッシュ線は左側が円筒底面の座標を表し、右側が円筒開口 部の座標を示す。

表 7.3: A4K 磁場解析セットアップ			
項目	単位	設定値	
地磁気	A/m	(24, 2.9, -28)	
空気サイズ	$\mathbf{m}\mathbf{m}$	$100\times100\times250$	
シールド円筒高さ	$\mathrm{mm}$	215	
シールド厚み	$\mathbf{m}\mathbf{m}$	1	
メッシュサイズ	$\mathrm{mm}$	10  (not adaptive)	
電気伝導率	S/m	$10^{8}$	
透磁率		BH curve data (表 7.2)	

#### 7.3.3 解析結果

#### 円筒内径

円筒内径  $r_{cyl}$  は、 $23 \le r_{cyl} \le 28 \text{ (mm)}$ の間で検討することとした。これはスノートの最も太い部分が 42 mm 程度ということと、外側に配置されるサーマルシールドとの干渉という実験セットアップの観点から決めた。

まず、円筒内径  $r_{cyl}$  の違いによる磁気遮蔽効果の違いを解析した。SQUID は円筒の開口部から 79 mm 程度の位置に配置される予定であるため、円筒内径の大きさによって、特に SQUID への磁場の影響が変わることが予測される。したがって、SQUID が配置される座標 ( $z = z_{SQ}$ ) での磁場の大きさを考慮し、最適な円筒内径を決定する。ここでは、X 線窓半径を  $r_{cyl} = 4$  mm と設定し、y = 50 mm の平面でのデータを解析対象とした。図 7.5 に  $r_{win} = 23$  mm、28 mm の場合の内部磁場について示す。円筒開口部や X 線窓から侵入する磁場は、円筒の内部に進むほど減衰することが分かる。

次に、内部磁場の円筒内径に対する依存性を詳しく調べるために、円筒の中心線 (x = y = 50 mm)上の磁場について、円筒内径を変えて解析を行った。スノート上の SQUID の位置は円筒の中心線上ではないものの、中心線上の磁場を対象とすることで、進入磁場の最大値を知ることができる。本解析では SQUID への磁場は過大評価し、実際



図 7.5: (左上図):  $r_{cyl} = 23 \text{ mm}$  での XZ 平面での磁場、(右上図):  $r_{cyl} = 28 \text{ mm}$  での XZ 平面での磁場、(左下図):  $r_{cyl} = 23 \text{ mm}$ 、 $z = z_{SQ}$  での XY 平面での磁場、(右下図):  $r_{cyl} = 28 \text{ mm}$ 、 $z = z_{SQ}$  での XY 平面での磁場

の地磁気が SQUID にもたらす磁場はこの解析結果と比較して小さいと考えられる。解析結果を図 7.5 に示す。図 7.5 より、内部磁場の最小値は円筒内径の変化によって大きく変化はしない。一方で、z = 150 (mm) 付近からに内部磁場は急激に上昇する。SQUID の位置の磁場は、円筒内部における最小値ではないものの、 $23 \le r_{cyl} \le 28 \text{ (mm)}$ では要求値である  $10^{-6}$  T 以下であると考えられる。

SQUID 近辺の座標における磁場について、図 7.5 のデータから円筒内径に対する磁場の依存性を示したプロット を図 7.7 に示す。 $z_{SQ} = 153.3 \text{ mm}$  であるので、図 7.7 において緑と青のプロットデータが参考になる。SQUID の位 置では  $23 \leq r_{cvl} \leq 28 \text{ (mm)}$ の範囲で磁場は最大で 1.5 倍程度しか変わらないことが計算された。

この解析結果から  $r_{cyl}$ を小さくしても SQUID の位置では磁場の影響がほとんど変わらないことが示唆された。しかし、図 7.5 から分かるように  $r_{cyl}$  が大きいほど、より円筒内部への磁場の侵入が大きい。したがって、 $r_{cyl}$  は小さい方が SQUID への磁場トラップのリスクは低くなることが予測される。この見解と、A4K シールドとスノートおよびサーマルシールドとの干渉という実験セットアップにおける懸念の観点から、A4K シールドの内径は  $r_{cyl} = 26$ mm として設計することとした。

#### X 線窓半径

X 線窓半径  $r_{win}$  は、スノート先端にマウントされる TES 基板の受光面サイズが 3 mm 角であることから、4  $\leq$   $r_{cyl}$  (mm) の範囲で検討することとした。ここでは円筒内径は  $r_{cyl} = 23$  mm として解析を行った。



図 7.6: 円筒内径 *r*<sub>cyl</sub> を変えたことによる、円筒中心線上での各 *z* 座標における磁場の変化。黒のダッシュ線の間が 円筒内に相当し、左側が円筒底面座標に該当する。TES、SQUID がスノート上でマウントされる位置をそれぞれ茶 色、紫のダッシュ線で示した。



図 7.7: z = z<sub>SQ</sub> (153.3 mm) 付近の磁場の円筒内径に対する依存性

内部磁場の X 線窓半径に  $r_{win}$  対する依存性を調べるために、円筒の中心線 (x = y = 50 mm)上の磁場を対象として、 $r_{win}$ を変えて解析を行った。解析結果を図 7.5 に示す。



図 7.8: X 線窓半径 r<sub>win</sub> を変えたことによる、円筒中心線上での各 z 座標における磁場の変化。黒のダッシュ線の間 が円筒内に相当し、左側が円筒底面座標に該当する。TES、SQUID がスノート上でマウントされる位置をそれぞれ 茶色、紫のダッシュ線で示した。

図 7.5 では解析の信頼性を確かめるという意味合いで円筒の上面と底面が筒抜け状態に近い r<sub>win</sub> = 22 mm の結果 も合わせてプロットした。このような状態では、内部磁場は侵入方向 (*z* 軸方向に対して対象的に減衰することが予 測されるが、それが図 7.5 では表れている。

図 7.5 から、X 線窓半径を小さくしても円筒内部での最小磁場は変化しないが、TES の位置付近である ~60 mm から X 線窓半径に近づくにつれて磁場は急激に大きくなることは分かる。TES の位置では要求値である  $10^{-6}$  T 以下であることは、 $4 \le r_{win} \le 8$  (mm) の範囲で確認できた。一方で  $r_{win}$  が大きいほど TES への磁場の影響が大きくなることが分かった。TES の位置での磁場をさらに詳しく知るために、TES 付近の磁場について、X 線窓半径に対する磁場の依存性を示したプロットを図 7.9 に示す。

 $z_{\text{TES}} = 58.8 \text{ mm}$ より、図 7.9 において緑と青のプロットデータが参考になると考えられる。この2つのプロットでは、TES の位置では  $4 \le r_{\text{win}} \le 9 \text{ (mm)}$ の範囲で、磁場は 2 倍以上変化している。また、赤色のプロット (z = 55.0) ではその変化率は高い。このため、要求値 ( $10^{-6}$  T 以下) は  $4 \le r_{\text{win}} \le 9 \text{ (mm)}$ の範囲でいずれも満たし ているものの、 $r_{\text{win}}$  は小さい方が好ましいことが言える。

これらの解析結果と、TES の 受光面サイズが 3 mm 角であることと、外部ジェネレータから X 線を当てるのに アライメントの調整が困難とならないようにするといった観点から、r<sub>win</sub> = 5 mm を X 線窓の半径として採用する こととした。

## 7.4 設計

7.3 での解析結果を踏まえ、表 7.4 に示した寸法で A4K 磁気シールドの設計を行った。A4K 磁気シールドは円筒 形であるので、希釈冷凍機に固定するための治具 (フランジ)を真鍮で製作することとし、併せて設計を行った。図 7.10 に A4K 磁気シールドの設計図を示す。

図 7.11 に製作後の A4K シールドの外観を示す。A4K シールドとフランジを合わせた総重量は 420 g であった。 対象の希釈冷凍機の1K シールドの重量は 430 g であるので、ほぼ同程度の重量である。



図 7.9: z = z<sub>TES</sub> (58.8 mm) 付近の磁場の X 線窓半径に対する依存性

表 7.4: A4K 磁気	シールドの寸	法(単位	位はいずれも	mm)
	内径	52		
	長さ	215		
	X 線窓半径	5		
	厚み	1		
			-	

## 7.5 性能評価

製作した A4K シールドの磁気遮蔽を確かめるために、室温にて簡易的に測定を行った。ホール素子を A4K シー ルド内に組み込み、ホール素子のシールド内における位置を動かすことで、シールド内部における磁場を測定した。

測定に使用したホール素子は Lahe Shore HGCT-3020 (Cryogenic Hall generator type) である。このホール素 子を、電流を流し、電圧を測定するための 4 配線から成るプローブの先端にマウントした。ガウスメーターは Lake Shore model 425 を用いた。表 7.5 に model 425 のセットアップを示す。本測定で使用したプローブは High stability probe であったため、最小レンジが 350 G であった。10 mG の桁までしか測定ができず。10 mG ( $10^{-6}$  T) 以下の オーダーは測定することができなかった。

表 7.5: Lake Shore me	odel 425 のセットアップ
Compensation	ON
Sensitivity	$0.9060~\mathrm{mV}$ / kG
Units	G
Range	$350 \mathrm{~G}$
Filter	ON

ホール素子を固定するためのステージと、ステージを動かすための治具を木材で自作した。このステージをシール ド内にて鉛直方向に動かすことで、ホール素子の位置を把握した。実験は机上で行い、鉛直方向に座標軸 z をとり、 A4K シールドの底面の座標を z = 0 とした。ステージの厚み (12 mm) と A4K シールドの厚み (1 mm) を合わせた z = 13 (mm) から測定を開始し、z > 215 (mm) となるまで測定を行った。



図 7.10: A4K 磁気シールドの設計図。A4K シールドと希釈冷凍機本体の接続のために真鍮製のフランジを用いることとした。A4K シールドとフランジは M2 ネジで固定される。



図 7.11: 製作後の A4K 磁気シールドの外観

ホール素子は、active area を垂直に貫く磁場のみに感度があるため、その向きによって計測する磁場成分の対象が 決まる。本測定では、鉛直方向磁場  $B_z$  と水平方向磁場  $B_y$  を測定した。水平方向磁場は、ホール素子の active area を水平方向に 360 度回し、ガウスメーターで表示される磁場の大きさが最大となった 0.34 G となる方角を対象とし た。その方角に対して active area を向けたときの磁場を  $B_y$  とした。

測定したい磁場によってホール素子の向きも変える必要があるために、木材治具をステージ上に固定することによっ て水平方向の磁場も計測できるようにした。図 7.12 に実験の外観を示す。



図 7.12: (左図): 実験の全体図、(右図):  $B_z$  を計測するように固定されたホール素子を A4K シールド内で動かして いる様子

測定結果を図 7.13 に示す。各座標においてガウスメーターで表示される値から磁束密度を求めた。先述したが、本 実験で使用したプローブでは 1 mG (10<sup>-7</sup> T) の桁を計測することができなかった。このため、図 7.13 において 10<sup>-6</sup>

#### T が本実験で計測できる最小の磁束密度である。



図 7.13: A4K 内部の磁場測定結果。ダッシュ線は茶色が TES がスノート上でマウントされる位置、紫色が SQUID がマウントされる位置、黒色が A4K シールドの開口部の位置である。最小値が 10<sup>-6</sup> Tesla となっているが、これは 測定限界であり実際の磁場は 10<sup>-6</sup> Tesla よりも小さい。

図 7.13 よりスノート上で TES、SQUID が固定される座標 (それぞれ黄色、紫色の線) では、磁場は  $10^{-6}$  T 以下 であることが分かった。図、図の解析結果と比較すると、TES と SQUID の位置において  $10^{-6}$  T 以下であるとい うことは一致している。

本測定は室温での簡易的なものではあったものの、A4K 磁気シールドによってスノート上にマウントされる TES と SQUID の位置では、動作に影響がない磁場として設定した要求値、10<sup>-6</sup> T 以下に地磁気が遮蔽されることが確 認できた。今後は、地磁気の磁場計測を行うことに適した、感度が良いホール素子を使った計測や、冷却した状態で の A4K シールドの磁気遮蔽能力に関して検証することを課題としたい。

## 7.6 まとめ

本章では、所有する希釈冷凍機でスノート冷却試験を試みる際に必要となる磁気シールドの開発を行った。

シールドに用いる磁性材料として A4K を選定し、A4K 磁気シールドの設計に先立って、円筒内径と円筒底部に空 ける X 線窓半径を決定する必要があった。A4K の材料物性を模した円筒シールドで内部磁場を有限要素法によって 解析をした。TES、SQUID それぞれがスノートにマウントされる位置は決まっており、双方の座標での磁場が 10<sup>-6</sup> T 以下となるように、円筒内径 r<sub>cvl</sub> と X 線窓半径 r<sub>win</sub> を変えて内部磁場を解析した。

円筒内径  $r_{cyl}$ の決定には SQUID が磁気シールド開口部に近いことから SQUID の座標での磁場を解析した。解析 を試みた  $23 \le r_{cyl} \le 28$ の範囲では SQUID の座標において磁場が  $10^{-6}$  T 以下であることが分かった。この SQUID への侵入磁場の解析値と、磁気シールドとスノートおよびサーマルシールドの干渉の観点から、円筒内径は 26 mm として設計することとした。

X 線窓半径  $r_{win}$  の決定には、TES が円筒底部に近いことから TES の座標での磁場を解析した。解析を試みた  $4 \le r_{win} \le 9$ の範囲では TES の座標において磁場が  $10^{-6}$  T 以下であることが分かった。TES への侵入磁場の解析 7.6. まとめ

値と、TES への X 線の受光視野の観点から X 線窓半径は 5 mm として設計することとした。

製作後の A4K シールドの磁気遮蔽能力を、ホール素子を用いて室温にて簡易的に測定した。測定の結果、TES と SQUID 双方がスノートにマウントされる位置において磁場は 10<sup>-6</sup> 以下であることが確かめられた。本測定は簡易 的なものであったために、さらに感度の高いホール素子を使用するなどして、A4K 内の精密な磁場測定を行うこと を今後の課題としたい。

# 第8章 TES カロリメータの基本特性

## 8.1 目的

バイアス共通読み出しでの X 線照射試験で使用する TES カロリメータを用いて、予備実験として独立読み出しで の X 線照射試験を試みた。目的は、使用した TES カロリメータの基本特性やエネルギー分解能を知るとともに本実 験結果とバイアス共通読み出しでの照射実験結果を比較することによって、バイアス共通読み出しでの課題点を明確 にすることである。

## 8.2 測定手法

TES カロリメータの基本的な特性としては R - T 測定、I - V 測定、ノイズ特性がある。以下にその特性について簡潔に述べ、その測定手法を説明する。

#### R-T 測定

TES の温度 T と抵抗値の R との関係を R-T 特性と呼び、その測定を R-T 測定と呼ぶ。R-T 測定から TES の超伝導転移温度  $T_c$ 、温度計感度  $\alpha$  を知ることができる。測定温度 T は、熱浴に置かれた温度計であるので、TES に生じるジュール発熱によって、TES の温度 T と熱浴温度  $T_{bath}$  に差が生じないよう TES に流す電流  $I_{TES}$  は小 さく設定する必要がある。

測定方法には、2種類ある。1つめの方法は、TES にある電流を流してその両端の電圧を測定する4端子測定法で ある。この方法では TES に正のフィードバックがかかるので熱浴の温度揺らぎに対して TES の温度が不安定にな るが、TES の抵抗値を精度良く求めることができるという利点がある。

もう1つの方法は、TES に定電圧をかけて TES に流れる電流変化を SQUID 電流計で測定する方法である。実際 には TES と並列にシャント抵抗  $R_s$ を入れ、一定のバイアス電流  $I_{\text{bias}}$ を流して行うので R は  $R_s$  に対する相対的 な値としか求まらない。この方法の利点は TES には負のフィードバックがかかるために、熱浴の温度揺らぎに対し て安定であるという長所がある。

測定における回路図を図 8.1 に示す。図 8.1 において TES を流れる電流 ITES は、

$$I_{\rm TES} = \frac{R_{\rm s}}{R_{\rm s} + R_{\rm TES}} I_{\rm bias} \tag{8.1}$$

である。SQUID を負のフィードバックで動作させた時、出力  $V_{out}$  は電流電圧変換係数  $\Xi$  と  $I_{TES}$  を用いて

$$V_{\rm out} = \Xi \ I_{\rm TES} \tag{8.2}$$

であるので、Rは2式より

$$R_{\rm TES} = \left(\frac{I_{\rm bias}}{V_{\rm out}}\Xi - 1\right) R_{\rm s} \tag{8.3}$$

とかける。 三は

$$\Xi = \frac{\mathcal{L}}{1 + \mathcal{L}} \frac{M_{\rm in}}{M_{\rm FB}} R_{\rm FB} \tag{8.4}$$

であるので、 $\mathcal{L} \gg 1$ の条件では相互インダクタンス  $M_{in}$ 、 $M_{FB}$ とフィードバック抵抗  $R_{FB}$  から  $\Xi$  を求めることが できる。



