修士論文

SQUID を用いた X 線マイクロカロリメータの 信号検出システムの開発

東京都立大学大学院 理学研究科物理学専攻 宇宙物理実験研究室 Gen Fujimoto

Contents

1	Intr	roduction	8
	1.1	X 線天文学とは	8
		1.1.1 X 線天文学の展開	8
		1.1.2 あすか (ASCA) 衛星	8
		1.1.3 ASTRO-E 衛星	8
	1.2	X 線分光器	9
		1.2.1 ガス検出器	9
		1.2.2 半導体検出器	0
		1.2.3 超伝導トンネル接合検出器 1	0
		1.2.4 カロリメーター	0
		1.2.5 TES カロリメーター 1	1
	1.3	本修士論文の目的	12
2	TES	S カロリメータの原理 1	.3
	2.1	カロリメータの構造	4
		2.1.1 吸収体	4
		2.1.2 サーマルリンク 1	4
	2.2	カロリメータのパラメータ	15
		2.2.1 比熱	15
		2.2.2 熱伝導度	15
		2.2.3 時定数	16
		2.2.4 ノイズ	17
		2.2.5 ノイズを考慮したエネルギー分解能	18
	2.3	読み出し系	9
		2.3.1 電熱フィードバック	19
		2.3.2 有効時定数	9
3	SOI	□ID の原理と動作環境 2	22
0	3.1	SQUIDの原理	22
	J.1	3.1.1 dc-SQUIDの構造	22
		3.1.2 dc-SQUIDのBSJ模型による等価回路	23
		3.1.3 dc-SQUID の雷流 / 雷圧特性	25
		314 FLL(Flux Locked Loop) 回路	25
			.0

		3.1.5	SQUID AMP
	3.2	動作環	境
		3.2.1	TES と SQUID の組み合わせ
		3.2.2	磁気遮蔽の必要性
		3.2.3	ノイズ対策29
	с іл БА	小+ 日本	
4	天映		31 ጋ ት ৮፻፻ጐተመጀ 21
	4.1	5QUII	フカよび冷却系
		4.1.1	SQUID
		4.1.2	120111D 田劫に道フレ
		4.1.3	SQUID 用熱伝導アーム 33
	4.0	4.1.4	布林/学/床懱
	4.2	測正ン	
		4.2.1	
		4.2.2	駆動回路
		4.2.3	I-V 測定
		4.2.4	Ф-V 測定
		4.2.5	ノイス測定
		4.2.6	
5	SQU	ש וD	性能評価 46
	5.1	入力電	流端子を短絡させた SQUID の動作46
		5.1.1	
		5.1.2	電流 / 電圧 (I-V) 特性
		5.1.3	磁束 / 電圧 (Φ-V) 特性
		5.1.4	· ノイズ測定 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
		5.1.5	まとめ
	5.2	ダミー	TES を組み込んだ SQUID の動作
		5.2.1	測定条件
		5.2.2	電流 / 電圧 (I-V) 特性
		5.2.3	磁束 / 電圧 (Φ-V) 特性
		5.2.4	$J イズ測定 \dots \dots$
		5.2.5	まとめ
	5.3	ダミー	TES のバイアスを引き出した SQUID の動作
		5.3.1	· 測定条件 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
		5.3.2	電流 / 電圧 (I-V) 特性
		5.3.3	SQUID 素子の磁束 / 電圧 (Φ-V) 特性
		5.3.4	・ · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
		5.3.5	まとめ
	5.4	2 層式	シールドを用いた SQUID の動作 (バイアスを引き出さないダミー TES 使
	J.1	_,	
		5.4.1	測定条件
		542	雷流 / 雷圧 (I-V) 特性 61
		0.1.4	

5.5	- · · -	,010 51 (の蝦米	/ 電上	± (Φ	-V)	特	Έ		•	• •	•••		•	• •	•	·		•	•	62
5.5	5.4.4 E	とめ...												•							64
	実験全体の	考察								•											65
	5.5.1 J-	イズの原因																			65
	5.5.2 結算	果全体のま	とめ																		66
	5.5.3 考察	察								•	• •			•			•				67
TES	5 との結合に	関する考察	巭																		71
6.1	SQUID と	TES の動	作範囲																		71
	6.1.1 I?	ネルギー分	解能							•				•							72
	6.1.2 パノ	レス												•							73
	6.1.3 SQ	UID の読る	み出し	電圧		•••								•		•				•	74
まと	め																				76
7.1	本実験にお	ける問題点	Ξ																		76
7.2	今後の課題	į								•				•							76
誤差	計算																				78
A.1	I-V, Φ-	V 測定 .																			78
A.2	ノイズ測定									•				•							79
TES	5とSQUII	D の結合の	為の子	備実	験																80
B.1	RuO ₂ 温度	計																			80
	B.1.1 +·	ャリブレー	ション	方法																	80
	B.1.2 結算	果												•							80
	B.1.3 精度	妾																			80
	B.1.4 道)	キャリブ	レーシ	ョン	との	比較															81
B 2	TES ホルタ	~					•	•••	• •	•	•••	• •	• •	·	• •	•	•		•		
D.2		9 —					•	 	· ·	•		· ·	•••	•	· ·		•	 	•		81
B.3	TESのスイ	ター ペック	· · · ·	· · ·				 	· · ·	•	· ·	· · ·	· · ·	•	· · ·		•	 	•		81 81
B.3 B.4	TES のス⁄ 臨界温度、	ァー ペック エッジの似	 預き、列		 〔抗比	· · ·	• • •	· · ·	· · ·	•	· ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	• • •	· · ·		• • •	 			81 81 81
B.3 B.4	TES のスイ 臨界温度、 B.4.1 測え	ター ペック エッジの他 を環境	 夏き、列		.. 、 〔抗比 ..			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · ·	•	· · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · ·	• • •	· · · · · ·			· · · · · ·			81 81 81 81
B.3B.4B.5	TES のスペ 臨界温度、 B.4.1 測え 結果	ッー ペック エッジの他 主環境	・・・・ 	· · · · 、· · · 、· · ·	 			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•	· · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			· · · · · ·	· · ·		81 81 81 81 84
B.3 B.4 B.5	TES のスペ 臨界温度、 B.4.1 測え 結果 B.5.1 カロ	ター ペック エッジの他 主環境 	・・・・ 頂き、列 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	 			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · ·	•	· · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · ·	· · · · · ·	· · ·		81 81 81 81 81 84 84
B.3 B.4 B.5	TES のスイ 臨界温度、 B.4.1 測算 結果 B.5.1 カロ B.5.2 Tc	ッー ペック エッジの他 定環境 コリーメー 測定	 頭き、列 ターの	栈留批 	、 〔抗比 、 〕 〕 〕 〕		· · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·	•	· · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · ·	· · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · ·	· · ·	· · · · · · · · ·	· · · ·		81 81 81 81 84 84 84
B.2 B.3 B.4 B.5	TES のスイ 臨界温度、 B.4.1 測え 結果 B.5.1 カロ B.5.2 Tc B.5.3 カロ	yー ペック エッジの他 定環境 コリーメー 測定 コリーメー	・・・・・ 頭き、列 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	浅留批 R-T I-R	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•	· · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · ·	· · · ·		81 81 81 81 84 84 84 84
B.2B.3B.4B.5B.6	TES のスイ 臨界温度、 B.4.1 測え 結果 B.5.1 カロ B.5.2 Tc B.5.3 カロ 考察	yー くック エッジの(t 定環境 コリーメー 測定 コリーメー	・・・・ 夏き、列 ・・・・・ ターの ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	浅留 批 R-T I-R			· · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•	· · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	· · · · ·	· · · ·	· · · · · · · · ·	· · · · · · · ·	· · ·	81 81 81 84 84 84 84 84 84
	6.1 まと 7.1 7.2 誤差 A.1 A.2 TES B.1	 6.1 SQUID と 6.1.1 エニ 6.1.2 パリ 6.1.3 SQ まとめ 7.1 本実験にお 7.2 今後の課題 誤差計算 A.1 I-V、Φ – A.2 ノイズ測定 TES と SQUII B.1 RuO₂ 温度 B.1.1 キー B.1.2 結判 B.1.3 精振 	 6.1 SQUID と TES の動が 6.1.1 エネルギー分 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読る まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 誤差計算 A.1 I-V、 Φ – V 測定 . A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の B.1 RuO₂ 温度計 B.1.1 キャリブレー B.1.2 結果 B.1.3 精度 	 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 8.1 I-V、Φ – V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の子 B.1 RuO₂ 温度計 B.1.1 キャリブレーション B.1.2 結果 B.1.3 精度 	 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点	 6.1 SQUID と TES の動作範囲	 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 誤差計算 A.1 I-V、 Φ – V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO₂ 温度計 B.1.1 キャリブレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 	 6.1 SQUID と TES の動作範囲	 6.1 SQUID と TES の動作範囲	 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 82 3 3 4 4 4 4 5 5 5 4 5 5 5 5 5 6 6 6 6 6 6 6 7 6 6 7 7 7 8 7 8 7 8 7 7 7 7 8 6 6 7 7 7 7 8 8 1 1 7 7 7 7 7 8 8 1 1 1 1 4 7 7 7 8 1 1 8 1 2 2 3 3 4 4 5 <l< td=""><td> 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 ※差計算 A.1 I-V、Φ – V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリプレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 </td><td> 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 8.1 I-V、Φ − V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリプレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 </td><td> 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 8.1 I-V、Φ – V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリプレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 </td><td> 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 誤差計算 A.1 I-V、Φ - V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリブレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 </td><td> 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 誤差計算 A.1 I-V、Φ − V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリプレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 </td><td> 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 誤差計算 A.1 I-V、Φ − V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリプレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 </td><td> 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 誤差計算 A.1 I-V、Φ – V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリブレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 </td><td> 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 誤差計算 A.1 I-V、Φ - V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリブレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 </td><td> 6.1 SQUID と TES の動作範囲</td><td> 6.1 SQUID と TES の動作範囲</td><td> 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 ※差計算 A.1 I-V、Φ - V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリプレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 </td></l<>	 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 ※差計算 A.1 I-V、Φ – V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリプレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 	 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 8.1 I-V、Φ − V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリプレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 	 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 8.1 I-V、Φ – V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリプレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 	 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 誤差計算 A.1 I-V、Φ - V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリブレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 	 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 誤差計算 A.1 I-V、Φ − V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリプレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 	 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 誤差計算 A.1 I-V、Φ − V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリプレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 	 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 誤差計算 A.1 I-V、Φ – V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリブレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 	 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 誤差計算 A.1 I-V、Φ - V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリブレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度 	 6.1 SQUID と TES の動作範囲	 6.1 SQUID と TES の動作範囲	 6.1 SQUID と TES の動作範囲 6.1.1 エネルギー分解能 6.1.2 パルス 6.1.3 SQUID の読み出し電圧 まとめ 7.1 本実験における問題点 7.2 今後の課題 ※差計算 A.1 I-V、Φ - V 測定 A.2 ノイズ測定 TES と SQUID の結合の為の予備実験 B.1 RuO2 温度計 B.1.1 キャリプレーション方法 B.1.2 結果 B.1.3 精度