図 8.1: *R* – *T* 測定における回路図

## I - V 測定

熱浴温度  $T_{\text{bath}}$  が一定のもとで TES に流す電流  $I_{\text{TES}}$  と TES 両端電圧  $V_{\text{TES}}$  の関係を I - V 特性と呼ぶ。I - V 特性を測定するためには TES とシャント抵抗に流れる電流の合計であるバイアス電流  $I_{\text{bias}}$  を変化させ、各  $I_{\text{bias}}$  に 対して SQUID 電流計の出力  $V_{\text{out}}$  を測定する。

*I*-*V* 測定を行うことによって、各バイアス電流における TES の抵抗値を求めることができる。バイアス電流を 下げていくと、ある電流値で TES は遷移端から外れて超伝導状態となる。TES の温度計感度を最大限活かし、エネ ルギー分解能を追求するためには最適なバイアス電流を探すことが肝要である。

#### パルス測定

TES カロリメータに X 線や電気的パルスが入射した際の応答である。これによってカロリメータの応答関数  $S_I$  とその揺らぎであるエネルギー分解能  $\Delta E$  を求めることができる。エネルギー E のパルスが入射した際の TES に 流れる電流変化  $\Delta I_{\text{TES}}$  は

$$\Delta I_{\rm TES} = \frac{\alpha E}{CT} I_{\rm TES} \tag{8.5}$$

であり、出力信号の立ち下がり時定数 Teff は

$$\tau_{\rm eff} = \frac{C/G}{\mathcal{L}_0 + 1} \simeq \frac{nC}{\alpha G} \tag{8.6}$$

とかけるので、 $C/\alpha$ を求めることができる。熱浴温度が一定であるとき、ジュール発熱は TES の動作抵抗によらず に一定であるので

$$\Delta I \propto \alpha I \propto \frac{\alpha}{\sqrt{R_{\rm TES}}} \tag{8.7}$$

となり、TES の抵抗が小さいほど電流変化、すなわちパルスハイトが大きくなることが予測できる。

実際にはカロリメータの応答関数は様々な要因によって理想的な状態からずれてしまう。また、X 線光子の入射位 置や、熱化、熱拡散に由来するような揺らぎによってパルス応答関数はパルスごとにもばらついてしまう。これらの ばらつき要因について理解を深め、主に TES 製作プロセスでの対策を施すことが分解能の追求には欠かせない。

#### ノイズ 測定

TES カロリメータにパルスが入射していない状態での応答がノイズ特性である。一般に、測定におけるノイズの正体は自明である場合もあるが、複合的で発生源の特定が難しい場合も多い。測定においては、室温系の環境改善で可能な限り低減することが重要である。

ノイズ特性を得ることでその周波数や大きさがわかり、発生源の特定に役立つ。ノイズデータに対して最適フィル タ処理を施すことでノイズデータのパルスハイト分布を計算できる。このスペクトルはある有限な幅をもって 0 に ピークを持つ。スペクトルの半値全幅 Δ*I*<sub>baseline</sub> をベースライン幅と呼ぶ。エネルギー *E* の X 線パルスのパルスハ イトが *I* であるとき、

$$\Delta E_{\text{baseline}} = \frac{E}{I} \Delta I_{\text{baseline}} \tag{8.8}$$

によってベースライン幅をエネルギー単位 (eV) に換算できる。本論文では式 (8.8) で表される  $\Delta E_{\text{baseline}}$  をベース ライン分解能と定義する。ベースライン分解能は実際のエネルギー分解能におけるノイズの寄与を表している。TES カロリメータ固有なノイズや SQUID ノイズ、室温読み出し系ノイズなどは個別に計算することができる。これ以外 の寄与として熱化や熱拡散、TES や SQUID の非線形に由来する他の寄与がある。

## 8.3 セットアップ

## 8.3.1 使用した TES カロリメータ

本実験で使用した TES カロリメータは 64 ピクセルアレイ化されたものを使用した。TES は成膜された Ti/Au からできている。TES の設計パラメータについて表 8.1 にまとめる。図 8.2 に TES の顕微鏡写真を載せる。

表 8.1: 使用した TES のプロセスパラメータ			
		size	$120\times120~(\mu {\rm m})$
Absorber	Au	thickness	600 (nm)
TEC	T://	size	$180 \times 180 \; (\mu {\rm m})$
165	11/Au	thickness	$40/90 \; (nm)$



図 8.2: 使用した TES の顕微鏡写真。 (左図): 基板全体 (5.2 mm 角)、(右図): TES ピクセル付近の拡大写真。

使用した 64 ピクセル TES は 8 行 8 列からなる番号で 11 ~ 88 とピクセル番号によって識別されている。使用した TES のピクセル番号と、本章で定義するチャネル番号 (CH) について表 8.2 にまとめる。

ピクセル番号	チャネル番号
pixel 81	CH 1
pixel 83	CH 2
pixel 85	CH 3

表 8.2: ピクセル番号とチャネル番号の対応 ピクセル番号 チャネル番号

## 8.3.2 使用した SQUID

本実験では TES 64 ピクセルアレイのうち、3 ピクセルの読み出しを試みた。使用した SQUID は ISAS-H20 であ る。TES と並列に接続されるシャント抵抗の値は 5 mΩ である。SQUID の顕微鏡写真を図 8.3 に載せる。ISAS-H20



図 8.3: 使用した H20 SQUID の顕微鏡写真。基板の 1 辺は 2.5 mm である。。

の主な設計性能を表 8.3 に示す。使用した基板は、独立読み出し用に開発されたものであってバイアス共通型ではない。 独立的に読み出す場合、SQUID 基板は 3 つ必要である。本実験では TES 3 ピクセルの読み出しに全て同じ SQUID を用いることとし、ISAS-H20 SQUID チップを 3 枚使用した。

表 8.3: ISAS-H20 の主な設計性能			
項目	記号	単体 (ISAS-H)	アレイ (ISAS-20)
臨界電流	$I_0 \; (\mu \mathrm{A})$	10	10
発熱	P (nW)	2.0	40
トランスインピーダンスゲイン	$Z~(\Omega)$	7.0	140
電流ノイズ	$I_{\rm N}~({\rm pA}/{\sqrt{{\rm Hz}}})$	13.5	3.0

#### 8.3.3 低温ステージ

TES と SQUID をマウントし、セットアップした低温ステージを図 8.4 に示す。低温ステージは無酸素銅 (厚さ 2.0 mm) を加工したものを使用し、64 ピクセル TES、SQUID チップ 3 つをワニスによってステージと接着した。そ の他に低温ステージの温度計として酸化ルテニウム温度計 (RuOx)、低温ステージの温度コントロールのためのヒー ターとしてチップ抵抗 100  $\omega$  (常温)、SQUID の磁場トラップ解除用ヒーターとしてチップ抵抗 10 kΩ (常温) を絶縁 のための紙とともにワニスで固定した。



#### 図 8.4: 低温ステージ写真

X 線源は <sup>55</sup>Fe を使用した。使用した線源の半減期は 2.73 年であり、低温用特殊パッケージに入った密封放射線源 である。<sup>55</sup>Fe 線源からは特性 X 線として Mn Kα 線、Mn Kβ 線が放射される。本実験でのパルスハイト、エネル ギー分解能は全て 5.9 keV の Mn Kα 線に対するものである。Mn Kα 線は微細構造として Kα<sub>1</sub> と Kα<sub>2</sub> があり、こ れらの強度比は Kα<sub>1</sub>: Kα<sub>2</sub>: Kβ = 20: 10: 3 である。エネルギーはそれぞれ、5.89875 keV、5.88765 keV、6.48637 keV である。これらの特性 X 線の自然幅は  $\leq$  4.5 eV であり、エネルギー分解能を追求するためにはこの自然幅を考 慮する必要がある。[8] によると Mn Kα<sub>1</sub> 線、Mn Kα<sub>2</sub> 線はそれぞれ 5 本、2 本の Lorenzian の重ね合わせで表され る。それらのエネルギーと自然幅 (FWHM) を表 8.4 に示す。

	$\propto 0.4$ : MII K 化 称 (C)	わりる厥祖悟迫
ピーク	エネルギー (keV)	自然幅 (FWHM, eV)
$\alpha_{11}$	5.8989	1.715
$\alpha_{12}$	5.8979	2.043
$\alpha_{13}$	5.8948	2.043
$\alpha_{14}$	5.8965	2.043
$\alpha_{15}$	5.8994	2.043
$\alpha_{21}$	5.8877	2.043
$\alpha_{22}$	5.8865	2.043

表 8.4: Mn Kα 線における微細構造

磁気シールドはクライオパーム磁気シールド (内径 28 mm、長さ 154 mm、厚み 1 mm)を使用した。強磁性体で あるクライオパームは、低温において高い透磁率と磁気遮蔽能力を発揮する。低温ステージに磁気シールドを取り付 け、希釈冷凍機に取り付けた様子を図 8.5 に載せる。



図 8.5: 希釈冷凍機に低温ステージをマウントした様子。ステージはクライオパーム磁気シールドで覆われている。

### 8.3.4 室温読み出し回路

本実験の室温読み出し系は Magnicon 社 XXF-1 を使用した。XXF-1 を使用することによって TES と SQUID に 流す電流や、SQUID のフィードバックの制御等をコンピュータから簡易的に行うことが可能となる。XXF-1 の基本 性能は C の表 C.1 に示した。

SQUID 出力は ~ 1 mV と微弱であり、ノイズの影響を低減するためには冷凍機配線ポートと室温アンプまでの距離が短いほど好ましい。冷凍機配線と XXF-1 プリアンプを結ぶ配線を自作し、図 8.6 のようにセットアップした。この配線は、銅網線で2重にシールドし、さらにその周囲をアルミホイルで覆うことによって外来ノイズ耐性を高めた。

## 8.4 SQUID の動作確認

SQUID の動作確認を 4 K と 175 mK で行った。Magnicon XXF-1 を用いてフィードバックコイルに 3  $\Phi_0$  に相当 する電流値を peak to peak とした sin 波を周期 1 Hz で入力した。XXF-1 のプリアンプ (ゲイン 2000 倍) で増幅さ れた SQUID の出力を波形取得器 (横河 DL708E) で取得した。各測定で 20 回取得したデータについてその平均値 と、平均値の標準誤差 1  $\sigma$  のエラーバーとしてプロットした結果を図 8.7 に示す。

4 K での  $\Phi - V$  取得結果から求めたフィードバックコイル相互インダクタンスについて表 8.5 に示す。表 8.5 の  $M_{\rm FB}$  の値と、5.4.2 の ISAS-H20 評価実験で求めた入力コイルインダクタンス 75.7 pH によって、式 (8.4) から電流 電圧変換係数 Ξ が計算される。求めた Ξ を以後用いることとする。

図 8.7 より、175 mK では Φ-V カーブが 4 K での測定結果ち比較して歪み、線形範囲が小さくなっていることが 分かる。

TES が常伝導状態である 230 mK で取得したノイズスペクトルを図 8.8 に示す。測定機器は FFT アナライザ HP 35670A を使用し、周波数範囲 1 Hz ~ 100 kHz でノイズスペクトルの取得を行った。スペクトルが平坦となる周波



図 8.6: (A): 信号読み出し配線用ボックス、(B): HK 配線ボックス、(C): XXF-1。信号読み出しは配線用ボックスに は TES や SQUID の動作に必要な配線を接続し、HK 配線ボックスは極低温ステージの温度計の読み出しや、温度 制御用ヒーター用の配線がつながっている。



図 8.7: SQUID Φ – V 取得結果。左が 4 K、右が 175 mK の結果であり、上から順に CH1 ~ CH3 の結果である。

表 8.5: 4 K での Φ – <u>V カーブから求めた相互</u>インダクタンスの値

Channel	$M_{\rm FB}~({\rm pH})$	
1	$69.9\pm0.5$	
2	$69.8\pm0.4$	
3	$69.5\pm0.3$	



図 8.8: 230 mK でのノイズ取得結果 (CH1 ~ CH3)

数帯域では、ノイズレベルの典型値は CH1 と CH2 が 20 pA/√Hz 程度、CH3 が 30 pA/√Hz 程度であることが分 かった。これは典型的な TES の電流ノイズレベルと同程度の大きさである。

## **8.5** *R* – *T* 測定

本測定では SQUID 電流計を用いる方法で R-T 測定を行った。測定での SQUID 動作点の設定について表 8.6 にまとめる。熱浴温度は 220 mK から Lake Shore の AC レジスタンスブリッジ LR370 で温度制御をしながら下げて

$\overline{\chi}$ 8.0: $K - I$ 側足 CO SQUID 動作品の設定				
Channel	バイアス電流 I <sub>SB</sub>	電圧オフセット V <sub>off</sub>	磁束オフセット Φ <sub>off</sub>	動作点
	$(\mu A)$	$(\mu V)$	$(\mu A)$	$(\Phi_0)$
1	22	540.18	34.48	0.25
2	21	310.16	8.76	0.25
3	20	174.80	-11.98	0.16

表 8.6: *R* – *T* 測定での SQUID 動作点の設定

いった。XXF-1 にて TES バイアス電流  $I_{\text{bias}}$  は直流 2.02  $\mu$ A、フィードバック抵抗は 100 kΩ と設定した。SQUID 出力  $V_{\text{out}}$  をデジタルマルチメータ 34405A で計測した。

熱浴温度を 190 mK ~ 220 mK の範囲で変化させた R - T 測定結果を図 8.9 に示す。使用した TES は 3 チャネル ともに超伝導転移を確認することができた。各チャネルの転移温度は ~ 210 mK であり、比較的 R - T 特性が揃った TES であるということが分かった。



図 8.9: R-T 測定結果。3 チャネルともに転移温度が~210 mK 付近であることが分かる。

# 8.6 *I* – *V* 測定

熱浴温度 175 mK で LR370 を用いて温度制御を行い、I - V 測定を行った。XXF-1 でバイアス電流  $I_{\text{bias}}$  1500  $\mu$ A から徐々に下げていき、出力電圧をデジタルマルチメータ 34405A で計測した。結果を図 8.10 に示す。



図 8.10: 175 mK でのI - V 測定結果。(左図): TES を流れる電流と TES 両端電圧のプロット  $I_{\text{TES}} - V_{\text{TES}}$ 、(右図): TES の抵抗値と TES を流れる電流のプロット  $R_{\text{TES}} - I_{\text{bias}}$ 

バイアス電流  $I_{\text{bias}}$  を下げていくとある電流値で SQUID 出力が発散する。この電流値を本論文では転移電流値と呼ぶ。転移電流値以下では、TES が自己発熱で常伝導状態を維持できずに不安定な状態となり、遷移端から外れて完全に超伝導状態になってしまう。超伝導状態での抵抗値 (残留抵抗値) がシャント抵抗に比べて十分小さく、 $I_{\text{bias}}$ のほとんどが TES に流れてしまう。この電流は、FLL 回路でフィードバックできる量を超過した磁束となって SQUID に入力されるためにその出力が発散してしまう。I - V 測定から求めた 3 チャネルの転移電流値に関して表 8.7 に示す。I - V 測定の結果からパルス測定におけるバイアス電流  $I_{\text{bias}}$  が決定される。

表 8.7: I - V 測定から求めた各チャネルの転移電流 Channel 転移電流値 ( $\mu$ A)

Unamer	較多电加恒 ( $\mu A$ )
1	605
2	615
3	555

## 8.7 パルス測定

*I – V* 測定の結果をもとにバイアス電流を決定し、CH1 のパルス取得を行った。パルス波形は横河波形取得器 DL708E で取得した。表 8.8 にパルス取得時の DL708E のセットアップを示す。

表 8.8: パルス測定での	DL708E の設定
レコード長	10  k points
サンプリング周波数	MS/sec
トリガーポジション	55 %、下向き
帯域幅 (LPF)	500  kHz

熱浴温度は 175 mK に温度制御を行った。パルス測定中の温度揺らぎは 40  $\mu$ K (FWHM) 程度であった。TES バ イアス電流は  $I_{\text{bias}} = 625\mu$  でパルス取得を行った。表 8.9 に測定セットアップを示す。

表 8.9: CH1 でのパルス	取得時の設定
SQUID バイアス電流	$20~\mu {\rm A}$
磁束オフセット	$9 \ \mu A$
電圧オフセット	155 $\mu V$
フィードバック抵抗	100 k $\Omega$
GB積 (GBP)	$0.83~\mathrm{GHz}$
取得パルス数	1500

取得したパルスの測定結果について、平均パルスとノイズスペクトルを図 8.11 に示す。ノイズスペクトルは電流電 圧変換係数 Ξ を用いて電流密度換算している。



図 8.11: (左図): 1500 回取得した平均パルス、(右図): 電流換算したノイズスペクトル

図 8.11 の平均パルスより、この TES の立ち下がり時定数は 30 µs 程度であることが分かった。また、得られたパ ルスハイトを電流電圧関係数によって計算すると 12 µA<sub>pp</sub> であった。平均パルスとノイズスペクトルから作成を行っ たテンプレートと、各チャネルの平均パルスとノイズスペクトルから作成を行った S/N 比スペクトルを図 (8.12) に 示す。