D 配線図

List of Figures

2.1	臨界温度付近での温度と抵抗の変化の様子	13
2.2	カロリメータの模式図	14
2.3	TESの動作回路	19
3.1	dc-SQUID 素子	23
3.2	RSJ 模型による SQUID 等価回路	23
3.3	Flux Locked Loop 回路のブロック 図	26
3.4	SQUID AMP の概略図	27
3.5	TES カロリメータと FLL 回路を用いた SQUID 読み出しシステムの模式図...	28
3.6	はんだシールドの写真	30
4.1	実験で用いた SQUID と SQUID を配置した基板写真	31
4.2	実験で用いた SQUID と SQUID を配置した基板...............	32
4.3	本実験で用いた SQUID 基板の配線図	33
4.4	2 層式シールド概要図	34
4.5	1 層式シールド用熱伝導アーム概要図	34
4.6	1 層式シールド&熱伝導アーム写真	34
4.7	2 層式シールド&熱伝導アーム概要図..........................	35
4.8	2 層式シールド&熱伝導アーム組み込み写真	35
4.9	各パーツの希釈冷凍機内外での配置温度帯および配線図	35
4.10	希釈冷凍機模式図	36
4.11	希釈冷凍機の内部構造の摸式図・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	37
4.12	測定装置接続全体図	38
4.13	電池駆動時の目盛りとその出力	39
4.14	電源駆動時の目盛りとその出力	39
4.15	$I-V$ 測定回路概要 \ldots	40
4.16	I-V 特性 (左) とフィードバックコイルの Φ -V 特性 (右) (シミュレーション)	41
4.17	Φ -V 測定回路概要 \ldots	42
4.18	ノイズ測定回路図	43
4.19	ダミー TES 回路図	44
4.20	TES 回路図	44
4.21	ダミー TES と TES のノイズ比較	45
5.1	I-V 測定時にバイアスに入力する電流	47

5.2	Input 短絡時の I-V 測定 SQUID バイアス 150µA	47
5.3	Input 短絡時の I-V 測定 SQUID バイアス 150µA	47
5.4	Input 短絡時の Φ-V 特性	48
5.5	Input 短絡時の Φ -V 特性 SQUID バイアス: I_c	48
5.6	Input 短絡時のノイズ測定 (電源駆動時)	50
5.7	Input 短絡時のノイズ測定 (電池駆動時)	50
5.8	Input 短絡時のノイズ測定 2K	50
5.9	Input 短絡時のノイズ測定 2.6 ~ 2.8K	50
5.10	Input 短絡時のノイズ測定 5.6K	51
5.11	Input 短絡時のノイズ測定 5.6K	51
5.12	ダミー TES 配線した I-V 測定 (TES バイアス引き出さず) SQUID 動作温度: 1.4K	
	SQUID バイアス:83.5 μ A	53
5.13	ダミー TES 配線した I-V 測定 SQUID バイアス 200µA	53
5.14	ダミー TES を配線した $(\mathrm{TES}$ バイアス引き出さず $)\Phi$ -V 特性 \ldots \ldots	54
5.15	ダミー TES を配線した (TES バイアス引き出さず) Φ -V 特性 SQUID バイアス: I_c	54
5.16	ダミー TES(配線引き出さず) 使用時のノイズレベルの駆動バイアス依存	55
5.17	ダミー TES 配線 (TES バイアスは OPEN) ノイズスペクトル $\sim 52 \mathrm{KHz}$	56
5.18	ダミー TES 配線 (TES バイアスは $OPEN$) 時のノイズスペクトル $\sim 100 Hz$	56
5.19	ダミー TES(バイアス引き出し) 配線時 I-V 測定 @ 1.7K AC:83.5µA	57
5.20	ダミー TES(バイアス引き出し) 配線時 I-V 測定 @ 1.7K AC:110µA	57
5.21	入力電流端子にダミー $\mathrm{TES}($ バイアス引き出 $b)$ 配線時の $-\mathrm{V}$ 特性 $@1.9\mathrm{K}$	58
5.22	入力電流端子にダミー $\mathrm{TES}($ バイアス引き出 $b)$ 配線時の $-\mathrm{V}$ 特性 $@1.9\mathrm{K}$	58
5.23	測定環境グラウンド配線図	60
5.24	Nb 製 SQUID 台座に SQUID 基板を載せた写真	60
5.25	Nb 製 SQUID 台座に SQUID 基板を載せ配線した写真..........	60
5.26	ダミー TES のバイアス引き出し用配線回路図 希釈冷凍機内部.......	61
5.27	ダミー TES のバイアス引き出し用配線回路図希釈冷凍機外部	61
5.28	2 層式シールド+ダミー TES(バイアス OPEN) 配線時 – I-V 測定 AC:50µA	62
5.29	2 層式シールド+ダミー $ ext{TES}$ (バイアス $ ext{OPEN}$) 配線時 $ ext{ I-V}$ 測定 $ ext{AC:150}\mu ext{A}$.	62
5.30	2 層式シールドを用いたダミー TES(バイアス OPEN) 配線時 -V 測定入力電流	
	振幅: 74 μ A	63
5.31	ダミー TES を配線した (TES バイアス引き出さず) Φ -V 特性 SQUID バイアス:1.03	I_c 63
5.32	ダミー TES 配線(TES バイアスは OPEN) 時のノイズレベルのバイアス依存 .	63
5.33	2 層式シールドを用いたダミー TES(バイアス OPEN) 配線時ノイズスペクトル	
	~ $51K[Hz$	64
5.34	2 層式シールドを用いたダミー TES(バイアス OPEN) 配線時ノイズスペクトル	
	~ 100K[Hz	64
5.35	各実験における I-V 測定...............................	69
5.36	各実験における $\Phi - V$ 測定 \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	69
5.37	特性の揃っていないジョセフソン接合における SQUID の特性.......	70
61	SOULD #Zo Coin / = 7	74
0.1	SQUID 糸丁の Gall クフノ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14

B.1	RuO_2 温度計の温度 - 抵抗値 $(\mathrm{T-R})$ 曲線 \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	85
B.2	RuO_2 温度計の $\operatorname{Fitting} \operatorname{Carve}$ と測定データとの差の割合 \ldots \ldots \ldots \ldots	85
B.3	TES Holder	85
B.4	Heater & Spacer 部分	85
B.5	TES Holder	86
B.6	本測定における全体の配線図	86
B.7	分流回路	87
B.8	T-R Carve	87
B.9	I-R Carve	87
C.1	2 層シールドの SQUID Holder	88
C.2	2 層シールドの内部シールド	89
C.3	2 層式シールド用ブリッジ設計図	90
D.1	測定全体配線図	91

List of Tables

3.1	目標とする TES のスペック..............................	27
3.2	さまざまな環境からくる磁場と、その距離依存 $(B=M/r^n)$	29
4.1	セイコーインスツルメンツ社における理想的環境 (4.2K) での測定結果	32
5.1	Input 短絡時 測定結果	51
5.2	ダミー TES 配線(TES バイアスは OPEN)測定結果	55
5.3	ダミー TES バイアス引出し時 測定結果	59
5.4	2 層シールド + ダミー TES 配線(TES バイアスは OPEN)時測定結果....	64
5.5	各測定条件での測定結果....................................	67
A.1	各測定誤差....................................	79
B.1	宇宙研測定データ (残留抵抗比を 5 %として転移温度を推定)	81
B.2	Keithlay 2001 のスペック	82
B.3	Keithlay Model 236 のスペック	82

Chapter 1

Introduction

1.1 X線天文学とは

1.1.1 X線天文学の展開

X線天文学は、1962年にGiacconiらによるロケット実験によって全天で最も明るNX線源 である Sco X-1が観測されたことから始まる。この実験を期に気球やロケット等の飛翔体を用い た観測が行われ、数多くのX線源が発見された。1970年に世界で最初のX線天文衛星(Uhuru) が打ち上げられ、その後数多くのX線天文衛星がうちあげられる事となる。日本では1979年に 最初のX線人工衛星「はくちょう」が打ち上げられ、その後「てんま」、「ぎんが」、「あす か」と4つの衛星が打ち上げられ多くの成果をあげてきている。

1.1.2 あすか (ASCA) 衛星

1993年2月に日本で4番目に打ち上げられ現在運用されているX線観測衛星。「ASCA」に は撮像型ガス蛍光比例計数管(Gas Imaging Spectrometer: GIS)と世界で初めて衛星に搭載 されたX線CCDカメラ(Solid-state Imageing Spectrometer: SIS)の2種類のX線検出器が 搭載されている。SISは0.4KeV ~ 10KeVで優れたエネルギー分解能(~ 120eV@6KeV)を持 ち、GISは0.7KeV ~ 10KeVで広い視野(直径 ~ 50')と高い時間分解能(61µsec)を持つ。どち らの検出器もImageingと分光観測が同時に行うことが可能であり、これまでのX線衛星に無い 優れた特徴を持つ。さらに本格的なX線反射簿望遠鏡を搭載する事により高感度で優れた分光 撮像観測を行い、超新星残骸で電子が高速に加速されること、銀河団の中心にDark Mater が集 中する事などの発見を行っている。

1.1.3 ASTRO-E 衛星

2000年2月打ち上げ予定の日本で5番目の人工衛星。「ASTRO-E」には世界で初めてのX 線マイクロカロリメータ (X-Ray Spectrometer: XRS) と、X線 CCD カメラ (X-ray Imaging Spectrometer: XIS)、硬X線領域までの感度を有する分光器 (Hard X-ray Detector: HXD) の3種類が搭載される。XRS は 0.5KeV ~ 10KeV で Δ E ~ 10eV という高いエネルギー分解能 を有する。しかし検出器を 60mK 程度まで冷却しなくてはならず、その冷媒の蒸発の為に寿命 が2年程度しか持たないのが欠点である。XIS は「あすか」に搭載されている SIS の能力を大 幅に向上させた物であり、 Δ E ~ 120eV のエネルギー分解能を有し、HXD は 10 ~ 60KeV ま での感度を持つ PIN 型 Si 半導体検出器を主検知器とする井戸型フォスウイッチカウンタと 60KeV ~ 700KeV 程度までの感度を持つ結晶シンチレーター GSO とで成り立っていて、これまでに無い低いバックグラウンド環境を実現する。

1.2 X 線分光器

X線天文学の発展は X線分光器の発展ともいえる。ここでは代表的な X線分光器を紹介し、そのエネルギー分解能についても述べる。

1.2.1 ガス検出器

1.2.1.1 比例計数管

比例計数管 (Proportional Counter: PC) とは、ガスを封入したカプセルに電子なだれが起き る程度の強さの電場を掛けた物である。このカプセルに入射した X 線はカプセル内のガスを一 次電子とイオンに電離させる。一次電子とイオンのそれぞれはカプセルの陽極と陰極移動する。 このとき電場によって加速させられた一次電子がガスのイオン化ポテンシャルを越えると、一次 電子によってガスをイオン化し二次電子とイオンの対を作る。二次電子がイオン化ポテンシャル を同様にして得ると、三次電子とイオンの対を作る。これを繰り返すことで電子なだれが起き、 一次電子に比例した電子を測定することができる。これが比例計数管の原理である。

比例計数管のエネルギー分解能は一次電子と二次電子の数の揺らぎで決まる。ガス検出器の 場合における一次電子の数の揺らぎは、次の様にして導ける。

入射 X 線のエネルギーを *E*、キャリア(電子、イオン、正孔、フォノンなど X 線光子が検 出体と相互作用して生じるもの)を一つ生成するのに必要な平均エネルギーを ω とするとキャリ ア数のゆらぎ σ は

$$\sigma_2 = \frac{FE}{\omega} \tag{1.1}$$

で表すことができる。ただし

F < 1

は Fano 因子である。これより相対エネルギー分解能は以下のようにして導き出すことができる

$$\frac{\Delta E}{E} \propto \frac{\sigma}{E/\omega} \propto \sqrt{\frac{\omega}{E}}$$
(1.2)

ここでの ω は 30eV と小さいのだが、ガス増幅の揺らぎが支配的であり、実際には数 KeV のオーダーになってしまう。

蛍光比例計数管 (Gas Scintillation Proprional Counter : GSPC) は比例計数管と異なり、一 次電子による電子なだれを起こさせない事で二次電子のゆらぎを無くし、エネルギー分解能を良 くでするものである。一次電子が平行電場によって加速され、ガスを励起する。この励起したガ ス原子が基底状態に戻る際に放射する紫外線を光電子倍増管 (Photo Multiplier Tube : PMT) で電子に変換されて測定される。一次電子はガスを何度も励起し、繰り返し紫外線を放出させ るので増幅される。蛍光比例計数管のエネルギー分解能は一次電子数、光子数、 PMT の量子効 率、 PMT の増幅率のゆらぎで決定される。一次電子の紫外線光子への変換される数を多くする 事によってゆらぎの影響を小さくする事が可能であり、実際のエネルギー分解能は比例計数管に 比べて 2 ~ 3 倍良い (数百 eV 程度)。

1.2.2 半導体検出器

CCD を含む半導体検出器 (Solid State Detector : SSD) は半導体の p-n 接合に逆バイアスを かけた際に生じる空乏層に X 線が通過した際に電子 - 正孔の対を用いて入射 X 線を測定する検 出器である。空乏層で X 線が光電吸収されると、 X 線のエネルギー E は光電子と Auger 電子 に渡される。そしてこれらの電子が E/ω 組の電子 - 正孔対を作る。 Si の場合には、 1 個の電子 - 正孔対を作るのに平均 $\omega = 3.65 \text{eV}$ を必要とする。これはガス検出器の場合に比べて一桁小さ い値である事より作られる一次電子の数は一桁多く、なだれ増幅をおこなう必要が無い。 SSD の場合のエネルギー分解能は主に初段増幅器のノイズで決まってくる。初段増幅器のノイズは初 段増幅器から見た検出器の電気容量を小さくすれば良く、 X 線 CCD の場合には各ピクセルの電 気容量が極めて小さく 100 eV のオーダーの分解能を実現できる。

1.2.3 超伝導トンネル接合検出器

超電導トンネル接合 (Superconducting Tunneline Junction: STJ) 素子は、2枚の超伝導体 で薄い絶縁体を挟んだジョセフソン接合素子の一種である。STJ 素子にX線が入射すると光電 吸収によって電子が生成され、その電子によって超伝導状態の金属の内部でなしているクーパー 対を破壊し、多数の準粒子 (quasiparticle) が励起される。この励起された準粒子のうちトンネ ル効果で絶縁体をトンネルしたものを信号として検出する。超伝導体を利用する為に極低温 (4K 程度) である必要がある。この検出器のエネルギー分解能は、1つのクーパー対を破壊するのに 必要なエネルギーによって決まり、STJ では数 meV であることから 4eV 程度の分解能を持つ ことが可能である。

1.2.4 カロリメーター

カロリメータはボロメータとも呼ばれ小さな (i1mm³) 検出体の内部で X 線が吸収体に光電効 果によって吸収され、そのエネルギーのほとんどが熱に変換され、この熱による温度上昇を温度 計で測定する事によって入射した X 線のエネルギーを測定する検出器である。

1.2.4.1 エネルギー分解能

カロリメータのエネルギー分解能は、内部エネルギーのゆらぎによって決まってくる。カロリ メータの熱容量を C、ボルツマン定数を k_B 、動作温度を T とすると、フォノンの数は $N = CT/k_BT =$

$$\sqrt{N} = \sqrt{\frac{C}{k_B}} \tag{1.3}$$

と表せる。またエネルギーEの光子がカロリメータに入射した場合に励起されるフォノンの数と、そのゆらぎは

$$N = \frac{E}{k_B} \tag{1.4}$$

$$\sqrt{N} = \sqrt{\frac{E}{k_B}} \tag{1.5}$$

となる。またエネルギー Eの光子がカロリメータに入射する事によって励起されるフォノンの数とそのゆらぎは

$$n = \frac{E}{k_B T} \tag{1.6}$$

$$\sqrt{n} = \sqrt{\frac{E}{k_B T}} \tag{1.7}$$

と表せる。ここで一般的なカロリメータの値として、 T = 0.1K、 $C = 10^{-11}$ J/K し入射する X 線のエネルギーを 1keV とすると

$$\sqrt{N} \sim 1 \times 10^6 \tag{1.8}$$

$$\sqrt{n} \sim 1 \times 10^4 \tag{1.9}$$

となり、 *N* のゆらぎが 100 倍大きく効いてくる事がわかる。フォノン一個当たりの平均エネ ルギーが *k*_BT である事よりのりカロリメータの内部のゆらぎは

$$\Delta E = \sqrt{Nk_BT} = \sqrt{k_BT^2C} \tag{1.10}$$

1.2.5 TES カロリメーター

優れたエネルギー分解能を持つ X 線カロリメータの性能をさらに優れた物にする改良を行った物が TES(Transition Edge Sensor) カロリメータである。これは超伝導状態から常伝導状態への遷移に伴う抵抗値の急激な変化を用いた温度計を利用した検出器である。抵抗温度計の感度 αを

$$\alpha = \frac{d\ln R}{d\ln T} \tag{1.11}$$

と定義すると半導体温度計を用いた場合には $\alpha \sim 2$ であるのに対して、 TES の場合には $\alpha \sim 100 \sim 1000$ と高い感度を得ることができる。これにより、より高いエネルギー分解能を得る ことが可能になる。