図 8.12: 平均パルスとノイズスペクトルから求めた結果。(左図): S/N 比スペクトル、(右図): テンプレート

得られたテンプレートを用いて取得した全てのイベントに対して最適フィルタ処理を行い、パルスハイトを求めた。 このパルスハイトと入射 X 線エネルギー E は線形であることが理想的であるが、実際には TES のダイナミックレ ンジを超える信号が入射し、遷移端を超えることによるパルスの頭打ちや、SQUID の応答の非線形成分が影響する。 これら非線形応答は補正する必要がある。補正には、原点 (PHA = E = 0) を通る二次曲線

$$PHA = aE^2 + bE \tag{8.9}$$

でフィッティングする。得られた定数 a、b を用いて PHA から補正後のエネルギー E' を計算する。

$$E' = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4aPHA}}{2a}$$
(8.10)

輝線スペクトルは K $\alpha_1$ 、K $\alpha_2$ 等の微細構造を持ち、それぞれが自然幅を持っている。自然幅を考慮した上でのフィッ ティングを行うために、自然幅 Γ による Lorentz 関数  $L(x; \Gamma)$  と Gauss 関数  $G(x; \sigma)$  の合成積である Voigt 関数  $H(x; \sigma, \Gamma)$  を用いてフィッティングを行う。

$$H(x;\sigma,\Gamma) = A \int_{-\infty}^{\infty} G(x;\sigma) L(x-x';\Gamma) dx'$$
(8.11)

$$G(x;\sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad L(x;\Gamma) = \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{1}{x^2 + (\Gamma/2)^2}$$
(8.12)

図 8.13 と表 8.10 に最適処理とフィッティングによって得られた結果を示す。表 8.10 において本来のエネルギー中 心値は、MnKα が 5893.98 eV、MnKβ が 6846.37 eV である。

5.9 keV の MnKα に対するエネルギー分解能は 20.37 eV (FWHM) であった。この結果は STEM-TES システム の要求値である 10 eV を満たしてはいない。S/N 比から決まるベースライン分解能 7.43 eV であることから、ノイ ズ以外の要因によって分解能が 3 倍近く劣化していることが分かる。この結果から、パルスのイベントごとのばらつ きや頭打ちが起きている可能性が示唆された。詳細な追求をここでは行わないが、エネルギー分解能劣化要因の追求 と、TES 素子としてのエネルギー分解能の向上は今後の課題としたい。



図 8.13: (左上図): エネルギースペクトル、(右上図): S/N 比で決まるベースライン分解能、(左下図): MnKαのフィッ ティング結果、(右下図): MnKβのフィッティング結果

本実験で使用した TES のエネルギー分解能は、システムの要求値は満たしていないものの、20 eV (FWHM) 程度 であることから、バイアス共通読み出しでの分解能劣化の検証および課題の洗い出しにはは十分な性能を持っている と考えられる。

## 8.8 クロストーク測定

クロストークを測定するために、CH1 にトリガーをかけ、CH1 と CH2 の波形を 100 回取得した。CH1 の TES に X 線が入射した時のその信号波形と、X 線が入射していない CH2 の波形を取得することで、CH2 に現れるクロ ストークについてその大きさを 100 回取得した波形の平均を 8.14 に示す。

図 8.14 より、クロストークは peak to peak 値で 2 mV であり、これは信号に対して 0.2 % 以下であることが分か る。クロストークの要因は、TES 基板上での熱的なクロストークや配線間の電磁カップリング等の可能性が考えられ るが、ここでは詳細な議論は行わない。いずれにせよ、この程度の大きさのクロストークであれば、本実験のように 各ピクセルを独立的に読み出す場合においては、信号に対して大きな影響を及ぼさないであろう。

表	ŧ 8.10: CH1 パルス解析結果。 <i>E</i> c はエネルギー中心値を示す		
	項目		結果
-	非線型性の補正	a	$-1.3117 \times 10^{-8}$
		b	$3.0372\times 10^{-4}$
	ベースライン分解能	$\Delta E_{\text{baseline}}$	$7.43 \mathrm{~eV}$
-	MnKo	$E_{\rm c}  ({\rm MnK}\alpha)$	$5894.8~{\rm eV}$
	ΜΠΚα	$\Delta E (\mathrm{MnK}\alpha)$	$20.37\pm0.88~{\rm eV}$
-	M. V.A	$E_{\rm c}  ({\rm MnK}\beta)$	$6487.9~{\rm eV}$
winkp	$\Delta E (\mathrm{MnK}\beta)$	$24.00\pm3.03$	



図 8.14: (右図): CH1 と CH2 の平均波形。(右図): 信号ピーク付近の拡大図。クロストーク波形である CH2 の電圧 値を 100 倍にしている。

#### 8.9 考察

本実験では、バイアス共通読み出しで使用する TES カロリメータを用いて X 線照射試験を試み、その基本的な特 性について調べた。

まず、*R*-*T* 測定によって 3 チャネルともに超伝導転移を確認した。転移温度は 3 チャネルともに 210 mK 付近 であり、移温度がよく一致していることが分かった。

*I*-*V* 測定によってパルス測定の際に流すバイアス電流値 (TES の動作点)を決定した。また、*I*-*V* 特性から TES が完全に超電導となる 転移電流値には 3 チャネル間で 40 μA の差があった。バイアス共通読み出しでは 8 チャ ネル間で同一のバイアス電流を流すため、この差によって各 TES ピクセルにとって最適な動作点を選ぶことができ ないことが考えられ、エネルギー分解能を制限する一因になる可能性がある。

パルス測定では、CH1 に関してパルス波形取得を行った。175 mK の熱浴温度で、I - V 測定の結果から TES バイアス電流は  $I_{\text{bias}} = 625 \ \mu\text{A}$  とした。このバイアス電流でパルス取得を行った結果、平均パルス波形から時定数 は 30  $\mu$ s 程度であった。ベースライン分解能 7.43 eV (FWHM)、MnK $\alpha$  線に対してエネルギー分解能は 20.37 eV (FWHM) であった。この結果は STEM-TES システムの要求値である 10 eV を満たしてはいない。S/N 比から決 まるベースライン分解能 7.43 eV と比較して 3 倍近く劣化していることから、ノイズ以外の要因パルスのイベント ごとのばらつきや、頭打ちが起きている可能性が示唆される。分解能劣化の要因追求および対策は今後の課題の1つ としたい、一方で、この分解能はバイアス共通読み出しでの照射実験に用いるには十分な性能であるとして、本実験 で使用した TES を使用することとする。

クロストーク測定を行った結果、peak to peak 値でクロストークの大きさは信号に対して 0.2 % 以下であった。要

因としては TES 基板上での熱的クロストークや、配線間のカップリングによる可能性があるものの、信号に対して 大きな影響を及ぼす大きさではないと考えられる。また、バイアス共通読み出しでクロストーク測定を行った際に、 要因の切り分けを行うには十分に小さい大きさであることを確認した。

# 第9章 バイアス共通読み出しでのX線照射実験

## 9.1 目的

第8章で使用した TES を用いて X 線照射試験を行い、バイアス共通読み出しでの7ピクセルの同時動作を試み る。本実験では第9.3章で開発した SQUID を用いて実験を行い、TES および SQUID のバイアス共通読み出しでの X 線パルス取得の実証を行う。また、予備実験として行った第8章の独立読み出し試験の結果と比較することで、バ イアス共通読み出しによる課題点を洗い出すことを主目的とする。

## 9.2 セットアップ

## 9.2.1 使用した TES と SQUID

使用した TES は第8章で使用したものであり、設計パラメータは表8.1 に記した通りである。表9.1 に本章で定 義するチャネル番号と TES ピクセル番号の対応を示す。

チャネル番号	コメント
CH 1	予備実験で使用
CH 2	
CH 3	予備実験で使用
CH 4	
CH 5	
CH 6	予備実験で使用
CH 7	
	チャネル番号 CH 1 CH 2 CH 3 CH 4 CH 5 CH 6 CH 7

表 9.1: 使用した TES のピクセル番号とチャネル番号の対応

使用した SQUID は第 9.3 章で開発したバイアス電流を共通化した ISAS-H20 (250 nH) である。ISAS-H20 の主な 設計性能は表 8.3 に示した通りである。TES と並列に接続されるシャント抵抗は 5 mΩ である。使用する ISAS-H20 (250 nW) 基板は SQUID 8 アレイが直列に並んでいる。このため、SQUID バイアス電流を流すことによって、8 ア レイ全てから発熱が生じる。基板全体で生じる発熱の最大値は表 8.3 より 320 nW と計算される。

この SQUID 基板には TES の立ち上がり時定数を大きくするためのダンピングコイル (インダクタンス 250 nH) が TES と入力コイルの間に直列に接続されている。SQUID 基板上にある SQUID 8 アレイのうち、アレイ番号 2 ~ 8 を CH 1 ~ 7 として使用した。図 9.1 に、使用した TES と SQUID 基板、および基板上で各チャネルに対応する TES、SQUID アレイを示す。

#### 9.2.2 低温ステージ

セットアップした低温ステージを図 9.2 に示す。ステージおよびステージ内での各素子の配置は予備実験でのそれ とほとんど変わりはない。X 線源は予備実験と同じく <sup>55</sup>Fe を使用し、カウントレートが同程度になるように (X 線 源と TES 基板の間の距離が等しくなるように) X 線源を治具で固定した。



図 9.1: (左図): 使用した 64 ピクセル TES 基板、(右図): バイアス電流共通型 SQUID ISAS-H20 (250 nH)。チャネ ル番号は水色で記した。TES 基板は 5.2 mm 角、SQUID 基板は 5 mm 角である。



図 9.2: 本実験での低温ステージ。鉄線源は TES 基板と約 5 mm 離れるように固定し、計数率は 1 ピクセルあたり 0.5 cps 程度になるようにした。

本実験では独立読み出し実験の場合と同じ希釈冷凍機を用いた。また、磁気シールドは予備実験と同じく円筒形ク ライオパームシールド (内径 28 mm、厚さ 154 mm、厚み 1 mm)を用いた。希釈冷凍機 mixing 部分に接続した極 低温ステージをこの磁気シールドで覆うことで、地磁気および外来の磁気ノイズを遮断する。

## 9.2.3 室温読み出し系

本実験で使用した希釈冷凍機には、極低温ステージから伸びる冷凍機配線が MIL コネクタ (丸型コネクタ) で 4 つ のポートに通じており、このポートから各機器への配線を製作することで各信号の読み出しが可能となる。本実験で はこのうち 2 つのポートを使用した。一方は TES CH 1 と ハウスキーピング (RuOx 温度計、温度制御用ヒーター 100  $\Omega$ 、SQUID 磁場トラップ解除用ヒーター 10 k $\Omega$ ) の読み出しに使用し、もう一方は TES CH 2 ~ 7 の読み出し に使用した。

配線はポートに直接接続するのではなく、自作した変換ボックスを介して一度 Dsub 25 ピンコネクタに変換した。 CH2 ~ CH7 変換ボックス側の Dsub 25 ピンコネクタには EMI フィルタ (1 nF) が施されたものを使用した。変換 ボックスから各測定装置に繋がる配線を自作し、配線は外来ノイズ耐性を高めるために同軸ケーブルとツイストペア ケーブルで作った。さらに外来ノイズから守るために配線の外側は銅網線でシールドをした (図 9.3)。



図 9.3: (左上):変換ボックスを開けたとき。(右上):変換ボックスはアルミホイルで巻いて外来ノイズ耐性を高めた。 (左下):変換ボックスと冷凍機本体を密着させ、隙間から電磁ノイズが侵入しないように治具で固定した。(右下):測定 に使用したヘッドアンプ。アルミホイルで覆うことでノイズ耐性を高めている。

室温読み出し系はマルチチャネル駆動回路を使用した。この駆動回路はヘッドアンプと連動しており、TES / SQUiD バイアス電流やフィードバック (FLL) の制御を PC 上で簡易的に行う事ができる。最大で 10 チャネルの TES の読み 出しを行うことが可能である。この駆動回路には SQUID の動作点を選ぶために自動調整機能がある。これは SQUID の電圧出力 (peak to peak) の最大値の 70 % のときをバイアス電流として選択し、 $\Phi - V$  特性における 0 ~ ±0.5  $\Phi_0$ の中心点を動作点として選ぶ機能である。本測定での SQUID の動作点は、この自動調整機能によって決定した。マ ルチチャネル駆動回路およびヘッドアンプの仕様は C の表 C.2 に示した通りである。
ヘッドアンプ内には積分回路があり、ループゲインおよび周波数特性は帰還回路に繋がれたコンデンサ容量  $C_f$  に よって変更することが可能である。コンデンサの変更には該当する IC ソケットにリード線付きコンデンサを差し込 めばよい。本実験では容量を全て  $C_f = 1$  nF として測定を行った。

## 9.3 SQUID の動作確認

SQUID の動作確認として CH3 の  $\Phi - V$  特性 4 K と 250 mK で取得した。取得には、フィードバックコイルに外 部信号発生器から電圧をかけ、10 k $\Omega$  のバイアス抵抗で電流に変換して流すことで取得した。図 9.4 に取得した  $\Phi - V$  特性を示す。4 K での  $\Phi - V$  特性の結果から、フィードバックコイル相互インダクタンスは  $M_{\rm FB} = 70.4 \pm 0.8$  pH



図 9.4: CH 3 の Φ − V 測定結果。4 K で取得した結果 (左図) と 250 mK で取得した結果 (右図)。CH 3 のみ Φ − V カーブの取得を行った。

と求まった。この値と第章の ISAS-H20 の開発で求めた入力コイルインダクタンス  $M_{\rm in} = 76.8 \pm 0.1$  pH を本章では 用いることとする。

また、TES が常伝導状態である温度である 220 mK でノイズ測定を行った。測定機器は FFT アナライザ HP 35670 A を用いて行い、1 Hz ~ 100 kHz の範囲で測定を行った。SQUID の動作点はマルチチャネル駆動回路の自動調整 機能を用いて選択し、FLL をかけた状態で測定を行った。測定結果を図 9.5 に示す。ノイズスペクトルにおいて平坦



図 9.5: 220 mK でのノイズ取得結果。(左図): CH1 ~ CH4 の結果、(右図): CH5 ~ CH7 の結果。

な成分が支配的となる帯域では、典型値が 30 pA/√Hz 程度であった。また、10 kHz 付近から立ち上がり、60 kHz 付近にピークを持つような構造があることが分かる。

## **9.4** *R* – *T* 測定

SQUID 電流計を用いる方法で R-T 測定を行った。TES とシャント抵抗に流れる電流の和を バイアス電流  $I_{\text{bias}}$  とする。本測定ではバイアス電流  $I_{\text{bias}} = 2 \mu \text{A}$  を流した。SQUID 出力  $V_{\text{out}}$  をデジタルマルチメータ 34405A で計測した。この  $V_{\text{out}}$ 、と TES バイアス電流  $I_{\text{bias}}$ 、9.3 で求めた SQUID 相互インダクタンスを用いて。式 (8.3)、式 (8.4) から  $R_{\text{TES}}$ を求める。熱浴温度を 220 mK から 190 mK まで変化させた R-T 測定結果を図 9.6 に示す。使用 した TES は 7 チャネルともに TES の超伝導転移を確認することができた。



図 9.6: 7 ピクセルの R-T 測定結果。

R-T 特性を表す関数として理論的な式を与えることは難しいが、抵抗変化を表す経験的なモデルとして

$$R(T) = \frac{R_0}{1 + \exp\left(-\frac{T - T_c}{T_1}\right)} \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{T - T_c}{T_2}\right)} + R_c$$
(9.1)

という形の関数を用意する。ここでは、この関数によってデータをフィットすることによって、転移温度や温度計感度  $\alpha$  を決定することとする。ただし、転移温度  $T_c$  は式 (9.1) の形から  $R(T_c) = R_N/4 + R_c$  を満足する値としてここでは定義する。

式 (9.1) によって求まった各チャネルの転移温度と温度計感度  $\alpha$  について表 9.2 にまとめる。7 チャネルの転移温度は 2 mK 以内で一致しており、7 チャネル間で R - T 特性が揃った TES であるということが分かった。

独立読み出しの際には転移温度が 210 mK 程度であったのに対して、本実験では 200 mK 付近に転移温度が下がっ ていた。これは、実験セットアップの組み替えのために一度冷凍機を昇温させたことによる、TES 基板と熱浴との熱 伝導度が変化したことに起因すると考えられる。独立読み出しの際の方が転移温度が高かったことから、熱伝導度が 本実験と比較して良かったことが考えられる。この議論は本章の 9.6.3 で再度行う。

$\sim$	0.2. I C		
	Channel	転移温度 $T_c$ (mK)	温度計感度 $\alpha$
	1	198.2	188.6
	2	197.0	225.9
	3	196.3	217.2
	4	197.0	266.1
	5	196.5	247.7
	6	196.3	266.7
	7	196.9	240.7

表 9.2: 7 ピクセルの R – T 測定で求まった転移温度

## 9.5 *I*-V 測定

7 ピクセルでの X 線パルス取得に向けて TES の動作点 (TES に流すバイアス電流値) を決めるために I - V 測定を行った。測定は熱浴温度 100 mK、150 mK、175 mK で行った。SQUID 出力  $V_{out}$  は、デジタルマルチメータ 34405A で計測した。図 9.7 に各温度で取得した I - V 測定結果と、バイアス電流  $I_{bias}$  と TES 抵抗値  $R_{TES}$  の関係  $I_{bias} - R_{TES}$  のプロットを示す。