1.2.5.1 エネルギー分解能

§1.2.4.1 (P10) 及び、後述の§2.2.5 (P18) より X 線カロリメータのエネルギー分解能は √α に 比例して良くなる。このことより、 TES カロリメータでは従来の半導体温度計を用いたカロリ メータより一桁以上高いエネルギー分解能が実現可能である。

1.3 本修士論文の目的

本修士論文では、 TES カロリメータの読み出しシステムとして SQUID(Superconducting QUantum Interference Device)を用いたシステムの構築を目的としている。主に SQUID を希釈冷凍 機で冷却しその測定環境の構築、 SQUID の特性の評価、ノイズレベルの軽減を行った。

Chapter 2

TES カロリメータの原理

TES (Transition Edge Sensor)とは Fig.2.1に示すように物質が超伝導状態から常伝導状態へ遷移する際にその抵抗値が急激に変化する性質を利用した温度計である。

遷移は数 mK の間におこり、抵抗値は $0\Omega - 1\Omega$ 程度の変化幅を持つ。したがって前章で定義 した傾き α は臨界点において 1000 近い値を持ち、従来の半導体温度計 ($\alpha \sim 2$) に比べ TES が 非常に感度の高い温度計であることになる。



Figure 2.1: 臨界温度付近での温度と抵抗の変化の様子

本実験では Mo-Au 薄膜の TES を想定している。 Mo 薄膜は電子ビーム蒸着で Si 基板上に生成し、その上に酸化防止をかねて Au 薄膜を蒸着したものである。二層構造を用いているのは薄膜の近接効果を利用して臨界温度をバルク Mo のそれとは異なる値にし、 TES の動作点をコントロールするためである。本実験中に行った TES の動作点の測定については §Bを参照。

2.1 カロリメータの構造



Figure 2.2: カロリメータの模式図

2.1.1 吸収体

§1.2.4.1にも書いた通りカロリメータのエネルギー分解能は熱容量に依存している。また X 線領 域における光子の吸収は主に光電効果であるが、光電効果の吸収計数は原子量の 5 乗に比例する ので吸収体には Z の大きな物質を用いるのが良い。つまり吸収体には比熱が小さく Z が大きい 物質 (Sn など) が適している。

Si 基板は吸収体に吸収された X 線のエネルギーが十分熱に変換されるまでの時定数よりも Si への熱伝導が長くなるように Si を周囲から熱的に分断したものであり、ここの温度を測定する ことによって X 線を検出することができる。

2.1.2 サーマルリンク

熱浴はピクセルにて生じた熱を十分小さい熱伝導度 G のサーマルリンクを通して排出する事で 常に熱平衡状態に保つための物である。

2.2 カロリメータのパラメータ

2.2.1 比熱

比熱はカロリメータのエネルギー分解能を左右する重要なパラメータの1つである。比熱Cに は格子比熱 C_s と電子比熱 C_e が存在する。

2.2.1.1 格子比熱

格子比熱はデバイ温度 θ_D より十分低温において次の式 (2.1) のように書ける。ただし N_0 はア ボガドロ数、 θ_D はデバイ温度である。この式 (2.1) からもわかるとおり低温での格子比熱は温 度の 3 乗に比例する。

$$C_s \approx \frac{12\pi^4}{5} N_0 k_B \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3 \tag{2.1}$$

2.2.1.2 電子比熱

電子比熱は超伝導状態以外の物質(金属以外など)では式(2.2)と書くことができる。

$$C_e = \Upsilon T \tag{2.2}$$

また超伝導状態においては式(2.3)と書くことができる。

$$C_e = \Upsilon a T_e \exp(\frac{-bT_c}{T}) \tag{2.3}$$

しかし臨界温度付近 $(T \sim T_c)$ においてはこれらの式では表すことのできない鋭いピークを持つ場合があり、比熱異常と呼ばれる。ただし、 Υ はゾンマーフェルトパラメータ、 T_c は超伝導臨界温度、 a,b は物質によらない定数 $(a \approx 8.5, b \approx 1.44)$ である。

2.2.2 熱伝導度

ー般に微小温度差に対する熱伝導度がKであるとき、有限な温度差がある場合の熱流量Pは流れをN個の直列の片素にわけて式(2.4)のように表すことができる。jは1からNまでの整数である。

$$\Delta P_{j \to j+1} = \frac{K(T_{j+1})}{N} (T_{j+1} - T_j)$$

= $\frac{K(T_j)}{N} (T_{j+1} - T_j)$
= $\frac{K(T_{j+1})}{N} T_{j+1} - \frac{K(T_j)}{N} T_j$ (2.4)

そこでこれらの式の両辺をすべて足しあわせて、 $N \longrightarrow \infty$ とすると次の様に書き表せる。 Tはカロリメータの温度、 T_S は熱浴の温度である。

$$P = K(T)T - K(T_S)T_S \tag{2.5}$$

$$P = K_0 T^n - K_0 T^n_S (2.6)$$

となるので、 $G \in G = dP/dT$ と定義するとGは

$$G = G_0 T^{n-1} \tag{2.7}$$

と書くことができる。そこでこの G を用いて P を書き表すと式 (2.8) のようにできる。

$$G \equiv \int_{T_S}^T G dT$$

= $\frac{G_0}{n} (T^n - T_S^n)$ (2.8)

ここでnは半導体であるSiの場合にはn = 4、金属の場合にはn = 5を用いるのが一般的である。

2.2.3 時定数

カロリメータの温度を T、熱容量を C、熱浴の温度を T_S 、カロリメータから熱浴への熱伝導度 を G とする。カロリメータの温度測定のためにながす電流による発熱量を P、フォトンの入射 によるパワーを Q、それらの和を $W(\equiv P + Q)$ とすると W は式 (2.9) のように表せる。

$$P + Q = W = C\frac{dT}{dt} + \frac{G_0}{n}(T^n - T_S^n)$$
(2.9)

X 線入射前のカロリメータの温度を T_0 、入射した X 線による温度上昇を ΔT_0 、 $T \ge T_0$ との 温度差を $\Delta T (\equiv T - T_0)$ として P、 Q を求めると

$$P = G(T^n - T_S^n)$$

$$Q = \delta(t)Q_0$$
(2.10)

と求められる。発熱量の時間変化を無視する仮定のもとに

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{2.11}$$

と求められる。ここで τ は式 (2.12) と書ける素子の材質によって決まる物理的時定数である。

$$\tau = \frac{C}{G} \tag{2.12}$$

実際には後述 (§2.3.1) する電熱フィードバックがかかるので実効的な時定数はこれよりも短くなる。

2.2.4 ノイズ

ここでは TES カロリメータ素子及び SQUID において生じるノイズを入力パワーに変換した NEP(Noise Equivalent Power)を用いて評価する。全体のノイズはカロリメータのノイズ成分と SQUID などの読み出し系ノイズ成分を用いて

$$NEP^{2} = NEP_{Johnson}^{2} + NEP_{Phonon}^{2} + NEP_{SQUID}^{2} + NEP_{1/f}^{2}$$
(2.13)

と表せる。ここで NEP_{Johnson} はカロリメータの持つ抵抗によって生じるジョンソンノイズ、 NEP_{Phonon} はフォノンの数の揺らぎによって生じるフォノンノイズを表し、この2つがカロリ メータ素子で生じる主要なノイズ成分である。また NEP_{SQUID} は SQUID において生じるノイ ズ、 NEP_{1/f} は 1/f ノイズを表し、この2つが読みだし系で乗る主なノイズ成分である。以下 でそれぞれを定式化する。

2.2.4.1 フォノンノイズ (NEP_{Phonon})

フォノンノイズとは素子と熱浴の間をフォノンがランダムに行き来することによって生じるノイズである。また電熱フィードバックがかかった極限でのノイズは式 (2.14) で表せる。詳しい導出は [9]、 [11] に委ねる。

$$\text{NEP}_{\text{Phonon}}^{2} = \frac{4k_{B}T}{R_{0}} \frac{n/2}{1 + \omega^{2} \tau_{eff}^{2}} [\text{A}^{2}/\text{Hz}]$$
(2.14)

ここで R_0 は TES の動作抵抗、 τ_{eff} は有効時定数 (§2.3.2) である。

2.2.4.2 ジョンソンノイズ (NEP_{Johnson})

α が正の値を持ち、入射エネルギーによる出力電流がジョンソンノイズによる電流よりも十分大 きい場合以下のように表される。

$$\text{NEP}_{\text{Johnson}}^{2} = \frac{4k_{B}T}{R_{0}} \frac{n^{2}/\alpha^{2} + \omega^{2} \tau_{eff}^{2}}{1 + \omega^{2} \tau_{eff}^{2}} [\text{A}^{2}/\text{Hz}]$$
(2.15)

導出は[9]、[11]に委ねる。

2.2.4.3 SQUID ノイズ (NEP_{SQUID})

dc-SQUID には次章で述べるシャント抵抗に由来する熱雑音が存在する。しかし十分冷却された 状態の場合 ($k_bT \ll eV$) にはこの熱雑音よりもジョセフソン接合のショットノイズが支配的にな る。この SQUID のノイズレベルを i_n pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ と置くと、 NEP_{SQUID} は電流応答性 S_I で割っ て以下のように表せる。

$$\operatorname{NEP}_{\mathrm{SQUID}}{}^{2} = \frac{i_{n}^{2}}{S_{I}^{2}}$$
(2.16)

ここで電流応答性 S_I は次のように定義している。

$$S_I \equiv \frac{\delta I}{\delta Q} [A/W] \tag{2.17}$$

つまり *S_I* はカロリメータの入力パワーに対してどれだけの出力電流が変化するのかを示す重要なパラメータである。詳しい計算 [5] はここでは省くが、次のように表すことができる

$$S_I \simeq -\frac{1}{V_b} \frac{1}{1 + i\omega\tau} \tag{2.18}$$

2.2.4.4 1/f ノイズ (NEP_{1/f})

フォノンノイズ、ジョンソンノイズ、ショットノイズなど以外に SQUID のジョセフソン接合に おいて 1/f ノイズが起こる。これを A(f) と書くと次のように表せる。

$$NEP_{1/f}^{2} = \frac{A(f)^{2}}{S_{I}^{2}}$$
(2.19)

2.2.5 ノイズを考慮したエネルギー分解能

従来のカロリメータのエネルギー分解能は測定系のノイズにより制限を受け、理論的な値を得る ことができなかった。ここでは SQUID による読み出しでのるノイズがどれだけ検出器でのるノ イズを損ねるかを考察する。

TES カロリメータの理論的エネルギー分解能 (FWHM) は

$$\Delta E = 2.35\xi \sqrt{k_B T^2 C} \tag{2.20}$$

と表すことができ、これに TES カロリメータとして適当な値、 α =1000、 n=4、 T=0.5 K、 $C = 1 \times 10^{-12}$ J/K を代入し後述の方法で ξ を求めると 0.86 eV 程度が得られる。

一方で読みだし系では入射 X 線に因らない一定のノイズ成分を持っているためノイズの分解 能への寄与は TES カロリメータの電流応答性 (current responsivity)*S*_I によって決まることよ リ式 (2.18)、式 (2.16)を用いて

$$\Delta E = 2.35 \left(\int_0^\infty \frac{4df}{\text{NEP}_{\text{SQUID}}^2(f)} \right)^{-\frac{1}{2}}$$
(2.21)

$$\Delta E \simeq 2.35 V_b i_n \sqrt{\tau_{\text{eff}}} = 0.147 [\text{eV}] \left(\frac{V_b}{1\text{V}} \frac{i_n}{1\text{pA}} \sqrt{\frac{\tau_{eff}}{100\mu\text{sec}}}\right)$$
(2.22)

と求められ、入力換算ノイズ $i_n = 1 \text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 TES のバイアス電流 $I = 1 \mu \text{A}$ 、 TES の動作 点における抵抗値 $R = 1 \Omega$ よって $V_b = IR = 1 \mu \text{V}$ を用いた場合、 0.147 eV 程度にしかならな い。したがって SQUID を読みだしに用いることで 1eV のエネルギー分解能を持つ TES カロリ メータシステムが十分に実現可能であると言える。

TES の持つエネルギー分解能の表式に現われた ξ は温度計の感度や素子の動作条件によって 決まるパラメータで、カロリメータの温度 T と熱浴の温度 T_S の比を θ とおくと次のように表せ る。 n は熱伝導度の温度依存性を表すパラメータである。

$$\xi \equiv 2\left(\left(\frac{n}{\alpha}\right)^2 \left(\left(\frac{1-\theta^{-n}}{\alpha}\right)^2 + \frac{1-\theta^{-(2n+1)}}{2n+1}\right)\right)^{\frac{1}{4}}$$
(2.23)

この式 (2.23) において $\alpha \gg 1$ でかつ、 $2n \gg 1$ である場合に ξ を近似すると

$$\xi \simeq \sqrt{\frac{1}{\alpha}} \sqrt{\frac{n}{2} (1 - \theta^{-(2n+1)})} \tag{2.24}$$

と求められる。実際に数値的に求めてエネルギー分解能を良くする θ は 1.1 であるが、ここで $\theta \gg 1$ として ξ を求めると

$$\xi \simeq \sqrt{\frac{1}{\alpha}} \sqrt{\frac{n}{2}} \tag{2.25}$$

と近似できる。本論文で SQUID で読み出す事を目的にしている TES は現時点で Au であるので n = 5 となる。

2.3 読み出し系

2.3.1 電熱フィードバック

TES は金属の超伝導臨界温度の範囲で用いなければならない。そのため、ダイナミックレンジ が数 mK と非常に狭い。従来の半導体温度計のように定電流バイアスで動作させるとわずかな温 度上昇に対して急激に抵抗値が上昇し、これに比例して発熱量が増加する。そのため正のフィー ドバックがかかり動作点を安定に保つことが困難になる。そこで TES を低電圧にて動作させ負 のフィードバック (electro-thermal feedback) をかける事で動作点内に保つという方法を用いる。



Figure 2.3: TES の動作回路

具体的な回路で説明すると Fig.2.3の回路のように定電圧でバイアスした TES の温度が X 線 の入射などで上昇すると TES の抵抗値は急激に上昇し、流れる電流は急激に減少する。それに よって TES の発熱量も急激に減少し TES の温度を下げようとする。このとき全体では負のフィー ドバックがかかるのである。またこの回路は電流読み出し型であるが、 TES の抵抗値が非常に 小さくフィードバックによって電流変化も極小である事からインピーダンスが小さく高感度の電 流計が必要になる。このような要請からも TES を用いたカロリメータの読み出しシステムには SQUID が必要になってくる。

2.3.2 有効時定数

熱平衡状態のカロリメータの熱の釣り合いを考える。

$$P_{bg} + \frac{V_b^2}{R} = G(T - T_S)$$
(2.26)

ここで P はバックグラウンドの熱入力、 V_b はバイアス電圧、 R は TES の抵抗値、 G は熱浴 とピクセルの間の熱伝導度、 T は TES の温度、 T_S は熱浴の温度である。

次に X 線が入射し TES の温度が上昇した後定常状態に戻るまでの負のフィードバックがかかっている中での動作を考えると式 (2.27) が成り立つ。

$$C\frac{d\Delta T}{dt} = -\frac{P_b\alpha}{T}\Delta T - G\Delta T \tag{2.27}$$

左辺は内部エネルギーの増加分の時間変化率、右辺の第一項は電熱フィードバックにより発熱 量の減少、第二項は熱浴への熱流出の増分を表している。まず右辺の第一項は次のようにして求 める事ができる。

電圧変化は無いと考えられるので、抵抗値がRから $R + \Delta R$ になったときのジュール熱の変化は

$$\Delta P_{Joule} = \frac{V_b^2}{R + \Delta R} - \frac{V_b^2}{R}$$

$$= \frac{V_b^2}{R} (1 - \Delta RR) - \frac{V_b^2}{R}$$

$$= -\frac{V_b^2 \Delta R}{R^2}$$

$$= -\frac{V_b^2}{R} \frac{T \Delta R}{R Delta T} \frac{\Delta T}{T}$$

$$= -\frac{V_b^2 \alpha}{R T} \Delta T$$
(2.28)

この α は式 (1.11) で定義した α である。既に述べているように TES の場合には 100 ~ 1000 になる。また熱平衡状態でのジュール熱 P は次のようにかける

$$P = \frac{G_0}{n} (T^n - T_S^n)$$
(2.29)

$$G = G_0 T^{n-1} (2.30)$$

ここで *G*₀ は 1K での熱伝導度である。ここで動作温度が熱浴の温度よりも十分に高い場合を 考えると式 (2.29)、 (2.30) より

$$P = nTG \tag{2.31}$$

が得られる、この式と式 (2.12) を式 (2.27) に代入して求めると

$$\Delta T = \Delta T_0 \exp(-\frac{t}{\tau_{eff}}) \tag{2.32}$$

と書ける。ここで au_{eff} は電熱フィードバックをかけた場合の実際の時定数(有効時定数)で あり

$$\tau_{eff} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{n}}\tau\tag{2.33}$$