表 9.3 に各温度での転移電流値を示す。転移電流値とは、I - V特性においてバイアス電流値  $I_{\text{bias}}$  を下げていった際、初めて SQUID の出力が発散してしまう時のバイアス電流値  $I_{\text{bias}}$  の値である。転移電流値以下では SQUID の出力が発散してしまうのでパルスの取得を行うことはできない。

11	入 5.5.1 V 固定 2 5 次ようた日面及ての私俗电価値						
Channel	at 100 mK ( $\mu A$ )	at 150 mK ( $\mu A$ )	at 175 mK ( $\mu A$ )				
1	545	455	170				
2	450	395	175				
3	505	410	155				
4	480	395	160				
5	495	405	155				
6	470	385	155				
7	500	375	155				

表 9.3: *I – V* 測定から求まった各温度での転移電流値

パルスを取得する際には TES を超伝導遷移端にて動作させるため、転移電流値よりも大きい電流を  $I_{\text{bias}}$  として流す必要がある。7 ピクセルを同時動作させるためには、7 ピクセルそれぞれの転移電流値よりも大きい電流を流す。 そのためには各温度での転移電流値の最大値よりも大きい電流を  $I_{\text{bias}}$  として流せばよい。その値は、表 9.3 より 545  $\mu$ A (at 100 mK)、455  $\mu$ A (at 150 mK)、175  $\mu$ A (at 175 mK)、であることがわかる。

#### 9.6 パルス測定

前章での *I – V* 特性の結果を参考に、100 mK、150 mK、175 mK でパルスの取得を試みた。本章ではそれらの 結果の詳細について述べる。パルス波形の取得には横河波形取得器 DL708E を使用した。表 9.4 にパルス取得時の DL708E の設定を示す。カウント数をサンプリング周波数に関しては全ての測定において同一ではなかったために、 各測定について述べる際に記すこととする。



図 9.7: 100 mK での I - V 測定結果 (上段左) と  $I_{\text{bias}} - R_{\text{TES}}$  (上段右)、150 mK での I - V 測定結果 (中段左) と  $I_{\text{bias}} - R_{\text{TES}}$  (中段右)、175 mK での I - V 測定結果 (下段左) と  $I_{\text{bias}} - R_{\text{TES}}$  (下段右)

表 9.4: パルス測定での DL708E の設定				
レコード長	10 k points			
トリガーポジション	55 %、立ち下がりエッジ			
帯域幅 (LPF)	500  kHz			

#### 9.6.1 100 mK での結果

100 mK の測定では、7 ピクセル同時動作を試み、X 線パルスを取得した。パルス取得時の温度揺らぎは 90  $\mu$ K (FWHM) 程度であった。DL708E のサンプリング周波数は 10 MS/sec でパルス波形の取得を 1000 回行った。7 ピクセルを同時動作させてパルスを取得するためには  $I_{\text{bias}} > 545 \ \mu$ A である必要がある。マルチチャネル駆動回路で  $I_{\text{bias}} = 550 \ \mu$ A を設定し、7 ピクセル化で共通化された TES バイアス電流として流すこととした。I - V 特性から 求まった  $I_{\text{bias}} = 550 \ \mu$ A のときの各チャネルの抵抗値を表 9.5 に示す。

表 9.5: 100 mK でのパルス取得 (I<sub>bias</sub> = 550µA) における各チャネルの TES 抵抗値

Channel	TES pixel	$R_{\rm TES}~({ m m}\Omega)$
1	81	42.56
2	82	48.17
3	83	49.03
4	73	47.42
5	84	52.97
6	85	50.74
7	75	49.59

図 9.8 に各チャネルの平均パルスとノイズスペクトル、および平均パルスとノイズスペクトルから作成を行ったテンプレートを示す。テンプレートの作成では S/N 比の劣化を防ぐために CH1、CH2、CH4 ではカットオフ周波数を 50 kHz とした。

得られたテンプレートを用いて取得した全てのイベントに対して最適フィルタ処理を行い、PHA を求めた。この パルスハイト (PHA) と入射 X 線エネルギー E は線形であることが理想的であるが、実際には TES のダイナミッ クレンジを超える信号が入射し、遷移端を超えることによるパルスの頭打ちや、SQUID の応答の非線形成分が影響 する。これら非線形応答は補正する必要がある。補正には原点 (PHA = E = 0) を通る二次曲線

$$PHA = aE^2 + bE \tag{9.2}$$

でフィッティングする。PHA は MnK $\alpha$  と MnK $\beta$  の結果を用いる。得られた定数 a、b を用いて PHA から補正後 のエネルギー E' を計算する。

$$E' = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a \text{PHA}}}{2a} \tag{9.3}$$

輝線スペクトルは K $\alpha_1$ 、K $\alpha_2$ 等の微細構造を持ち、それぞれが自然幅を持っている。自然幅を考慮した上でのフィッ ティングを行うために、自然幅  $\Gamma$  による Lorentz 関数  $L(x;\Gamma)$  と Gauss 関数  $G(x;\sigma)$  の合成積である Voigt 関数  $H(x;\sigma,\Gamma)$  を用いてフィッティングを行う。

$$H(x;\sigma,\Gamma) = A \int_{-\infty}^{\infty} G(x;\sigma) L(x-x';\Gamma) dx'$$
(9.4)

$$G(x;\sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad L(x;\Gamma) = \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{1}{x^2 + (\Gamma/2)^2}$$
(9.5)



図 9.8: (左列): 平均パルス波形、(中央列): ノイズスペクトル、(右列): 平均パルスとノイズスペクトルから作成した テンプレート波形。上から順に 100 mK で測定した CH1 ~ CH7 の結果である。

得られたテンプレートを用いて、取得した全てのイベントに対して最適フィルタ処理を行い、パルスハイト (PHA) を求めた。PHA と *E* の関係は、非線形性を式 (9.2)の二次関数によって補正を行った。補正結果を表 9.6 に示す。

☆ 5.0. 癶 (5.2) によう9F林主任の間正相不					
Channel	a	b			
1	$-2.7026 \times 10^{-8}$	$5.7813\times10^{-4}$			
2	$-8.9702 \times 10^{-8}$	$2.4048\times 10^{-4}$			
3	$-1.1766 \times 10^{-8}$	$3.2202\times 10^{-4}$			
4	$1.1154\times 10^{-9}$	$1.8524\times 10^{-4}$			
5	$-1.0141\times10^{-8}$	$2.3749\times10^{-4}$			
6	$-9.9635\times10^{-9}$	$2.8830\times 10^{-4}$			
7	$-1.3016\times10^{-8}$	$3.0167\times 10^{-4}$			

表 9.6: 式 (9.2) による非線型性の補正結果

表 9.6 の非線形性の補正結果から求めた入射 X 線のエネルギーをもとにヒストグラム (エネルギースペクトル)の 作成を行った。このヒストグラムに対し、式 (9.4)の Voigt 関数を用いてフィッティングを行った。図 9.9 に、平均 パルスとノイズスペクトルより作成した SN 比スペクトルと、Voigt 関数によって得られたフィッティング結果を示 す。また、S/N 比から決まるベースライン分解能とフィッティング結果を表 9.7 にまとめる。

表 9.7: S/N 比で決まるベースライン分解能と、フィティングによって得られた結果。*E*<sub>c</sub> はフィッティングによって 得られたエネルギー中心値である。

Channel	TES pixel	$\Delta E_{\text{baseline}}$	$E_{\rm c}({\rm MnK}\alpha)$	$\Delta E(\mathrm{MnK}\alpha)$	$E_{\rm c}({\rm MnK}\beta)$	$\Delta E(\mathrm{MnK}\beta)$
		(eV)	(eV)	(FWHM, eV)	(eV)	(FWHM, eV)
1	81	9.01	5896.9	$49.47 \pm 1.98$	6486.0	$38.95\pm0.00$
2	82	15.10	5907.0	$76.00\pm2.28$	6502.0	$36.00\pm5.07$
3	83	15.47	5896.8	$26.79\pm2.84$	6490.8	$39.49 \pm 4.39$
4	73	22.68	5894.8	$34.41\pm0.79$	6485.9	$24.00\pm3.32$
5	84	12.43	5894.9	$28.23\pm0.88$	6488.7	$32.00\pm4.81$
6	85	16.84	5895.2	$25.76\pm1.18$	6487.6	$29.48 \pm 4.15$
7	75	11.45	5895.2	$23.68\pm1.23$	6487.4	$34.00 \pm 5.64$

本測定によって、TES 7 ピクセルの同時動作に成功し、全 7 ピクセルで X 線パルスの取得に成功した。これによ り、バイアス共通化によって TES の信号読み出し実証に成功したと言える。

一方で表 9.7 より、MnKα に対するエネルギー分解能はいずれのチャネルも 20 eV (FWHM) 以上であることが分かる。これは STEM-TES の要求値を満たしていない。エネルギー分解能に関してさらなる追求をするために、次節ではパルス取得の際の熱浴温度を変更し、測定を行った。

#### 9.6.2 150 mK での結果

次に、熱浴温度 150 mK でパルスの取得を行った。TES バイアス電流を  $I_{\text{bias}} = 405 \ \mu$ A として CH2、CH4、CH6、 CH7 のパルス取得を行った。次に、 $I_{\text{bias}} = 475 \ \mu$ A として CH1、CH3、CH5 のパルス取得を行った。I - V 特性 (図 9.7) から求めた各バイアス電流値での TES の抵抗値を表 9.8 に示す。DL708E のサンプリング周波数の設定は、 CH6 のパルス取得には 5 MS/sec、それ以外のチャネルは 10 MS/sec で行った。波形は CH4 が 900 回、CH6 が 940 回、それ以外のチャネルは 1020 回取得した。



図 9.9: (左列): S/N 比スペクトル、(中央列): MnKα スペクトル、(右列): MnKβ スペクトル。上から順に 100 mK で測定した CH1 ~ CH7 の結果である。

$I_{\rm SB}~(\mu){\rm A}$	Channel	TES pixel	$R_{\rm TES}~({\rm m}\Omega)$
	2	82	33.95
405	4	73	31.24
405	6	85	33.76
	7	75	33.27
	1	81	42.06
475	3	83	46.97
	5	84	50.86

表 9.8: 150 mK でのパルス取得における TES 抵抗値

図 9.10 に各チャネルの平均パルスとノイズスペクトル、および平均パルスとノイズスペクトルから作成を行った テンプレートを示す。テンプレートの作成では S/N 比の劣化を防ぐために CH4、CH6 ではカットオフ周波数を 30 kHz とした。

得られたテンプレートを用いて、取得した全てのイベントに対して最適フィルタ処理を行い、パルスハイト (PHA) を求めた。PHA と *E* の関係は非線形性を式 (9.2) の二次関数によって補正を行った。補正結果を表 9.9 に示す。

私 5.5. K (5.2) による外縁主任の怖止相木					
Channel	a	b			
1	$-2.1902 \times 10^{-8}$	$5.0655\times10^{-4}$			
2	$-1.9721\times10^{-8}$	$6.3749\times10^{-4}$			
3	$-1.3891\times10^{-8}$	$3.3181\times 10^{-4}$			
4	$-2.7990 \times 10^{-8}$	$7.0095\times10^{-4}$			
5	$-1.0676 \times 10^{-8}$	$2.3868\times 10^{-4}$			
6	$-2.4529\times10^{-8}$	$7.0580\times10^{-4}$			
7	$-2.4779 \times 10^{-8}$	$7.0084\times10^{-4}$			

表 9.9: 式 (9.2) による非線型性の補正結果

表 9.9 の非線型性の補正結果から求めた入射 X 線のエネルギーをもとにヒストグラム (エネルギースペクトル)の 作成を行った。このヒストグラムに対し、式 (9.4)の Voigt 関数を用いてフィッティングを行った。図 9.11 に平均パ ルスとノイズスペクトルから作成を行った SN 比スペクトルと、Voigt 関数によって得られたフィッティング結果を 示す。また、S/N 比から決まるベースライン分解能とフィッティング結果を表 9.10 にまとめる。

表 9.10: S/N 比から決まるベースライン分解能とフィッティングによって得られた結果。*E*c はフィッティングによっ て得られたエネルギー中心値である。

Channel	TES pixel	$\Delta E_{\text{baseline}}$	$E_{\rm c}({\rm MnK}\alpha)$	$\Delta E(\mathrm{MnK}\alpha)$	$E_{\rm c}({\rm MnK}\beta)$	$\Delta E(\mathrm{MnK}\beta)$
	I I	(eV)	(eV)	(FWHM, eV)	(eV)	(FWHM, eV)
1	81	9.43	5896.8	$38.27 \pm 1.54$	6488.3	$38.00 \pm 3.87$
2	82	9.70	5900.3	$56.00\pm2.10$	6486.0	$32.00\pm4.08$
3	83	9.53	5898.7	$38.61 \pm 1.61$	6492.7	$34.00 \pm 3.36$
4	73	9.12	5896.0	$35.82 \pm 1.54$	6489.5	$46.84 \pm 5.71$
5	84	12.12	5901.5	$66.19 \pm 2.61$	6490.0	$54.00 \pm 4.25$
6	85	8.58	5900.0	$39.09 \pm 1.74$	6488.8	$34.00 \pm 4.29$
7	75	8.56	5895.4	$27.34 \pm 1.25$	6486.7	$23.32 \pm 2.85$



図 9.10: (左列): 平均パルス波形、(中央列): ノイズスペクトル、(右列): 平均パルスとノイズスペクトルから作成し たテンプレート波形。上から順に 150 mK で測定した CH1 ~ CH7 の結果である。



図 9.11: (左列): S/N 比スペクトル、(中央列): MnKa スペクトル、(右列): MnKβ スペクトル。上から順に 150 mK で測定した CH1 ~ CH7 の結果である。

#### 9.6.3 175 mK での結果

次に、バイアス電流共通化による TES の分解能の劣化について検証した。本測定では CH1 の測定を試み、この 独立読み出しの結果と比較することで、読み出し手法の違いがエネルギー分解能にもたらす寄与について検証する。 CH1 を含む全ての SQUID はマルチチャネル駆動回路の自動調整機能を用いて動作点を決定し、FLL をかけた状態 とした。TES バイアス電流を  $I_{\text{bias}} = 200 \ \mu\text{A}$  を流し、CH1 のパルス取得を行った。I - V 特性の結果 (図 9.7) か ら、 $I_{\text{bias}} = 200 \ \mu\text{A}$  での CH1 の抵抗値は 14.28 mΩ であった。

温度揺らぎは 300 µK (FWHM) 程度であった。波形取得はこれまでと同じく DL708E で行い、サンプリング周波 数は 10 MS/sec で波形取得を 1000 回行った。図 9.12 に 1000 回平均パルス波形とノイズスペクトルを示す。



図 9.12: (左図): 1000 回取得した波形の平均パルス波形、(右図): ノイズスペクトル

平均パルス波形より、このパルスの peak to peak は 2.9 V<sub>pp</sub> 程度であった。パルスハイトを電流電圧変換係数  $\Xi \sim R_{\rm FB} \times M_{\rm in}/M_{\rm FB}$ によって電流換算すると、23  $\mu$ A<sub>pp</sub> 程度であった。これは独立読み出しの結果 (12  $\mu$ A<sub>pp</sub>)と比 較して 2 倍程度大きな値である。また、立ち下がり時定数は 45  $\mu$ s 程度であり、独立読み出しの実験結果 (~ 30 $\mu$ s) と比較して 1.5 倍程度大きくなっている。

定性的な見解として、パルスの時定数は  $\tau \sim C/G$  で決まることから、本実験では独立読み出しの実験時と比較して熱伝導度が小さくなっていることが分かる。これは 9.4 の R-T 測定結果において、本実験の方が独立読み出しの時と比較して転移温度が高くなっているといった結果と一致する。すなわち、TES 基板上の温度を下げるために熱浴の温度を独立読み出しの時よりも小さくする必要があったのである。

ノイズスペクトルから、本測定のノイズレベルは 1 ~ 10 kHz の帯域で 100 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$  を超えており、さらなるノ イズ環境の改善が必要である。100 mK でのノイズスペクトル (図 9.8) や 150 mK でのノイズスペクトル (図 9.10) にあるような 60 kHz 付近の構造が本測定結果からもうかがえる。

平均パルスとノイズスペクトルから作成したテンプレート波形と、S/N 比スペクトルを図 9.13 に示す。テンプレートの作成ではカットオフ周波数について設定はしておらず、全周波数帯域を利用して作成している。

次に、作成したテンプレートを用いて取得した全イベントに対して最適フィルタ処理を施してパルスハイトを求めた。非線型性の補正を式 (9.2)の二次関数によって行い、パルスハイトを入射 X 線エネルギーに換算した。求めたエネルギーからヒストグラムを作成し、式 (9.4)の Voigt 関数によるフィッティングを行うことでエネルギー分解能を求めた。これら結果を図 9.14 と表 9.11 に示す。

表 9.11 の結果を考察する。比較のために独立読み出しでの CH1 のパルス取得結果も記した。まず、 S/N 比から 決まるベースライン分解能は 9.81 eV 程度であり、独立読み出しの結果 7.43 eV と比較して 2 eV 以上悪化した。こ れは、両実験のノイズスペクトルを比較した時、バイアス共通読み出しの実験の方がノイズレベルが高いことが要因 として考えられ、ノイズ環境の改善によって向上が可能であると考えられる。また、MnKα のエネルギー分解能は