ここで $\frac{\alpha}{n} \gg 1$ の場合には

$$\tau_{eff} \sim \tau \frac{n}{\alpha} \tag{2.34}$$

と近似する事ができる。これより電熱フィードバックをかけることで大幅に応答速度をあげる 事が可能になる。しかし吸収体の温度平衡状態になる時間よりも遅くなくてはならない。一般的 に τ は 1msec である。 $\alpha = 100$ 、 n = 5 の TES カロリメータを考えた場合 τ_{eff} は 1/20 に速 度があがる事がわかる。

Chapter 3

SQUID の原理と動作環境

TES カロリメータからの信号を読み出すことを考えた場合、TES の期待動作温度である 300mK 以下の低温環境においてなるべく読みだし系による雑音を下げることが必要である。TES とな るべく近い温度環境で、低インピーダンスの読みだしを行なうには、 dc-SQUID を用いた電流 変化の検出が最適であると考えられる。 SQUID は以下に述べるように入力端子は、超伝導線の 小さなコイルであって、入力抵抗をもたない。このため例えば GaAs を用いた FET による電流 / 電圧変換に比べても低雑音となりうる。

3.1 SQUID の原理

SQUID は超伝導量子干渉計 (Superconducting QUantum Interference Device)の略で、超伝 導の量子性を利用した装置である。この装置では特に磁気検出装置として心臓などに流れる微 弱電流が発生させる微弱な磁場の検出など従来の測定装置とは比較にならない感度の高い検出を 可能にすることができる。また SQUID の大きな利点としてあげられる点は入力電流による磁場 の検出を行うため、入力電流を一切乱すこと無く検出できることである。入力電流をコイルなど を通して磁束に変換し、それを SQUID 素子を通すことにより、入力電流を電圧として測定する 電流 / 電圧変換器 (電流計) として動作する。この IV 変換器の増幅度は通常 (1 ~ 100)×10⁵ V / A、入力電流換算ノイズは (0.5 ~ 10)pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ である。入力最大値は約 100 μ A_{p-p} であり、有 効帯域幅は d_c ~ 10(100)kHz ある.

現在実用化されている SQUID はバイアス方式の違いによって dc-SQUID と rf-SQUID の 2 種類に分類される。本実験では特性のそろった 2 つのジョセフソン接合を並列にし直流バイアス電流をかけて用いる dc-SQUID を使用する。

3.1.1 dc-SQUID の構造

dc-SQUID は Fig.3.1のように 2 つのジョセフソン接合からなる構造を持つ。接合を流れるジョ セフソン電流は接合両端の位相差によって決まるが、 2 つの接合は独立な位相差を持つのではな く、ループを貫く磁束が磁束量子 ($\Phi_0 = h/2e = 2.0678 \times 10^{-15}$ wb)の整数倍になるような制限 を受ける。 SQUID 素子にかけるバイアス電流を適当な値で固定すると SQUID のループを貫く 磁束を電圧に変換する働きを持つ。また素子の近くにコイルを巻き、そのコイルに流れる電流が SQUID にかかる磁束に変換される事から、電流 / 電圧変換器として扱うことも容易にできる。



Figure 3.1: dc-SQUID 素子

3.1.2 dc-SQUID の RSJ 模型による等価回路



Figure 3.2: RSJ 模型による SQUID 等価回路

SQUID と等価の回路を Fig.3.2に示す RSJ (Resistivity Shunted Junction) 模型で表す。ループの自己インダクタンスを L とし、 2 つのジョセフソン接合は同じパラメータを持つものとす

る。接合には超伝導電流のみがながれ、臨界電流 I_0^1 と位相差 θ_i によって $I_0 \sin(\theta)$ と表される。 接合の電気容量を C とする。 R はジョセフソン接合に並列に設置され、オーミックな電流を流 すシャント抵抗に相当する。シャント抵抗はジョセフソン接合のもつヒステリシスを避けるた めに必要なものであるが、一方で熱雑音を生じる。この雑音を I_{Ni} で表す。ジョンソン雑音とす ると = $4k_BT/R$ をもつことになる。この回路に定電流(バイアス電流) I_B を流し、接合 1、2 を流れる電流を I_1 、 I_2 、ループを循環する電流を $J = (I_1 - I_2)/2$ 、ループを貫く外部磁束を Φ_{ext} 、素子の両端に生じる電圧を V とすると以下のような式がなりたつ。

$$I_1 + I_2 = I_B \tag{3.1}$$

$$\Phi = \Phi_{ext} + LJ \tag{3.2}$$

$$\frac{1}{R}V_i + C\frac{dV_i}{dt} + I_0\sin\theta_i = I_i + I_{Ni}$$
(3.3)

$$\theta_1 - \theta_2 = 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0} \tag{3.4}$$

$$V_i = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\theta_i}{dt} \tag{3.5}$$

$$V = V_i + \frac{L}{2} \frac{dI_i}{dt}$$
(3.6)

これらの式を電流、電圧、磁束、時間をそれぞれ I_0 、 I_0R 、 Φ_0 、 $\Phi_0 2\pi I_0 R$ で規格化する

$$\beta_C \frac{d^2 \theta_1}{d\tau^2} + \frac{d\theta_1}{d\tau} + \sin \theta_1 = \frac{i_B}{2} - j + i_{N1}$$
(3.7)

$$\beta_C \frac{d^2 \theta_2}{d\tau^2} + \frac{d\theta_2}{d\tau} + \sin \theta_2 = \frac{i_B}{2} + j + i_{N_2}$$
(3.8)

$$\theta_1 - \theta_2 = 2\pi(\phi_{ext} + \frac{\beta}{2}j) \tag{3.9}$$

$$v = \frac{1}{2}\left(\frac{d\theta_1}{d\tau} + \frac{d\theta_2}{d\tau}\right) \tag{3.10}$$

$$S_N = 4\Gamma \tag{3.11}$$

ここで β_C 、 Γ 、 β を以下のように与える。

$$\beta_C \equiv \frac{2\pi I_0 R^2 C}{\Phi_0} \tag{3.12}$$

$$\Gamma = \frac{2\pi k_B T}{I_0 \Phi_0} \tag{3.13}$$

$$\beta = \frac{2LI_0}{\Phi_0} \tag{3.14}$$

 1 §5.1以降実験にて求める臨界電流 I_{c} とは $I_{c} = 2I_{0}$ という関係がある

これらの式は解析的には解けず、シミュレーションによる解が示されているが、簡略化して SQUID の動作の特徴を見ることにする。式 (3.7)、式 (3.8)の解jが θ に対して多価関数となら ない、すなわち接合がヒステリシスを持たないためには $\beta_C \leq 4/\pi$ を満たす必要がある。通常こ れを満たすようにシャント抵抗は設定されているので、以下では β_c の項、すなわち接合の静電 容量に起因する項を無視して議論する。

まず、素子の超伝導臨界電流 (V = 0) を考える。簡単にするため、 L = 0、 $\beta = 0$ ($\Phi = \Phi_{ext}$ として I_N を無視すると式 (3.1)、式 (3.2)、式 (3.3) より

$$I_B = I_0(\sin\theta_1 + \sin(\theta_1 - 2\pi\frac{\Phi}{\Phi_0}))$$
(3.15)

$$= 2I_0 \cos\left(\pi \frac{\Phi_{ext}}{\Phi_0}\right) \sin\left(\theta_1 - \pi \frac{\Phi_{ext}}{\Phi_0}\right)$$
(3.16)

式 (3.16) から *I_B* の最大値 *I_{max}* は

$$I_{max} = 2I_0 |\cos(\pi \frac{\Phi_{ext}}{\Phi})| \tag{3.17}$$

式 (3.17) からわかるように、超伝導臨界電流値は SQUID のループを貫く外部磁束 (Φ_{ext}) に よって周期的に変化することがわかる。実際には自己インダクタンス L を考慮すると、 0 から $2I_0$ までの 100% の変調は受けない。変調の最大幅は $\delta I_{max} = 2I_0/(1 + \beta)$ だけ減少する。さ らに接合の対称性が悪い場合などは、もっと変調は小さくなる。

3.1.3 dc-SQUID の電流 / 電圧特性

素子の近くにコイルを巻き、そのコイルに電流を流すとき、その電流によって素子を貫く磁束を かえることができる。つまり、コイルに流す電流を SQUID によって電圧に変換することが可能 である。これは電流 / 電圧変換器の役割を果たすことに他ならない。

磁束/電圧変換係数 $(dV/d\Phi)$ はつぎのようにして大まかに評価することができる。変換率が 大きいのは $I_B \approx 2I_0(I_B: \text{SQUID}$ にかけるバイアス電流 $I_0:$ 臨界電流)とした時である。こ のとき $\Phi = 0$ と比べて $\Phi = \Phi_0/2$ では式 (??) に相当するだけの電流が常伝導電流として接合を 流れることになり、素子のインピーダンスを R/2と考えれば、磁束/電圧変換係数 $(dV/d\Phi)$ は 次の式であらわすことができる。

$$\frac{dV}{d\Phi} \approx \frac{R}{(1+\frac{1}{\beta})L} = \frac{2I_0R}{(1+\beta)\Phi_0}$$
(3.18)

電流 / 電圧変換特性は、入力コイルから SQUID への相互インダクタンス M_{input} を用いて $\Phi = I_{input} \times M_{input}$ により $dV/dI_{input} = M_{input} \times (dV/d\Phi)$ とかくことができる。