図 9.13: (左図): 平均パルスとノイズスペクトルから作成したテンプレート波形、(右図): S/N 比スペクトル



図 9.14: (左上図): S/N 比から決まるベースライン分解能、(右上図): エネルギースペクトル、(左下図): Voitg 関数 による MnKα のフィッティング結果、(右下図): 同じく MnKβ のフィッティング結果

表 9.11: 175 mK での CH1 パルス解析結果。*E* はエネルギー中心値を示す。比較のために独立読み出しでの CH1 のパルス取得結果も記した。

項目		結果	独立読み出しの結果
ま娘刑州の対正	a	$-5.9816 \times 10^{-9}$	$-1.3117 \times 10^{-8}$
が家室性の推正	b	$5.2311\times10^{-4}$	$3.0372\times 10^{-4}$
ベースライン分解能	$\Delta E_{\text{baseline}}$	$9.81 \ \mathrm{eV}$	$7.43  \mathrm{eV}$
	$E_{\rm c}  ({\rm MnK}\alpha)$	$5896.1~{\rm eV}$	$5894.8~{\rm eV}$
$\operatorname{MIIK}\alpha$ / 19 / 1 $\checkmark$ / $\operatorname{MIK}\alpha$	$\Delta E (\text{MnK}\alpha)$	$21.13 \pm 1.10 \text{ eV}$	$20.37\pm0.88~{\rm eV}$
	$E_{\rm c}  ({\rm MnK}\beta)$	$6485.6~{\rm eV}$	$6487.9~{\rm eV}$
MilKp ノイクナイマク 柏木	$\Delta E (\mathrm{MnK}\beta)$	$20.00\pm3.62~\mathrm{eV}$	$24.00\pm3.03\;\mathrm{eV}$

21.13 eV であり、独立読み出しの結果 20.37 eV とほとんど変わらない。このことから、バイアス電流共通化という 読み出し方法に起因する原理的なエネルギー分解能の劣化があったとは本実験結果からは認められないと考えられる。

## 9.7 クロストーク測定

本実験では X 線が入射していない全チャネルにパルスがクロストークとして確認された。本節ではその測定結果 について述べる。

熱浴温度 175 mK にてトリガーをかけた CH1 とともに、CH2 ~ CH7 の波形 (クロストーク波形) の取得を行った。バイアス電流  $I_{\text{bias}} = 200 \ \mu\text{A}$  で取得した CH1 ~ CH4 の波形を図 9.7 に示す。また、 $I_{\text{bias}} = 250 \ \mu\text{A}$  で取得した CH1、CH5 ~ CH7 の波形を図 9.7 に示す。いずれも波形は 100 回平均波形である。



図 9.15: (左図): *I*<sub>bias</sub> = 200 µA での信号 (CH1) とクロストーク (CH2 ~ CH4)、(右図): クロストーク波形の拡大 図。いずれも波形は 100 回の平均である。

クロストークが信号に対してどれほどの大きさであるかを調べるために、図 9.7、図 9.7 の信号とクロストークの 平均波形において、その peak to peak 値と波形面積 (区間 0 ~ 500  $\mu$ s での積分値)を計算した。その計算値から、 クロストークの信号に対する比をプロットした結果を図 9.17 に示す。

図 9.17 から、クロストークは peak to peak 値で 6 ~ 10 % 程度あることが分かった。また、クロストークは信号 波形に対して極性が反転しており、微分波形であるようにうかがえる。

次に、熱浴温度 100 mK、 $I_{\text{bias}} = 500 \ \mu\text{A}$  で測定を行い、100 回の波形を取得した。CH2 にトリガーをかけて TES の信号波形を取得し、CH1、CH4、CH7 でクロストーク波形を取得した。図 9.7 にその結果を示す。いずれも 100 回 平均の波形である。



図 9.16: (左図): *I*<sub>bias</sub> = 250 µA での信号 (CH1) とクロストーク (CH5 ~ CH7)、(右図): クロストーク波形の拡大 図。いずれも波形は 100 回の平均である。



図 9.17: (左図): CH2 ~ CH4 のクロストークの信号に対する比 ( $I_{\text{bias}} = 200 \ \mu\text{A}$ )、(右図): CH5 ~ CH7 のクロストークの信号に対する比 ( $I_{\text{bias}} = 250 \ \mu\text{A}$ )。いずれも青線が peak to peak 値での比、緑線が積分値での比。

図 9.7 で分かるように、クロストークはある一定方向ではなく、



図 9.18: (左図): 信号 (CH2) とクロストーク波形 (CH1、CH4、CH7)、(右図): クロストーク波形の拡大図。いずれ も 100 回平均波形である。

図、、の結果に示されているように、クロストークは全チャネルに現れた。クロストークと信号の周波数特性を調べるために、それぞれの波形データを FFT した結果を図 9.19 に示す。波形データは図 9.7 の平均パルスを用いた。



図 9.19: (左図): 信号とクロストークの 100 回平均波形の FFT の結果。紫色の CH1 が信号、それ以外がクロストー クである。(右図): FFT 後のデータを用いたクロストークの信号に対する比。

図 9.19 左図より、50 kHz 付近までの帯域において信号は周波数が高くなるにつれて減衰するが、クロストークに は大きな減衰は見られず、平坦なスペクトルとなっており、両者は異なるスペクトルを持つことが分かる。また、図 9.19 右図の信号とクロストークのスペクトルの比では、50 kHz 付近までの帯域において、周波数が高くなるにつれ てクロストークの寄与が大きくなることが分かる。

### 9.8 考察

## ノイズスペクトル

100 mK、150 mK、175 mK のいずれの測定でもノイズレベルは 100 pA/√Hz を超えていた。特にノイズスペクトルにおいて 60 kHz 付近に見える盛り上がりの構造についてはその要因が掴めていない。実験を進めていく中で、このノイズの要因が室温部にある可能性をまず疑った。電源周りからノイズが侵入し TES の読み出しに影響を及ぼしている可能性が考えられたため、変更可能な箇所の配線の変更を行った。また、無線電子機器の電源を落として原因の切り分けを行ったものの、顕著なスペクトルの違いは見られず、ノイズレベルは変わらなかった。このノイズは独立読み出しの実験結果では見られていない事実から、要因が低温部にある可能性も視野に入れて今後検証を行っていきたい。

#### エネルギー分解能

175 mK での測定結果より、CH1 のエネルギー分解能は 21.13 eV であった。同じ温度での独立読み出し試験の結果 20.37 eV と比較してほとんど差はなく、読み出し方法の違いによって生じる原理的なエネルギー分解能劣化はないと考えられる。ベースライン分解能は 9.81 eV であり、独立読み出しの結果 7.43 eV と比較して 2.5 eV 程度悪化している。これはノイズ環境の改善によって、さらに向上が可能であると考えられる。

#### クロストーク

本実験では X 線が入射していない全チャネルで、クロストークが確認された。その大きさは信号波形と比較して peak to peak 値で 6 ~ 10 % 程度であった。これは 5.4.3 で行った、SQUID 基板のみを用いたクロストーク測定の 結果と比較して 1 桁大きな値である。 また、クロストークは信号波形に対して極性が反転しており、かつ微分波形であるようにうかがえた。ただし、例 えば図 9.7 右図を見るとクロストーク波形のピークの時間は 3 チャネルで一致しておらず、最大で ~ 5 μs のばらつ きがあり、単純な微分効果では説明ができないと考えられる。

予備実験として行った TES の独立読み出しでは、TES、SQUID のバイアス電流は共通化されていない状態でクロ ストークの測定を行った。この独立読み出しでは、クロストークの大きさが 8.8 の図 8.14 にあるように、信号の 0.2 % 以下であった。これは本実験で TES、SQUID の各バイアスを共通化させた場合と比較して 1 桁以上小さい値で ある。このことから、X 線が入射していない TES ピクセルが温まることに起因する熱的なクロストークや、TES 基 板上の配線同士の電磁カップリングによるクロストークが、主要因でないと考えられる。

クロストークは計数率が大きくなってくると、信号波形を歪める可能性が高まり、エネルギー分解能の劣化につな がる懸念がある。クロストークの要因を追求し、低減する方法を確立することが重要であり、次章での検証と追実験 を行うこととした。

#### 9.9 まとめ

本実験ではバイアス電流を共通化させた読み出し方法の実証と課題点を洗い出すことを目的として行った。9.3 で 開発したバイアス電流共通型 SQUID を用いて X 線照射実験を行い、TES 7 ピクセルの同時動作とパルス取得を試 みた。100 mK での測定結果より、7 ピクセル全てで X 線パルスの取得に成功し、その実証に成功したといえる。一 方でノイズ環境の改善やクロストークといった課題を発見した。ここでは本実験結果についてまとめる。

本実験で使用した TES は R - T 測定の結果より超伝導転移温度は 200 mK 程度であり、7 ピクセル間で 2 mK の範囲で一致し、R - T 特性の均一性がある TES であることが分かった。100 mK、150 mK、175 mK で I - V 測 定を行い、X 線パルスを取得するための TES バイアス電流  $I_{\text{bias}}$  と、その時の TES 抵抗値を  $R_{\text{TES}}$  を求めた。

100 mK では全 7 ピクセルを同時動作することが可能な TES バイアス電流を流してパルス取得を行った。ベース ライン分解能は 9 ~ 23 eV (FWHM) 程度、MnKα に対するエネルギー分解能 は 24 ~ 76 eV (FWHM) 程度であっ た。エネルギー分解能に関しては今後改善が求められるものの、バイアス電流を共通化させて TES を同時動作させ て X 線パルスを取得し、読み出し方法の実証に成功したという点では大きな成果である。

150 mK では 2 つの TES バイアス電流を選んでパルス取得を行った。ベースライン分解能は 9 ~ 12 eV (FWHM) 程度であり、 $MnK\alpha$  に対するエネルギー分解能 は 27 ~ 66 eV (FWHM) 程度であった。

175 mK では CH1 のみパルス測定を行い、独立読み出し実験の場合と比較を行うことでエネルギー分解能の劣化 に関して検証を行った。2つの読み出し方法ではいずれもエネルギー分解能が 20 eV (FWHM) 程度であったことか ら、読み出し方法の違いに起因する原理的なエネルギー分解能の劣化はないと考えられた。

ノイズレベルはいずれのパルス測定の状態でも、SQUID の入力電流換算値で 50 pA/√Hz 以上あった。ノイズス ペクトルは 60 kHz 付近で盛り上がる構造を示しており、そのピークの値は 100 pA/√Hz を超えている。この由来 を調べるために室温配線環境や周辺の電気的環境を変化させてみたものの、ノイズスペクトルに顕著な違いは見られ なかった。ベースライン分解能は独立読み出し実験の結果と比較して 2.5 eV 程度悪化している。このため、ノイズ を低減できればさらにエネルギー分解能の改善が見込めると考えられる。ノイズの低減と 60 kHz 付近の構造の要因 を追求することは今後の課題としたい。

また、X 線が入射していない全チャネルでクロストークが確認された。その大きさは信号波形と比較して peak to peak 値で 6~10 % 程度であった。予備実験として行った TES 3 ピクセルの独立読み出しでは、クロストークの大 きさが信号に対して 0.2 % 以下であり、本実験と比較して 1 桁以上小さい。このことから TES 基板上での熱的なク ロストークや TES 基板上配線間の電磁カップリングが主要因ではないと結論づけられた。クロストークの要因を追 求し、その低減方法を確立することを目的として次章の検証と追実験を行うこととした。

## 第10章 クロストークの追求

第9章では TES と SQUID の各バイアス電流を共通化させて X 線照射試験を行った。実験の結果、X 線が入射 していない TES ピクセルでもパルスがクロストークとして確認され、その大きさは peak to peak 値で信号に対し て 6 ~ 10 % 程度、積分値では 2 % 程度であった。

クロストークを低減するための指標をエネルギー分解能の観点から考える。5.2 で述べたように 5.9 keV の MnK $\alpha$  X 線に対して 10 eV のエネルギー分解能を達成することを考えると、クロストークが信号に対する比として 0.2 eV/5.9 keV ~ 0.2 % 以下であることが求められる。エネルギー分解能は 2.5 で示したように周波数、時間での積分を計算として用いる。このため、クロストークは信号に対して積分値で 0.2 % 以下に低減することを目標とする。実測された クロストークは、積分値の比で信号に対して 2 % 程度であったことから、1/10 程度に低減することが求められる。

クロストークは計数率が大きくなると信号波形を歪め、エネルギー分解能劣化を引き起こす可能性が高まる。第9 章の照射実験では、計数率は ~ 0.5 cps/pixel 程度であり、クロストークが信号波形に対してほとんど影響を及ぼし ていないと考えられる。一方で、STEM-TES システムでは計数率を 300 cps/pixel としており、クロストークの影 響が無視できないと考えられる。このため、クロストークの原因を追求し、その低減方法を確立することが非常に重 要である。

本章では、このクロストークの低減のために行った検証と追実験について述べる。

## 10.1 クロストークの発生モデル

5.2.2 で行った SQUID の動抵抗の変化に起因するクロストークの計算値は、信号に対して 10<sup>-1</sup>% のオーダーで あった。実測されたクロストークはその計算値と比較し、peak to peak 値で 2 桁、積分値で 1 桁大きい。また、ク ロストークの波形は信号波形の微分波形に見え、極性が反転しているという特徴を持っている。ここではクロストー クの要因を動抵抗の変化ではなく、より一般化してインピーダンスの変化として考える。

X 線が入射する前、SQUID バイアス電流 I<sub>SB</sub> は

$$I_{\rm SB} = \frac{V_{\rm SB}}{R_{\rm SB} + \sum_i R_{\rm dyn,i}} \tag{10.1}$$

である。X 線が入射すると、SQUID バイアス電流ラインにインピーダンス変化 δZ が生じ、流れる電流は I<sub>SB</sub>' に変 化するということを考える。

$$I_{\rm SB}' = I_{\rm SB} + \delta I \tag{10.2}$$

$$= \frac{V_{\rm SB}}{R_{\rm SB} + \sum_{i} R_{\rm dyn,i} + \delta Z}$$
(10.3)

クロストークを低減するためには電流変化  $\delta I$  を抑制し、またインピーダンス変化  $\delta Z$  を抑制すれば良い。10.3 を 実証するために、SQUID を用いて追実験を行うこととした。追実験では、まずクロストークの再現を試み、次に低 減のための実験を行った。

## 10.2 クロストークの再現実験

#### 10.2.1 目的とセットアップ

まず、クロストークを再現実験を行った。パルス波形と sin 波形を入力し、クロストークの波形が信号波形に対し て極性が反転し、微分型として現れるか、またその大きさを測定した。第9章の照射実験で使用したバイアス電流 共 通型 SQUID 基板、ISAS-H20 (250 nH)、ISAS-J16 (0 nH) を使用し、dummy TES として固定抵抗 55 m $\Omega$  (at 4.2 K) を用いた。図 10.1 に低温ステージ上の回路の概念図を示す。バイアス電流共通型 SQUID 基板には CH1 ~ CH8 の計 8 チャネルがあるが、本実験では CH6 ~ CH8 の 3 チャネルを使用した。



図 10.1: dummy TES と SQUID での検証実験の回路図

測定は液体ヘリウムを溜めたデュワーに長さ 1.4 m 程のプローブ先端にマウントされた SQUID および dummy TES を挿入することによって、液体ヘリウム温度 (4.2 K) の環境で行った。図 10.2 に本測定のために製作した低温 ステージ写真を示す。



図 10.2: 本測定で使用した低温ステージ

室温読み出し回路は、第9章の照射実験で使用したものと同じマルチチャネル駆動回路とヘッドアンプを使用した。

このヘッドアンプは、FLL 回路中の積分回路の帰還コンデンサを取り替えることで、その容量  $C_f$  を変更することが 可能である。方法は、該当するソケットにリード線付きのコンデンサを差し込めば良い。照射実験で使用した 7 つの チャネルは全て  $C_f = 1$  nF であった。また、ヘッドアンプの仕様では SQUID バイアス抵抗  $R_{SB}$  は 100 k $\Omega$  である。 これは自作した拡張ボックスを用いて抵抗を直列に接続すれば、大きくすることが可能である。

#### 10.2.2 実験結果

#### パルス波形入力結果

まず、パルス波形を入力してクロストークを再現できるかどうかを調べた。波形発生器 nF WF 1974 からパルス 波形 (0.1 V<sub>pp</sub>) を発生させ、バイアス抵抗 10 k $\Omega$  を介して電流 (10  $\mu$ A<sub>pp</sub>) に変換した。

この電流パルスを ISAS-H20 (250 nH) 基板上の CH8 の入力コイルに流し、その SQUID 出力を測定することで、 信号を取得した。また CH6、CH7 の SQUID 出力をクロストークとして測定した。各チャネルの出力波形は 横河波 形取得器 DL708E で取得した。表 10.1 に WF1974 と DL708E のセットアップを示す。

照射実験での TES パルスの立ち上がり時定数は 数 μs 程度であった。本実験で WF1974 でこれと同じ波形の出力 を試みたものの、FLL 回路が安定して動作しなかったために、発生させる波形の時定数は 20 μs 程度とした。