3.1.4 FLL(Flux Locked Loop) 回路

SQUID 素子の両端の電圧は外部磁場によって決まってくるので、これを適当な増幅器によって 増幅することで高感度磁気センサーとすることができる。このような使用法は周波数特性に優 れている。しかし素子は外部磁束に対して周期的な特性を持つため動作点がすこしずれただけで 増幅率は大きく変わってしまい、また入力信号が大きくなると出力は入力に比例しなくなり、つ いには折り返しが起きてしまう。このように非線形性が強いままでは測定器として実用的ではない。そこで SQUID 測定器ではフィードバックモードで用いる事が一般的である。

dc-SQUID の一般的な構成を Fig.3.3に示す。素子は入力コイルおよびフィードバックコイル と磁気的接合をしている。フィードバックコイルにはフィードバック電流とともに一定振幅の $f_m =$ 数百 kHz の変調電流が流される。素子の出力インピーダンスは低いので、トランスもしくは変 調周波数に共鳴する直列共振回路で昇圧しインピーダンス整合をとったうえで、前置増幅器と 結合させる。前置増幅器の出力は電流を参照信号としたロックイン増幅が行われ、その出力は フィードバックコイルによって SQUID 素子にフィードバックされる。



Figure 3.3: Flux Locked Loop 回路のブロック図

SQUID の FLL が通常のフィードバックループと大きく異なる点は増幅度が入力によって周期的に変わることにある。したがってフィードバックの安定点は無数に存在することなる。このためにフィードバック制御が効かないほど早くて大きなノイズが SQUID に入ると正常な動作をしなくなってしまう。つまり SQUID を FLL 回路を用いて増幅して使用する場合にはノイズ除去が非常に重要になってくる。

3.1.5 SQUID AMP

SQUID AMP とは FLL のかわりに SQUID を用いて読み出し SQUID のバイアス電流変化を増幅する時定数の速い増幅器である。 Fig.3.4よりわかる様に増幅用の SQUID として直列に複数の SQUID をならべてある。現在宇宙研と共同開発を行なっているが、本研究では用いていないので詳しいことは省略する。



Figure 3.4: SQUID AMP の概略図

3.2 動作環境

3.2.1 TES と SQUID の組み合わせ

SQUID を用いた読み出しシステムと TES カロリメータの組み合わせ模式図を Fig.3.5に示す。 SQUID 及び TES カロリメータの動作温度が異なるため、点線でそれぞれの温度域を囲ってあ る。この模式図は FLL(§3.1.4) を用いた場合の読み出しシステムを用いている。

本研究では現在開発中の目標スペック (Table.3.1) を満たした TES(Mo-Au) に利用するため に SQUID を用いた読み出し方法の開発をしている。

材質	Mo-Au
動作温度 T	0.15K
シャント抵抗 R_S	0.1Ω
熱容量 C	$4.159\times10^{-13}\mathrm{J/K}$
熱伝導度 G	$5.0 imes 10^{-9} \mathrm{J/K}$
感度 α	100

Table 3.1: 目標とする TES のスペック

このスペックの TES の最高エネルギー分解能は $\S2.2.5$ での計算から式 (2.20) と、式 (2.25)、 $\alpha = 100$ 、 n = 5 を用いて 0.6eV となり、 1eV を越える分解能を持つ事が可能であることがわ かる。



Figure 3.5: TES カロリメータと FLL 回路を用いた SQUID 読み出しシステムの模式図

またこの TES の有効時定数 τ_{eff} は式 (2.34) より

$$\tau_{eff} = \tau \frac{n}{\alpha} = \frac{C}{G} \frac{n}{\alpha} = 4.59 \mu \text{sec}$$
(3.19)

と求められる。

3.2.2 磁気遮蔽の必要性

3.2.2.1 磁気源

SQUID を利用する上で多くの場合障害になるのは環境からくる雑音である。とくに磁場の空間 変化が大切である。ここで Table.3.2に様々な環境からくる磁場について載せておく。

Table.3.2に掲載した原因以外にも様々な原因が考えられる。人間が生活している上で必要な物、例えば電車などへの送電など(都市ノイズ)に由来する原因が存在する。この様な都市ノイズには夜中使用が止まると減少するものなどがあり、日中よりも深夜の方が都市ノイズが激減する傾向がある。

Table.3.2には強磁性体 (鉄など) が作る磁場を掲載したが、常温では強磁性と考えられない物 質であっても低温にすることで強磁性や大きな磁化率を示すものがあるので低温にする部分に使 用する部品には注意を払う必要がある。たとえば真鍮には強磁性不純物を含む場合もあり、スタ イキャスト、ナイロン、テフロン、ポリエチレンなどのプラスチックには洗浄によって取り除け ない不純物が存在するという報告もある。また大きなノイズを発生させる原因でもあるグランド ループを防ぐためにもノイズ対策で常識とされる一点アース配線を行うべきである。

原因	n	M	代表的な <i>r</i>	B(T)
地球磁場	3	$1.3 \times 10^{34} \mathrm{pT cm^3}$	$6\times 10^8 {\rm cm}$	$5 imes 10^{-5}$
自動車	3	$1.5 \times 10^{14} \mathrm{pT cm}^3$	$\geq 10^3 {\rm cm}$	$1.5 imes 10^{-7}$
小型工具	3	$2 \times 10^{11} \mathrm{pTcm}^3$	$\geq 10^{1} {\rm cm}$	2×10^{-4}
トランジスターなど	3	$1.6 imes 10^7 \mathrm{pTcm}^3$	$\geq 10^{1} {\rm cm}$	1.6×10^{-8}

Table 3.2: さまざまな環境からくる磁場と、その距離依存 $(B = M/r^n)$

3.2.2.2 磁気遮蔽

ノイズ対策において一番重要なのは外部磁場を遮蔽して SQUID に入れないことである。磁気遮蔽の方法として透磁率の高い物質を利用する方法と、反磁性電流を利用する方法、超伝導体を用いる方法の3つがある。

第一の方法として、一様な磁場の中に高い透磁率 μ でできた球殻を置くと、磁力線は磁気イン ピーダンスの低い球殻部に集まり、その結果球殻内部には磁場の弱い空間ができる。球殻の外半 径 r、厚さ t、比透磁率を μ' とし、一様な外部磁界を H_{OUT} とすると、球殻内部に作られる内部 磁界 H_{IN} は次の様にあらわせる。

$$H_{IN} = \left(1 + \frac{2(\mu' - 1)^2}{9\mu'}\right) \frac{H_{OUT}}{1 - (1 - \frac{t}{r})^3} \approx \frac{Kr}{\mu' t} H_{OUT}$$
(3.20)

球状の場合には K = 32 であるが、これが無限長の円筒の軸に垂直に外部磁場が作用した場合 には K = 2 になる。またこの様な遮蔽を多重に行うことも効果的である。一般的には 10mT 以 上の外部磁場で遮蔽を行う場合には純鉄などを用い、10mT 以下の外部磁場で遮蔽を行う場合 にはパーマロイやミューメタルを用いる。また低温になるにつれて特性は悪くなる。現在では低 温にしても劣化の少ない低温用パーマロイも開発され市販されている。

第二の方法として、普通の金属に変動磁場がかかると渦電流が生じ磁場の侵入を防げる。表面 から zの深さでの磁場強度は $\exp(-z\delta)$ のように減衰する。また δ は表皮厚さと呼ばれ次の式で あらわされる。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \tag{3.21}$$

ここで、μ、σ、f は透磁率、電気伝導度、磁場の周波数である。この式 (3.21) からわかる ように、低温では電気伝導度が高くなるのが普通であるので、薄い物を用いることが可能にな る。また高周波は遮蔽しやすいこともわかる。

第三の方法として、抵抗がゼロになる超伝導を用いる事で交流磁場を遮蔽する効果がある。こ の方法を用いることで静磁場の遮蔽を行うことができる。この方法で重要になるのは磁場が臨界 磁場以下でしか利用できないことである。

3.2.3 ノイズ対策

ノイズ対策で必要な事は SQUID に外部磁場の進入を防ぐ事であるが、それ以外に SQUID からの配線に乗るノイズを減らすこともある。

低温部分の配線そのものをシールドすることで外部磁場の侵入を防ぎノイズ対策をすることが可 能である。§3.2.2.2で説明した3番目の方法を用いて、配線にシールドする。シールドする材料 ははんだからヤニを抜き出して管状にしたものを用いる。はんだは超伝導体であるので磁気遮蔽 効果がある。



Figure 3.6: はんだシールドの写真

作成方法は簡単である。太いヤニ入りはんだを 10cm 程度にカッターなどで潰さないように切断し、エタノールに1日程度漬けておく。すると、ヤニ入りはんだの中心に入っているヤニが溶け出してくる。ある程度溶け出したところで、ピアノ線などの細い金属線を用いてヤニが溶け出した部分が完全に貫通しているか確認する。このようにしてヤニを抜き出した管状のはんだに配線を通してシールドする。現実問題としてこの方法で作成する場合には 10 cm 程度以上の長さのシールドを作成することは困難であるため、それよりも長い配線にシールドする場合には複数個のシールドを通して使用することになる。Fig.3.6は本論文で実際に用いているはんだシールドの写真である。