表 10.1: WF1974 と DL708E のセットアップ						
	波形発生装置 WF1974					
周波数	$1 \mathrm{~kHz}$					
振幅	$0.1~\mathrm{V_{pp}}$	バイアス抵抗 10 kΩ を介して 10 μA <sub>pp</sub> に変換				
モード	Pulse Surge	Continuous $\rightarrow$ PWF $\rightarrow$ Surge で選択				
$T_{ m r}$	2 %	振幅が 10 % から 90 % に至る時間 (20 µs)				
$T_{ m d}$	$15 \ \%$	振幅が 10 % 以上の持続時間 (150 µs)				
	波形	取得器 DL708E				
サンプリング周波数	1 MS/s	$100 \ \mu s/div$				
レコード長	10 k points					
帯域幅	$500 \mathrm{~kHz}$					
トリガーポジション	55~%	立ち下がりエッジ				
カウント数	100					

積分器の帰還コンデンサ  $C_f$  は 1 nF (CH6)、10 nF (CH7)、10 nF (CH8) とし、CH8 の入力コイルに 10  $\mu$ A<sub>pp</sub> の 電流を入力した。DL708E で 100 回の波形を取得し、その平均波形を図 10.3 に示す。平均波形におけるエラーバー は正規分布を仮定した時の 1  $\sigma$  を表す。

図 10.3 より信号に対して極性が反転し、微分型に見えるクロストークを確認した。クロストークの信号に対する比 は peak to peak 値で 7 % 程度 (CH6)、6 % 程度 (CH7) であった。このことから本実験で確認されたクロストーク は照射実験で確認されたクロストークと同じ起源に由来するものであり、クロストークの再現をすることができたと 考えられる。

#### sin 波入力結果

次に WF 1974 から sin 波を発生させ、バイアス抵抗 10 kΩ を介して電流に変換し、ISAS-J16 (0 nH) 基板の CH8 のフィードバックコイルに流した。積分器帰還コンデンサ  $C_f$  は 1 nF (CH6)、10 nF (CH7)、1 nF (CH8) とした。 また、本測定では J16 のフィードバックコイル相互インダクタンスを実測値 86 pH を計算に用いることとした。



図 10.3: (左図): CH8 の出力 (信号、紫色) と CH6、CH7 の出力波形 (クロストーク、それぞれ緑色、青色)。(右図): CH6 と CH7 の出力波形の拡大図。

信号である CH8 の出力と、クロストークである CH6、CH7 の出力をオシロスコープ (LeCroy Wave Jet 324) で 測定した。図 10.4 に測定した信号とクロストーク波形の一例を示す。図 10.4 で分かるように、クロストーク波形は



図 10.4: CH8 のフィードバックコイルに 10 kHz、60  $\mu$ A<sub>pp</sub> (2.5  $\Phi$ <sub>0,pp</sub> に相当) を入力した結果。黄色が入力信号、マ ゼンタが信号 (CH8)、シアンと緑がクロストーク (それぞれ CH6、CH7) を示す。

信号波形に対して π/2 進んでいる。これは sin 波に対して -cos 波の関係であり、極性反転と微分型という点で、照 射実験で確認されたクロストークを再現できていると考えられる。

以上の結果から、照射実験で確認されたクロストークの再現に成功したと考えられる。次に、WF 1974 で発生させる電圧振幅を 0~1.0 V<sub>pp</sub> まで変化させ、信号とクロストークの電圧値 (peak to peak 値) をオシロスコープで測定した。図 10.5 に CH8 への入力磁束 (WF 1974 で発生させた電圧振幅から換算) とクロストークの測定結果について示す。図 10.5 より、クロストークは入力磁束が大きくなるにつれて大きくなることが分かる。これは SQUID のバイアス電流ラインにおけるインピーダンス変化  $\delta Z$  が、SQUID への入力磁束に応じて大きくなることを示唆するものである。



図 10.5: SQUID への入力磁束とクロストークの関係。測定にはオシロスコープを用いた。(左図): 入力磁束に対す るクロストークの電圧値の変化、(右図): 入力磁束に対するクロストークと信号の比の変化。入力磁束への換算には フィードバックコイル相互インダクタンスの実測値 86 pH を用いている。

## 10.3 クロストークの低減実証実験

#### 10.3.1 目的とセットアップ

10.2 で述べたクロストークの再現実験の結果、信号に対して極性が反転し、微分型に見える波形のクロストークを 確認することができ、照射実験で確認されたクロストークの再現に成功したと考えられる。本節では、クロストーク を低減するための実証実験を行う。そのために、式 (10.3) において δ*I* を抑制するために、本節では SQUID バイア ス抵抗 *R*<sub>SB</sub> の増大と、δ*Z* の抑制によってクロストークの低減を試みる。

クロストークは SQUID バイアス電流変化  $\delta I$  に起因すると考えられ、 $\delta I$  は式 (10.1)~(10.3) より、

$$\delta I = V_{\rm SB} \left( \frac{1}{R_{\rm SB} + \sum_{i} R_{\rm dyn,i}} - \frac{1}{R_{\rm SB} + \sum_{i} R_{\rm dyn,i} + \delta Z} \right)$$
(10.4)

$$= V_{\rm SB} \frac{\delta Z}{(R_{\rm SB} + \sum_{i} R_{\rm dyn,i})(R_{\rm SB} + \sum_{i} R_{\rm dyn,i} + \delta Z)}$$
(10.5)

と表す事ができる。 $\delta I$  を低減するためには  $R_{\rm SB}$  を大きくするか  $\delta Z$  を低減すれば良い。 $R_{\rm SB}$  は照射実験で使用した ヘッドアンプでは、100 kΩ が仕様であり、これ以上大きくするには自作した拡張ケーブル等でヘッドアンプ外部に 抵抗をつなげれば良い。

一方で δZ の抑制方法は 10.2 の実験結果から考える。クロストークが入力磁束に応じて大きくなるといった図 10.5 の結果から、δZ は SQUID への実質入力磁束の関数であり、

$$\delta Z = \delta Z(\Phi_{\rm in,act}) \tag{10.6}$$

と表すことができる。また、 $\Phi_{in,act}$ を抑えることで  $\delta Z$ の抑制が実現できると考えられる。 $\Phi_{in,act}$ は、入力コイル から SQUID へ入力される磁束  $\Phi_{in}$ と FLL 回路の  $\mathcal L$ によって

$$\Phi_{\rm in,act} = \frac{1}{1+\mathcal{L}} \Phi_{\rm in} \tag{10.7}$$

と表される。したがってループゲインを増大させることで δZ の抑制が可能となり、クロストークは減少すると考えられる。FLL 回路のループゲインを増大させる方法は図 3.3 のダイアグラムや式 (3.20) から、ゲインの大きい SQUID

の使用や、室温アンプのゲインを増大させることで可能となる。本実験では室温アンプのうち、積分器のゲインを増 大させることでループゲインの増大を行うこととした。

積分器は 10.6 に示されるように、演算増幅器 (オペアンプ) と抵抗  $R_i$ 、帰還コンデンサ  $C_f$  から成る。積分回路の

Ri Vi - Wi - Vo

図 10.6: 積分回路

入力電圧を V<sub>i</sub>、出力電圧を V<sub>o</sub>とすると、両者には

$$V_o = -\frac{1}{R_i C_f} \int V_i dt \tag{10.8}$$

の関係がある。積分回路のゲインを増大させるためには帰還コンデンサ容量  $C_f$  を小さくすれば良い。照射実験で使用したヘッドアンプの 7 つの FLL 回路は全て  $C_f = 1$  nF であった。また  $R_i$  を実測した結果、1 k $\Omega$  であった。本実験では  $C_f$  を変化させてクロストークの測定をし、低減が可能であるか調べることとする。

#### 10.3.2 実験結果

#### **SQUID バイアス抵抗の変更**

まず、SQUID バイアス抵抗  $R_{SB}$  を増大させることでクロストークの低減を試みた。SQUID のバイアス電流は典型的に 10 ~ 20  $\mu$ A であり、ヘッドアンプでは 1 ~ 2 V の直流電圧を設定し、バイアス抵抗 100 kΩ を介して擬似的な電流源を作り出している。

本実験では、 $R_{SB}$ を ヘッドアンプの仕様 100 k  $\Omega$  から 200 k $\Omega$  の 2 倍に変更してクロストークの測定を行った。 積分器帰還コンデンサ  $C_f$ は  $C_{f,CH6} = 1$  nF、 $C_{f,CH7} = 10$  nF、 $C_{f,CH8} = 10$  nF で測定を行った。図 10.7 に取得し た 100 回平均波形と、クロストークの信号に対する比を示す。平均波形における誤差は、正規分布を仮定した時の 1  $\sigma$ をエラーバーとして表した。また、比を求める際の誤差は、平均波形における誤差を誤差伝搬を用いて求めたもの をエラーバーとして示した。

表 10.2: SQUID バイアス抵抗を変更したことによるクロストークの信号に対する比の変化

		$100 \text{ k}\Omega$	$200~\mathrm{k}\Omega$
noole to noole 庙	CH6 (%)	$6.54 \pm 0.30$	$1.66\pm0.29$
peak to peak le	CH7 (%)	$6.46\pm0.20$	$1.89\pm0.20$
巷八店	CH6 (%)	$2.85\pm0.02$	$1.41\pm0.02$
俱刀但	CH7 (%)	$3.51\pm0.01$	$2.22\pm0.01$





図 10.7: (左図): SQUID バイアス抵抗 R<sub>SB</sub> を変更したときのクロストーク平均波形。(右図): peak to peak 値と積 分値での信号に対する比。

図 10.7 より、SQUID バイアス抵抗  $R_{SB}$  を 2 倍にすることにより、クロストークの信号に対する比は peak to peak 値で 1/3 以下、積分値で 1/2 程度に低減することに成功した。この実験結果は、式 (10.5) にあるように SQUID バイアス電流の揺らぎ  $\delta I$  がクロストークを及ぼすということと、 $\delta I$  を低減のための手段として  $R_{SB}$  の増大があると いうことを実証したものである。本実験では  $R_{SB}$  を 200 kΩ 以上に増大させなかったが、より大きな抵抗を用いる ことによってクロストークの低減が可能であると考えられる。

#### 積分器帰還コンデンサ容量の変更

CH8 の積分器の帰還コンデンサ容量  $C_f$  を変化させることにより、FLL 回路のループゲインを変化させた。この ループゲインの変化に伴うクロストークの大きさの変化を調べた。 $C_{f,CH8}$  を 0.33 pF ~ 10 nF まで変化させた。こ のとき、CH6 と CH7 の  $C_f$  は固定し、 $C_{f,CH6} = 1$  nF、 $C_{f,CH7} = 10$  nF とした。DL708E で 100 回の波形を取得 し、その平均波形を図 10.8 に示す。また、クロストークの信号に対する比を図 10.9、表 10.3 に示す。

	$C_{f,CH8}$ (nF)	10	5	1	0.33
peak to peak 値	CH6 (%)	$5.93 \pm 0.32$	$2.89\pm0.26$	$1.46\pm0.29$	$1.32\pm0.29$
	CH7 (%)	$6.56 \pm 0.21$	$2.91 \pm 0.25$	$1.72\pm0.19$	$1.74\pm0.24$
積分 値	CH6 (%)	$3.06\pm0.02$	$1.29\pm0.02$	$1.29\pm0.02$	$1.41\pm0.02$
	CH7 (%)	$3.72\pm0.01$	$1.72\pm0.02$	$1.66\pm0.01$	$2.06\pm0.01$

表 10.3: C<sub>f.CH8</sub> を変えてループゲインを増大させた時のクロストークの信号に対する比

図 10.8、表??より、CH6、CH7 ともに  $C_{f,CH8}$  が 10 nF から 1nF の範囲で peak to peak 値でクロストークの明 確な低減が確認できた。積分値では  $C_{f,CH8}$  が 5 nF 以下では低減は見られなかった。クロストークの波形を図 10.8 で見ると、 $C_{f,CH8}$  を 5 nF から 1 nF から変更した際、クロストーク波形のピーク値は減少しているものの、立ち下 がり時間が大きくなったことで、積分値には大きな変化がなかったと考えられる。

 $C_{f,CH8}$ を1 nF から 330 pF に変化させたことによるクロストークの低減は peak to peak 値、積分値ともに確認 できなかった。本実験では、ループゲイン  $\mathcal{L}$  と  $C_f$  の関係は  $\mathcal{L} \propto 1/C_f$  と置いたが、実際には  $\mathcal{L}$  は周波数特性を持 つ。パルスの周波数帯域において  $C_f$  を1 nF から 330 pF に変化させた時、ループゲインが  $\mathcal{L} \propto 1/C_f$  の通りに増 加していなかったことが考えられる。これを確かめるには、SQUID を使用した実験において FLL 回路のループゲイ ンを実測すれば良い。本実験では行わなかったために、これは今後の課題としたい。



図 10.8: CH8 の C<sub>f</sub> を変更したときの出力波形の変化。(上左図): CH6 出力波形、(上右図): CH7 出力波形、(下図): CH8 出力波形。



図 10.9: CH8 の  $C_f$  を変えてループゲインを変化させたことによる、クロストークの信号に対する比。(左図): CH8 の  $C_f$  を横軸にしてプロットした結果、(右図): CH8 の FLL 回路のループゲインの相対値を横軸にプロットした結果。相対値は  $C_f = 10$  nF を基準にしている。

## 10.4 SPICE シミュレーションによる検証

クロストークの要因を追求するために SPICE シミュレーションを LTspice IV を用いて行った。本シミュレーショ ンでは SQUID は固定抵抗とし、SQUID バイアス電流を生成する回路は照射実験で使用したヘッドアンプの回路を 模擬して行った。ヘッドアンプの内部では定電圧源と SQUID バイアス抵抗のみで SQUID バイアス電流を生成して いるとしてこれまで考えてきたが、実際には 1 kΩ の抵抗と 4.7 μF のコンデンサでローパスフィルタが配置されて いる。このローパスフィルタも本シミュレーションでは組み込んだ。シミュレーションを行った回路図は図 10.10 に 示した通りで、入力パルスの設定値は表 10.4 に示した通りである。表 10.4 の値は照射実験で行ったクロストーク測 定の際に得られた、信号波形 (図 9.7) をもとに設定しており、実際の TES パルスを模擬することを意図している。



図 10.10: SPICE シミュレーションを行った回路図。SQUID の代わりに 固定抵抗 100 Ω を用いている。プリアン プ、積分器、バッファアンプ、フィードバック抵抗、擬似 SQUID バイアス電流源は、照射実験で使用した際のヘッ ドアンプの設定を模擬している。

SQUID は固定抵抗 100 Ω で模擬した。電流パルスが入力されたチャネルでは、固定抵抗 100 Ω を流れる電流変化 は負のフィードバックによって抑制される。しかしフィードバックできない成分によって電流変化 δI は完全にゼロ

表 10.4: SPICE シミュレーションを行う上での入力パルスの設定値

立ち上がり時定数	$6 \ \mu s$
立ち上がり遅延時間	$50 \ \mu s$
立ち下がり時定数	$40 \ \mu s$
入力パルスハイト	$24~\mu A_{\rm pp}$

とはならず、SQUID バイアス電流ラインが共通化されていることから δI は他のチャネルにも影響を及ぼす。実際の SQUID では磁束が入力され、フィードバックで返せない磁束分に応じて動抵抗が変化し、それが δI の発生につな がる。本シミュレーションでは磁束や動抵抗といった物理量を考えていないが、バイアス電流変化 δI に関しては模 擬できると考えられる。

室温回路はヘッドアンプの仕様および実測値 (付録 C 図 C.2) を模擬した。はじめは、積分器の帰還コンデンサは 照射実験と同じ 1 nF とし、SQUID バイアス抵抗は 100 kΩ とした。ヘッドアンプは SQUID バイアス抵抗 100 kΩ と 2 V 程度の定電圧で擬似的に定電流源を作り出している。また、SQUID バイアス電流の回路には抵抗 1 kΩ とコ ンデンサ 4.7  $\mu$ F (以後、容量を  $C_{LPF}$  と呼ぶ) によってローパスフィルタが形成されている。これらも組み込んでシ ミュレーションを行った。

図??に、CH1 と CH2 に電流パルスを入力し、その時の信号波形とクロストーク波形の出力結果を示す。CH1、 CH2 のどちらに電流パルスを入力した場合においても、他の全てのチャネルにはクロストークが現れた。その波形は 信号対して極性が反転し、かつ微分波形に見える。これらの特徴は照射実験で確認されたクロストークと特徴が一致 する。

クロストークの信号に対する大きさを知るために、両者の比をとった結果を図 10.12 に示す。図 10.12 には照射実 験で確認された、クロストークの信号に対する比を比較のために示した。本シミュレーション結果では、クロストー クの信号に対する比は peak to peak 値では 2 % 程度、積分値では 0.5 % 程度であった。これは照射実験での実測値 と比較して 1/5 程度、積分値では 1/3 程度小さい結果であった。実測されたクロストークと比較して、その大きさ にはこれほどの差があるものの、波形と、全てのチャネルに現れるといった特徴からクロストークの再現を本シミュ レーションによって再現できたと考えられる。

ここでクロストークの要因を考える。 $\delta I$ の大きさは SQUID バイアス電流ラインにおけるインピーダンスによっ て決まる。電流パルスが入力された SQUID から見た時、回路のインピーダンスは 100 kΩ という SQUID バイアス 抵抗があるものの、ヘッドアンプ内部のローパスフィルタ用にグランドと並列に接続されたコンデンサ  $C_{\text{LPF}}$ によっ て、高い周波数になるにつれてインピーダンスは小さくなる。図 10.10 にあるように、そのコンデンサは SQUID か ら見ると SQUID バイアス抵抗よりも手前に配置されているために、 $\delta I$ の高周波成分はコンデンサを通ってグラン ドに流れるループを形成する。例えば  $\omega = 10^5 \text{rad/s}$  だとすると、コンデンサの容量が  $C_{\text{LPF}} = 4.7 \ \mu\text{F}$  であるのでイ ンピーダンスは高々 2 Ω である。 $4.7 \ \mu\text{F}$  という大容量のコンデンサが SQUID バイアス抵抗よりも SQUID に近い 側で、グランドと並列に接続されているために、高周波の電流変化を抑制できずクロストークの寄与を大きくしてし まっていると考えられる。

この予測を確かめるために、コンデンサ  $C_{\text{LPF}}$  の値を変化させた時のクロストークのシミュレーションを行った。 CH1 に電流パルスを入力し、CH2 のクロストーク波形の結果を図 10.13 に示す。図 10.13 の結果から、 $C_{\text{LPF}}$  は 100 nF にすることによって 4.7  $\mu$ F の時の 1/2 以下に、10 pF では 1/30 程度にクロストークは peak to peak 値で小さ くなっている。これは、クロストークが SQUID バイアス電流ラインにおけるインピーダンスに強く依存するという 予測を支持する結果である。 $C_{\text{LPF}}$ を小さくすることで SQUID バイアス電流ラインにおけるインピーダンスは大き くなるために、電流変化  $\delta I$  が抑制されてクロストークが低減されるという結果が図 10.13 で得られたのだと考えら れる。

次にローパスフィルタ用コンデンサの位置を変更し、図 10.14 の case1、case2 というように配置した。case1 はヘッ ドアンプの仕様通りであり、case2 では、SQUID から見て SQUID バイアス抵抗がコンデンサ  $C_{\text{LPF}}$  よりも近い位 置に配置した。case2 では case1 に比べてバイアス電流変化  $\delta I$  にとってのインピーダンスが大きいために、クロス



図 10.11: クロストークのシミュレーション結果。(上段左図): CH1 に電流パルスを入力した際の信号 (CH1) とクロ ストーク波形 (CH2、CH3、CH4)、(上段右図): 上段左図におけるクロストーク波形の拡大図、下段左図: CH2 に電 流パルスを入力した際の信号 (CH2) とクロストーク波形 (CH1、CH3、CH4)、(下段右図): 下段左図におけるクロ ストーク波形の拡大図。



図 10.12: 照射実験での実測値と、本シミュレーションによる信号に対するクロストークの比の結果の比較。(左図): peak to peak 値での比、(右図): 積分値での比



図 10.13: ヘッドアンプ内部に配置されたローパスフィルタ用のコンデンサ容量 C<sub>LPF</sub> を変化させた時のクロストー クのシミュレーション結果



図 10.14: SQUID バイアス電流回路でのローパスフィルタ用コンデンサの位置の変更。(左図): case1、(右図): case2 トークが小さくなることが予測される。シミュレーション結果を図 10.15 に示す。case1 に比較して case2 はクロス



図 10.15: 図 10.14 の case1、case2 におけるクロストークのシミュレーション結果。

トークが大幅に低減され、予測通りに結果が得られた。本シミュレーション結果より、バイアス電流変化 δI にとっ てのインピーダンスを確保するためには SQUID バイアス抵抗はローパスフィルタ用のコンデンサと SQUID の間に 配置されるべきであり、それによってクロストークは低減できることを示した。 次に、ループゲインの増大によるクロストークの低減効果をシミュレーションで確かめた。電流パルスを入力する CH1 の積分器コンデンサ容量  $C_f$  を 10.3 の低減実験で行ったように 10 nF ~ 330 pF に変化させてクロストークを シミュレーションした。結果を図 10.16 に示す。図 10.16 から、 $C_f$  を小さくしてループゲインを大きくすることでク



図 10.16: CH1 の積分器コンデンサ容量  $C_f$  を変化させたときのシミュレーション結果。(左図): CH1 の信号波形の 変化、(右図): CH2 に現れるクロストーク波形の変化

ロストークが低減されることがシミュレーションでも確認することができた。

本章で行った SPICE シミュレーションによって、SQUID のバイアス電流変化に起因するクロストークは SQUID バイアス電流ラインにおけるインピーダンスに強く依存することを示すことができた。照射実験と、本章の追実験で 使用したヘッドアンプでは SQUID バイアス電流が流れる回路にローパスフィルタが入っており、コンデンサ (4.7  $\mu$ F) がグランドと並列に接続されていた。このコンデンサは SQUID から見ると SQUID バイアス抵抗よりも前で 接続されているために、10 kHz 以上といった高周波に対するインピーダンスは数 Ω 以下となって非常に小さい。こ のため、SQUID バイアス電流変化は、バイアス抵抗 100 kΩ による抑制は高周波ではほとんど受けず、照射実験で は peak to peak 値で 10 % に及ぶクロストークが確認されたと考えられる。また、クロストークを低減するための 方法として、ローパスフィルタ用のコンデンサの位置を変更し、SQUID バイアス電流変化 δI にとってのインピー ダンスを大きくすることがあることを示した。さらに、ループゲインの増大によってクロストークが低減できるとい うことを確かめた。

## 10.5 まとめと考察

第9章で述べた TES と SQUID のバイアス電流を共通化させた照射実験において確認されたクロストークについ て、検証と追実験を行った。

まず、クロストークの発生モデルを考えた。照射実験で実測されたクロストークは peak to peak 値で 6~10 % 程度であり、動抵抗の変化に起因するクロストークの計算値 10<sup>-1</sup> % と比較して 2 桁近く大きかったことから、クロストークの要因を動抵抗の変化だけではなく、より一般化したインピーダンスの変化  $\delta Z$  として考えることとした。インピーダンス変化  $\delta Z$  が SQUID バイアス電流変化  $\delta I$  をもたらし、クロストークを発生させると考えた。

追実験では、dummy TES として固定抵抗 55 m $\Omega$  (at 4.2 K) とバイアス電流共通型 SQUID を用いてクロストークの再現を液体ヘリウム環境下で試みた。パルス波形と sin 波形をコイルに入力した実験の結果、照射実験で確認されたクロストークと同じく信号に対して極性が反転し、微分波形に見えたことから両実験で確認されたクロストークの由来は同一であり、クロストークの再現に成功したと解釈した。また、コイルに入力する sin 波形の振幅を変えた 測定の結果、SQUID への入力磁束が大きくなるにともないクロストークが増大するという結果を得た。これは  $\delta Z$  が入力磁束の増加にともなって増大することを示唆するものであった。

続いて、クロストークを低減するための実験を行った。まず、SQUID バイアス電流変化  $\delta I$  をより微小とするために SQUID バイアス抵抗  $R_{SB}$  を増大させてクロストークの測定を行った。 $R_{SB}$  を 100 kΩ から 200 kΩ に増大して測定した結果、クロストークの信号に対する比を peak to peak 値で 1/3 以下、積分値で 1/2 程度に低減することに成功した。この結果は、クロストークが SQUID バイアス電流の変化に由来するというモデルを支持する結果であり、同時にクロストークの低減方法の一つとして SQUID バイアス抵抗  $R_{SB}$  の増大 (SQUID バイアスの定電流化)があるということを実証したものである。

次に、SQUID バイアス電流ラインにおけるインピーダンス変化  $\delta Z$  を抑制するために、FLL 回路のループゲイン  $\mathcal{L}$ を増大することで SQUID への実質的な入力磁束を減らし、クロストークの低減を試みる実験を行った。ループゲ インは積分器の帰還コンデンサ容量  $C_f \ge \mathcal{L} \propto 1/C_f$ の関係があるため、 $C_f$ を変化させてクロストークの測定を行っ た。 $C_f$ を 10 nF ~ 330 pF の範囲で変更した結果、10 nF から 1 nF の範囲で明確なクロストークの減少が peak to peak 値で確認できた。同時に、ループゲインの増大でクロストークの低減が可能であるということを示した。1 nF 以下では低減が確認できなかったが、これは  $C_f$ を小さくした時に、入力したパルスの周波数帯域においてループゲ インが増大されていなかったことが考えられる。

SPICE シミュレーションを行った結果、SQUID バイアス電流変化  $\delta I$  が及ぼすクロストークはバイアス電流ラインにおけるインピーダンスに大きく依存することを示した。照射実験や本章での追実験で使用したヘッドアンプで SQUID バイアス電流が流れる回路にローパスフィルタ用の コンデンサ (4.7  $\mu$ F) がグランドと並列に接続されていることにより、 $\delta I$  の高周波成分がバイアス抵抗 100 k $\Omega$  による抑制を受けないことを示した。クロストークの低減のためには  $\delta I$  にとってのインピーダンスを大きくし、より理想的な定電流回路とする必要があることを示した。

照射実験で使用したヘッドアンプは STEM-TES システムのために作られた回路ではなく、TES の独立読み出し 用に開発されたものである。STEM-TES システムのための室温回路は現在製作中であり、SQUID バイアス回路は より理想的な定電流回路の設計となっている。この回路を用いて X 線照射実験にてクロストークを実測し、低減の 実証をすることを今後の課題とする。

## 第11章 まとめと今後

本修士論文では、走査透過型電子顕微鏡 (STEM) の検出器に TES カロリメータアレイを実用化するために低温フ ロントエンド部おける課題について洗い出し、解決方法の提案と実証を実験的に行った。

まず、スノートと室温回路を結ぶ配線本数の削減と SQUID の発熱を要求値以下とするために、低発熱型 SQUID によるバイアス共通読み出しを提案した。発熱とトランスインピーダンスゲインが要求値を満たす SQUID の開発に 成功し、独立読み出しと比較して 40 % の配線本数削減の目処が立った。さらに X 線照射試験を行い、バイアス共通 読み出しで TES 7 ピクセルを動作させて全てのピクセルで X 線パルスの取得に成功し読み出し方法の実証を行った。

次に極低温ステージの実装方式改良のために、電気的接続を保証するボンディングを従来のワイヤボンディングか ら変更し、フリップチップ実装方式を提案した。スノート試作の冷却試験の結果から、フリップチップ実装方式によっ て SQUID の動作に成功し、その実装の実証に成功した。

また、STEM-TES システムで用いる磁気シールドのモデルケースとして我々の研究グループが所有する希釈冷凍 機に搭載する磁気シールドの設計製作を行った。磁性体材料として A4K を提案し、設計前に磁場解析ツールを用い て磁場計算を行った。製作後に行った A4K シールドの室温での簡易的な評価の結果、その性能は解析結果と一致す ると考えられ、TES と SQUID への侵入磁場が要求値 1 μT 以下であることを確かめた。

以下に、本研究における成果と今後の課題についてまとめる。

## 11.1 バイアス電流共通型 SQUID の開発

#### 成果

STEM-TES システムでは、結線回数や室温からの熱流入の観点から低温フロントエンド部と室温回路を結ぶ配線 本数を減らす要求があった。この課題を解決するために、TES 8 ピクセル、SQUID 8 アレイを1ユニットとしてバ イアスを共通化させることについて提案した。

バイアス共通化での読み出しを行う際、SQUID の数は TES と同数の 64 アレイ必要となる。SQUID への要求値 として SQUID アレイの個数と冷凍機の冷却能力の観点から発熱 20 nW 以下とした。また、TES の典型電流ノイズ と室温アンプの入力電圧ノイズの観点からトランスインピーダンスゲイン 100 Ω 以上を設定した。この要求値を満 たすためには低発熱型 SQUID が必要であり、先行研究での開発を基盤としてバイアス電流共通型 SQUID の基板設 計を行った。

製作後の SQUID を液体ヘリウム環境下で評価し、発熱、トランスインピーダンスともに要求値を満たす SQUID の開発に成功した。さらに、この開発によって TES 各ピクセルを独立に読み出す場合と比較して、配線本数を 40 % 以上削減できる目処が立った。

#### 今後の課題

スノート上で SQUID 64 アレイを熱浴温度 ~ 100 mK で動作させた状態で、安定した冷却が保たれ、TES の応答 に影響がないかを実証することが今後の課題である。

また、本開発では低発熱型 SQUID と合わせて高ゲイン型 SQUID の開発も行っている。高ゲイン型は低発熱型に 比べてゲインは優っているものの、発熱も大きい。STEM–TES システムで実際に搭載する SQUID の選定は、冷凍 機の冷却能力に大きく依存する。必要に応じてこの高ゲイン型 SQUID の利用も視野に入れたいと考えている。

#### 11.2 極低温実装

#### 成果

スノート上の超伝導配線とバイアス電流共通型 SQUID、フリップチップ実装方式を施した試作スノートを製作した。スノートの冷却とフリップチップ実装の実証を目的とした冷却試験を行った。まず、TES がマウントされるスノート先端部を 70 mK 程度に冷却することができた。これまでの TEM 開発に比べて熱容量が大きなスノートの冷却に初めて成功し、TES を先端にマウントして動作させることができる目処が立った。

試作スノートでのフリップチップ実装の歩留まりは 70 % 程度であった。接着剤を使用していない SQUID 基板 は歩留まりが 100 % であったものの、冷却過程において 1 箇所の断線が確認された。一方で、接着剤を使用した SQUID 基板は歩留まりは悪かったものの、冷却過程での断線はなかった。歩留まりの改善と冷却過程での接続の保 障は SQUID 基板 – 配線電極パッド間の接着手法の確立によって改善できると考えられる。

SQUID を 4K 、極低温で動作させてその信号を読み出せたことからフリップチップ実装の極低温における実証に 成功したと言える。

#### 今後の課題

フリップチップ実装の歩留まりの改善と、冷却過程での接続保障の検証が今後の課題である。そのために、SQUID 基板と配線電極パッド間の接着手法の最適化を今後行っていく。

また、スノート先端部に TES をマウントして動作させる目処が立ったことから、スノートを用いた X 線照射試験 を行うことを今後の課題としたい。

### 11.3 磁気シールド

#### 成果

TES の分解能を最大限引き出すためには外部磁場を遮蔽する必要があるため、磁気シールドの製作が STEM-TES システムでは必要である。本研究では STEM-TES システムで用いる磁気シールドのモデルケースとして、我々の 研究グループが所有する希釈冷凍機に搭載する磁気シールドを開発した。

磁性体材料としては、低温での透磁率の観点から鉄 – ニッケル合金の一種である Amumetal 4K (A4K)を選定した。A4K 磁気シールドの設計では円筒内径と X 線窓半径を決めるが、これをこれをスノート上における TES と SQUID への侵入磁場の大きさと、現実的なセットアップの観点から最適化する必要があった。TES と SQUID への 侵入磁場が双方で 10<sup>-6</sup> T 以下を要求値として設定した上で有限要素法による磁場解析を行い、シールド内部磁場を計算した。解析の結果と現実的なセットアップの観点から円筒内径を 26 mm、X 線窓半径を 5 mm と決定した。

製作後の A4K 磁気シールドを室温にて簡易的に評価することで、スノート上における TES と SQUID への侵入 磁場の大きさが設計前に行った磁場解析結果である  $10^{-6}$  T 以下であることを確かめた。

#### 今後の課題

製作後の A4K 磁気シールドの性能評価は室温での簡易的な評価であった。磁場測定に使用したホール素子よりも さらに感度の良い素子での精密測定や、極低温での測定が今後の課題である。また、今回の磁場解析の結果と経験を STEM-TES システムで用いる磁気シールドの設計の際に活用し、セットアップや侵入磁場の観点から最適化を行っ てシステムの構築に貢献したい。

## 11.4 バイアス電流共通化の実証とクロストークの追求

#### 成果

バイアス共通化読み出しの実証と課題点を洗い出すことを目的とし、本研究で開発した SQUID 基板を用いて TES 7 ピクセルの読み出しを試みた。測定の結果、TES 7 ピクセルを同時動作させ、X 線パルスの取得に成功した。エネルギー分解能はいずれのピクセルでも 20 eV (FWHM) 以上であった。予備実験として行った TES 単素子を独立に読み出した場合においても 20 eV (FWHM) 程度であったことから、バイアス共通化による原理的なエネルギー分解 能劣化はなかったと考えられる。以上からバイアス電流共通化による読み出し方法で TES パルスの取得に成功した と言える。

照射実験では信号に対して peak to peak 値で 10 % 程度のクロストークが確認された。その後の追実験では、ク ロストークの振幅は SQUID に入力される磁束量に関連があることが示唆された。この結果から、SQUID へ入力さ れた磁束によって 共通化されたバイアスラインにおけるインピーダンスが変化し、それによる SQUID バイアス電 流の変化 δ*I* がクロストークを及ぼすことを考えた。

SQUID への入力磁束を抑制するためには FLL 回路におけるループゲインを大きくすれば良く、また SQUID バ イアス電流変化  $\delta I$  を低減するためには、擬似電流源を作り出すバイアス抵抗を大きくすれば良い。固定抵抗 55 mΩ を dummy TES として用いて液体ヘリウム温度で追実験を試みた結果、クロストークはループゲインや SQUID バ イアス抵抗の増大によって低減されることを実証することができた。また SPICE シミュレーションによって、照射 実験や追実験で使用したヘッドアンプの SQUID バイアス電流ラインにおけるローパスフィルタ用のコンデンサ 4.7  $\mu$ F によって、 $\delta I$  の高周波成分が SQUID バイアス抵抗で抑制されずにクロストークの要因となることを示した。さ らに、SQUID バイアスラインにおけるローパスフィルタ用のコンデンサの配置位置を変化させ、 $\delta I$  にとってのイン ピーダンスが高くなる回路を作ればクロストークが大幅に低減されることをシミュレーションによって示した。

#### 今後の課題

本研究で用いた TES は、独立読み出しの場合においてエネルギー分解能が 20 eV 程度であった。TES は我々の 研究グループで独自に開発を行っており、まずは独立読み出しで 10 eV を達成する TES を製作したい。バイアスを 8 ピクセル間で共通化させることで、TES 各ピクセルにとっては最適な動作点 (バイアス電流) から外れてしまうも のの、その状態でエネルギー分解能 10 eV を切ることが今後の課題である。そのために、ノイズ環境の向上や温度揺 らぎの低減といった実験系の改善を行っていく。

照射実験で確認されたクロストークは、室温回路における SQUID バイアス電流を生成する回路を最適化すること で大幅に低減できることをシミュレーションによって示した。照射実験で使用したヘッドアンプは本来 TES の独立読 み出し用に以前開発されたものである。STEM-TES システムで製作する室温回路では、クロストークが要求値 0.2 % を達成できるように本研究で行った SPICE シミュレーションの結果を活かす。また、本研究でクロストークを低 減する方法として FLL 回路のループゲインや SQUID バイアス抵抗の増大といったことを提案し、SQUID のみを使 用したの実験では低減を確認した。低減の実証を実際に TES で照射実験を行って確かめ、手段として確立すること を今後の課題としたい。

# 付録A 負のフィードバックとループゲイン

## A.1 ループゲイン

回路において、出力の一部を入力に加えることを帰還 (フィードバック) という。フィードバックには正、負の 2 つがあるが、ここでは負のフィードバックについて説明する。図 A.1 に示すようにゲイン  $A(\omega)$  の増幅回路で増幅さ れた信号を -b 倍だけ減衰させて入力にフィードバックさせるとき、入力  $x(\omega)$  と出力  $y(\omega)$  の間には次の式が成り 立つ。

$$y(\omega) = A(\omega)[x(\omega) - by(\omega)]$$
(A.1)

これを解くと、

$$y(\omega) = \frac{A(\omega)}{1 + bA(\omega)} x(\omega)$$
(A.2)

$$= \frac{1}{b} \frac{\mathcal{L}(\omega)}{1 + \mathcal{L}(\omega)} x(\omega) \tag{A.3}$$

となる。 $\mathcal{L}(\omega) = bA(\omega)$ をループゲインと呼ぶ。ループゲインが1より十分大きな場合には式 (A.3) は

$$y(\omega) \simeq \frac{1}{b}x(\omega)$$
 (A.4)

となり、入力と出力の関係は負のフィードバック量 b で決まることが分かる。



図 A.1: 負のフィードバック回路
# 付録 B 使用した冷凍機

### B.1 希釈冷凍機

本研究で使用した希釈冷凍機 (Split-e Dilution) は太陽日酸株式会社によって製作され、GM 冷凍機による冷却を 併用する無冷媒分離型である。外観を図 B.1 に示す。最低到達温度は最も冷える Mixing 部分が 55 mK 程度である。 300 K の状態から 4 K までの予冷にかかる時間は 2 日半程度である。その後の 3 ヘリウムと 4 ヘリウム混合ガスの 循環運転は、付属のガスハンドリングシステムを操作することで行われ、4 K から極低温に至るまでの時間は 1 日弱 である。極低温の保持時間はこれまでの実験から少なくとも 2 週間以上ある。



図 B.1: 希釈冷凍機の外観。A: 希釈冷凍機、B: GM 冷凍機ユニット、C: ヘリウムコンプレッサー、D: GM 冷凍機用 圧縮機、E: ガス操作システム

### B.2 液体ヘリウムデュワー

9.3 の SQUID の測定に液体ヘリウムデュワーを使用した。この冷凍機は液体窒素を転送することで予冷を行い、それを追い出した後に液体ヘリウムを充填する。液体ヘリウムに完全に浸るように細長いプローブをデュワー中に挿入 し、プローブ先端に測定素子をマウントすることで、素子の温度を 4.2 K に保つことができる。SQUID は超伝導部 分がニオブ (超伝導転移温度 9.2 K) でできているために、液体ヘリウム温度で SQUID は超伝導状態となり、測定が 可能となる。この液体ヘリウムデュワーは短時間で低温環境を作り出すことができ、非常に便利な冷凍機である。



図 B.2: 液体ヘリウムデュワーの外観

# 付録C 使用した室温読み出し回路

#### Magnicon XXF-1 C.1

XXF-1 は第 9.3 章の SQUID 測定、第 8 章の TES の独立読み出しによる照射実験で使用した。XXF-1 は最大 3 チャネルの TES、SQUID の読み出しが可能である。XXF-1 を使用することによって TES と SQUID に流す電流 や、SQUID のフィードバックの制御等をコンピュータから簡易的に行うことが可能となる。プリアンプが電圧ノイ ズが1 nV/√Hz 以下とノイズの面で優れている。XXF-1 では SQUID の出力は3 端子法で読み出す。表 C.1 に主な 仕様、図 C.1 に外観を示す。

表 C.1: 主な Magnicon XXF-1 の仕様			
バイアス	電流レンジ	0 - 180 $\mu {\rm A}$	
	電圧レンジ	0 - 1300 $\mu \mathrm{V}$	
TES バイアス	電流レンジ (Low range mode)	$\pm$ 500 $\mu {\rm A}$	
	電流レンジ (High range mode)	$\pm~2000~\mu {\rm A}$	
プリアンプ	電圧ホワイトノイズ	$0.33 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$	
	電圧ノイズ (0.1 Hz)	$0.8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$	
	電流ホワイトノイズ	$2.6 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$	
	電流ノイズ (0.1 Hz)	$40 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$	
FLL モード	帯域幅	20 MHz	
	出力電圧レンジ	$\pm$ 10 V	
アンプモード	ゲイン	1100 - 2000	



図 C.1: XXF-1 の外観

### C.2 マルチチャネル駆動回路

マルチチャンネル駆動回路は第 9.3 章の SQUID の評価実験、第 9 章の TES のバイアス共通読み出しによる照射 実験で使用した。この駆動回路は主に最大 10 チャネルを読み出し可能なヘッドアンプとコントロール PC から成 る。コントロール PC から各バイアス電流やフィードバック (FLL) の ON/OFF 等の操作を簡易的に行う事ができ る。ヘッドアンプ内には積分回路があり、ループゲインおよび周波数特性は帰還回路に繋がれたコンデンサ容量 *C<sub>f</sub>* によって変更することが可能である。コンデンサの変更には該当する IC ソケットにリード線付きコンデンサを差し 込めばよい。マルチチャンネル駆動回路の外観を図 C.2、主な仕様を C.2 に示す。



図 C.2: マルチチャネル駆動回路の外観

	路 <u>とヘッドアンプの</u> 主な仕	<u>!: マルチチャネル駆動回路とヘッ</u>	表
--	-----------------------	--------------------------	---

フィードバック抵抗	$12 \text{ k}\Omega$
SQUID バイアス抵抗	$100 \ \mathrm{k}\Omega$
TES バイアス抵抗	1 kΩ (定電流源)
プリアンプゲイン	40  dB
後段アンプゲイン	20  dB
入力雜音電圧密度	$2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

# 謝辞

本修士論文を執筆するにあたり、多くの方々からご指導、ご協力をいただきました。ここに感謝の意を述べさせて いただきます。

先生方には、日々の研究において数多くのご指導をしていただきました。指導教官である山崎典子先生には、ふと 思い浮かんだ些細な疑問へのご回答から、実験の細部のご相談に至るまで、ご丁寧にご指導をしていただきました。 満田和久先生は、疑問に感じたことへのご助言をその都度いただきました。また、ミーティングにて私の発表へご質 問を数多くしてくださりました。先生のご質問に回答する度に、自分の解釈や考察の甘さを実感し、次回への改善事 項に繋がっていました。竹井洋さんには、私の些細な質問にいつもご丁寧にお答えしていただきました。電話が鳴り 止まないほどお忙しい中で、ホワイトボードで時間をとって説明していただき、本当にありがたかったです。

研究室のメンバーの方々には、研究を進める上で重要なことを数多く教えていただきました。松村知岳さんには、 些細なことから実験結果に至るまで多くのお話をさせていただきました。お忙しい中で修士論文にもご丁寧に目を通 していただき、本当にありがたかったです。関谷典央さんには、発表練習の場面にて多くのアドバイスをいただきま した。実験結果を正しく表し、分かりやすく伝えることの重要さを教わりました。論文執筆のために毎晩夜遅くまで 宇宙研に残っていらっしゃる姿を見て、私も頑張る気持ちが湧いてきました。酒井和広さんには、測定のいろはから 実験データ解析の解釈に至るまで、多くの場面でご指導をいただきました。博士論文の追い込みで非常にお忙しい時 でも、私の質問にご丁寧に答えていただき本当にありがたかったです。山本亮さんには、冷却実験が初めてであった 私に、一からご丁寧に教えていただきました。山本さんと議論をし続けた二年間のお陰で、成長できた面が数多くあ ると思っています。永吉賢一郎さんには、特に TES 測定に関してご指導を頂いたことが印象に残っています。永吉さ んのハンダ付けや配線作りといった技術面の他、TES に対する根気をそばで見ることによって、私は多くのことを学 ばせていただきました。菊地貴大さんは、ミーティングにおいて私の甘い解釈に関してご指摘をしてくださいました。 私が誘電体カロリメータの冷却実験に携わっていた頃には実験に関して数多くのことを教えていただきました。同期 の林佑さんには二年間、研究を進める中でお互いに切磋琢磨してきたと思っています。また、息抜きや雑談といった 研究生活を送る上で欠かせない大切な時間を過ごさせていただきました。鶴ヶ崎祐樹さん、星野全俊さん、村松はる かさんには、測定や日々の生活における数多くの場面で支えていただきました。一年間という短い時間ではありまし たが、お世話になりました。秘書の横山章子さんには、物品発注等の事務的なお手続きを毎度していただきました。 ミーティングでの発表後に飲む紅茶はとても美味しかったです。

宇宙研 X 線グループの同期である内田悠介さん、佐藤寿紀さん、水本岬さんとは二年間ともに宇宙研での生活を 過ごしてきました。時には辛いこともあった研究生活を楽しく送ることができたのは、皆様のお陰です。

私に宇宙を学ぶきっかけを与えてくれたのは父です。私のこれまでの勉学、研究を応援し、支えてくれた父、母、 兄に心から感謝を致します。また、私が小さい頃から見守り続けてくれた祖父、祖母に感謝を致します。

宇宙研で過ごした二年間はあっという間であったものの、非常に濃く、数多くのことを学ばせていただきました。 この二年間を、今後の私の人生に活かしていきます。皆様への心からの感謝の気持ちを込め、本修士論文の執筆を終 わりと致します。

## 関連図書

- [1] H. Akamatsu, Y. Abe, K. Ishikawa, Y Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Takei, N Y Yamasaki, K Mitsuda, and R. Maeda. Impedance measurement and excess-noise behavior of a Ti/Au bilayer TES calorimeter. In *THE THIRTEENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON LOW TEMPERATURE DETECTORS-LTD13. AIP Conference Proceedings*, pp. 195–198, December 2009.
- [2] Renyue Cen and Jeremiah P Ostriker. Where Are the Baryons? The Astrophysical Journal, Vol. 514, No. 1, pp. 1–6, 1999.
- [3] Renyue Cen and Jeremiah P Ostriker. Where Are the Baryons? II Feedback Effects. The Astrophysical Journal, Vol. 650, No. 2, pp. 560–572, 2006.
- [4] John Clarke and Alex I. Braginski, editors. The SQUID Handbook: Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems. Wiley-VCH, 1 edition, August 2004.
- [5] Amuneal Manufacturing Corporation. Development of a New High Permeability Nickel Alloy for Cryogenic Magnetic Shielding Applications.
- [6] Amuneal Manufacturing Corporation. Amuneal Begins Shipping A4K Magnetic Shields. Cold Facts, 2010.
- [7] K. Mitsuda et al. The High-Resolution X-ray Microcalorimeter Spectrometer System for the SXS on ASTRO-H. In 2010 SPIE : Ultraviolet to Gamma Ray, 2010.
- [8] G. Hölzer et.al.  $k\alpha_{1,2}$  and  $k\beta_{1,3}$  x-ray emission lines of the 3*d* transition metals. *Phys.A*, Vol. 56, p. 6, 1965.
- [9] T Hara, K Tanaka, K Maehata, K Mitsuda, N Y Yamasaki, M Ohsaki, K Watanabe, X Yu, T Ito, and Y Yamanaka. Microcalorimeter-type Energy Dispersive X-ray Spectrometer for a transmission electron microscope. *Journal of Electron Microscopy*, Vol. 59, No. 1, pp. 17–26, February 2010.
- [10] K. D. Irwin. An application of electrothermal feedback for high resolution cryogenic particle detection. APL, Vol. 66, p. 1998, 1995.
- [11] K. D. Irwin. PHONON-MEDIATED PARTICLE DETECTION USING SUPERCONDUCTING TRANSITION-EDGE SENSORS. PhD thesis, Stanford University, 1995.
- [12] Y. Ishisaki, H. Kuribayashi, A. Hoshino, T. Ohashi, T. Yoshino, T. Hagihara, K. Mitsuda, and K. Tanaka. Effect of On-Chip Magnetic Shielding for TES Microcalorimeters. *Journal of Low Temperature Physics*, Vol. 151, pp. 131–137, 2008.
- [13] Mather, J. C. Bolometer noise: nonequilibrium thory. Appl. Opt., Vol. 21, p. 1125, 1982.
- [14] D. E. McCumber. Effect of ac Impedance on dc Voltage-Current Characteristics of Superconductor Weak-Link Junctions. Journal of Applied Physics, Vol. 39, pp. 3113–3118, June 1968.
- [15] Toshiyuki Miyazaki. New Readout Method for High Energy Resolution X-ray Microcalorimeters. PhD thesis, Univ. of Tokyo, 2001.

- [16] S. H. Moseley, J. C. Mather, and D. McCammon. Thermal detectors as x-ray spectrometer. J. Appl. Phys., Vol. 56, p. 1257, 1984.
- [17] Shuichi Nagasawa. SRL 10kA/cm2 Nb 標準プロセス (STD3) の設計仕様, February 2010.
- [18] T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, S. Yamada, S. Yamaguchi, N. Miyazaki, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei, K. Sakai, Y. Nagayoshi, R. Yamamoto, A. Chiba, and T. Hayashi. DIOS: the dark baryon exploring mission. In Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, 2014.
- [19] George B. Rybiki and Alan P. Lightman. Radiative Processes in Astrophysics. WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2004.
- [20] K. Sakai, Y. Takei, R. Yamamoto, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, M. Hidaka, S. Nagasawa, S. Kojiro, and T. Miyazaki. Baseband Feedback Frequency-Division Multiplexing with Low-Power dc-SQUIDs and Digital Electronics for TES X-Ray Microcalorimeters. *Journal of Low Temperature Physics*, Vol. 176, pp. 400–407, 2014.
- [21] W. C. Stewart. Current-Voltage Characteristics of Josephson Junctions. Applied Physics Letters, Vol. 12, pp. 277–280, April 1968.
- [22] A. E. Szymkowiak, R. L. Kelley, S. H. Mosely, and C. K. Stahle. unknown. Journ. Low Temp. Phys., Vol. 93, p. 281, 1993.
- [23] R. Yamamoto, K. Sakai, Y. Takei, N. Y. Yamasaki, and K. Mitsuda. Performance of Frequency Division Multiplexing Readout System for AC-biased Transition-Edge Sensor X-ray Microcalorimeters. *Journal of Low Temperature Physics*, Vol. 176, pp. 453–458, 2014.
- [24] 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. Master's thesis, 東京大学, 2003.
- [25] 永吉 賢一郎. 検出効率の飛躍的向上を目指したマッシュルーム型吸収体 TES 型 X 線マイクロカロリメータの 開発. Master's thesis, 東京大学, 2013.
- [26] 原 徹. マイクロカロリメータ EDS を搭載した分析電顕の開発-現状と今後の展開-. 顕微鏡, Vol. 44, pp. 289-291, 2009.
- [27] 山本 亮. 交流駆動下での TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイの信号多重化読み出し法の研究. Master's thesis, 東京大学, 2013.
- [28] 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. Master's thesis, 東京大学, 2012.