Chapter 4

実験装置

4.1 SQUID および冷却系

4.1.1 SQUID

本実験で使用した SQUID 素子の写真を Fig.4.1に示す。 SQUID 素子は (株) セイコーインスツ ルメンツ製で、大きさは 4mm×4mm である。 SQUID 素子を配置した基板の構造と回路を Fig.4.2に 示す。 SQUID 素子の主な諸元を Table.4.1に示す¹。 AMP、 AMP-RTN および Bias、 Bias-RTN は SQUID 基板回路図 (Fig.4.3) をみればわかるように SQUID 素子の両端に配線され、 FeedBack、 FeedBack-RTN は SQUID 素子近くに配置されたフィードバックコイルに、 Input、 Input-RTN(入 力電流端子) は SQUID 近くに配置されたインプットコイルに配線されている。



Figure 4.1: 実験で用いた SQUID を配置した基板の写真 基板はガラスエポキシ製

¹1997年にセイコーインスツルメンツ社内の磁気シールド筒 (パーマロイ 2 層) 内においてインプットコイルは OPEN にして測定



Figure 4.2: 実験で用いた SQUID を配置した基板 基板はガラスエポキシ製

臨界電流	$34 \ \mu A$
フィードバックコイル相互インダクタンス	$80 \mathrm{pH}$
インプットコイル相互インダクタンス	$3.0 \mathrm{nH}$
ホワイトノイズレベル	$5.3 \mathrm{pA}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$
電流感度 [V/A]	750000

Table 4.1: セイコーインスツルメンツ社における理想的環境 (4.2K) での測定結果

SQUID 素子には SQUID ワッシャー(ジョセフソン接合を含むリング)、インプットコイル (8巻き)、フィードバックコイル(1巻き)を 0.5mm × 0.5mm のシリコンウェハ上に蒸着し てある。また SQUID 素子には素子カバーがつけてあり、 SQUID 素子に衝撃を与えて壊す事の ないようにしてある。

入力電流端子はインプットコイルに接続されていて、そこから入力した信号電流はインプットコイルを介して SQUID ワッシャーに入力する。インプットコイルと同様にフィードバックコ イルも SQUID ワッシャーと磁気的に結合している。また各端子とグランドとの間には静電気に よって破壊する事のないように 27Ωの抵抗、39000pH のコンデンサが入っている。

SQUID のジョセフソン接合に並列に 2 つ接続されているシャント抵抗 R_S には Al が用いら れ、1.2K 以上で抵抗を持つ。それぞれ約 2.8 Ω の抵抗値を持つ。このシャント抵抗は SQUID の ジョセフソン接合に過度な電圧がかかり破壊される事をさける為に入っている。また SQUID 内 にある配線は Nb が使用され、9.23K 以上で抵抗を持つ。よって SQUID を動作させる温度では SQUID 内の配線に抵抗が無く、シャント抵抗には抵抗を持たせる為に、その動作温度域は 1.2 ~ 9.23K である必要がある。本論文において SQUID のシャント抵抗は SQUID 素子の一部とし 配線図などにおいては省略する。

4.1.2 磁気シールド

§3.2.2.2においてすでに述べている様に SQUID を動作させる上で磁気遮蔽は欠かせない。本研 究では磁気遮蔽として SQUID をシールドする 2 つの方法を使用した。はじめは Nb 金属 1 層の



Figure 4.3: 本実験で用いた SQUID 基板の配線図

みで磁気遮蔽を行っていたが、さらに磁気遮蔽効率をあげる為に2層構造のシールドを仁木工芸 に作成依頼し使用した。

4.1.2.1 1層式シールド

材質は Nb で仁木工芸株式会社において溶接で一体型に形成されている。 SQUID を覆う磁気シー ルドはこれのみを用いている。

4.1.2.2 2層式シールド

1 層式シールドよりもさらによい磁気遮蔽をおこなうために Nb シールドとパーマロイシールドの2層構造にしてある。その構造の摸式図を Fig.4.4に示す。できる限り隙間を作らない為に SQUID を設置する台座 (Nb) には溝を掘り、そこに配線を通すようにしてある。

4.1.3 SQUID 用熱伝導アーム

熱伝導アームの目的はシールドに収納された SQUID を TES カロリメータ (< 100 mK) の近 くに置くと同時に、熱的には冷凍機の 1K Pot に接触させて動作条件を満たすことにある。 1K Pot とシールドとをつなぐものが、熱伝導アームである。

4.1.3.1 1層式シールド用

希釈冷凍機の1KPotに熱接触させ材質には熱伝導の良い銅を用いて熱伝導アームを通してSQUID が1KPotと同じ温度になるようにする。またSQUIDの設置場所はExperimental Plateと同 じ温度域なのでまわりと接触させないようにする必要がある。このタイプの熱伝導アームの概要 をFig.4.5に、写真をFig.4.6に示す。



Figure 4.4: 2 層式シールド概要図



Figure 4.5: 1 層式シールド用熱伝導アーム 概要図



Figure 4.6: 1 層式シールド & 熱伝導アー ム写真

4.1.3.2 2層式シールド用

2 層シールド用の熱伝導アームを作成した。1 層シールド用の熱伝導アームの時よりも熱伝導度 の良い OFC を材料に選び、また1 層シールド用熱伝導アームでは不安定だったので足を2本に して希釈冷凍機内で揺れる事の無いように設計した。この事で熱伝導アームが冷凍機の Experimental Plate に熱接触する事なく冷却に負荷を与えないようになる。 Fig.4.7に 2 層シールドと の組み合わせ概要図を示す。また実際に希釈冷凍機に組み込んだ写真を Fig.4.8に示す。

Fig.4.9に TES、 SQUID、シールド及び読み出し配線の配置図を示す。各配置温度域は TES は 0.1K、 SQUID 素子及びシールドは 1.5K である。



Figure 4.7: 2 層式シールド & 熱伝導アー



 Figure 4.8: 2 層式シールド&熱伝導アーム組み込み写真



Figure 4.9: 各パーツの希釈冷凍機内外での配置温度帯および配線図

4.1.4 希釈冷凍機

ここでは冷却装置である希釈冷凍機について述べる。 Fig.4.10は希釈冷凍機の模式図である。 SQUID は Al をシャント抵抗に用いているので Al の臨界温度 (約 1K) 以下では動作しない。その為 SQUID


Figure 4.10: 希釈冷凍機模式図

そこで SQUID は 1.5K Pot に熱的接触をするように熱伝導アームをして設置する。また TES カロリメータは Experimental Plate 上に設置した TES ホルダーに設置する。

冷却時における希釈冷凍機のダイアグラムを Fig.4.11に示す。希釈冷凍機は³He と⁴He の混 合液 (mixture)を臨界温度 0.87K 以下で³He- 濃厚層 (concentrated phase) と³He- 希薄層 (dilution phase) の2つの層に分離する。³He と⁴He では³He の方が軽いため、 concentrated phase は dilution phase の上に浮かぶ形になる。³He のエンタルピーは2つの層で異なり、³Hew を concentrated phase から dilution pahse に希釈混合する事で冷却をおこなう。この過程は mixing chamber 内でおこなわれ、最終的にこの希釈冷凍機の最低到達温度 (約 30mK) に冷却され、 mixing chamber に接触している Experimental Plate に設置した実験試料 (ここでは TES カロ リメータ) を冷却する。

またこの冷却を維持するためには mixing chamber に ³He を連続的に供給する必要があり、 dump に収容されている ³He を循環させることによって供給される。 dilution phase では ⁴He は超流動状態になっているのでわずかに含まれる ³He 原子とは全く相互作用をせず理想気体に 近い振る舞いをする。 mixing chamber を出た ³He は熱交換器 (Heat Exchangter) によって mixing chamber に戻ってきた concentrated phase の ³He を冷却しながら分溜室 (still) に向かう。

still では ³He と ⁴He の分離が行われる。 ³He が循環している間は 0.6 ~ 0.7K の温度に保た れているため、 1.5K Pot において液化されて mixing chanber に向かう暖かい ³He が熱交換器 を介して再び臨界温度以下に冷却される。また、この温度では ³He と ⁴He の蒸気圧を比較する と ³He の蒸気圧の方が 1000 倍近く大きいために循環用ロータリーポンプを用いて選択的に蒸発 させる事ができる。また ³He を選択的に蒸発させる事により、 still の中の ³He 濃度が mixing cham-



Figure 4.11: 希釈冷凍機の内部構造の摸式図

ber 内に比べて低くなる。よって浸透圧の勾配が生じ mixing chamber から still への 3 He の流 れが促進される。

循環用ロータリーポンプによって still から蒸発させられた ³He は数百 mbar に圧縮され、filter や cold trap を通過し空気や油煙などを取り除かれクライオスタットに戻ってくる。そして メインバスの液体ヘリウムによって予鈴されコンデンサーに入る。コンデンサーは 1.5K Pot 内 にあり、約 1.2K の温度によって再び気化していた ³He ガスを液化させる。 1.5K Pot は細い管 の先にあるニードルバルプを開く事によってメインバスにある液化している ⁴He を取り込む。 さらに、 1.5K Pot の減圧と still を出た ³He ガスによる冷却によって 1.5K ~ 1.9K に冷却され ている。コンデンサーを出た液体の ³He は再び熱交換器でさらに冷却されながら mixing chamber へ戻っていく。

4.2 測定システム

4.2.1 全体の構成

SQUID の評価に用いた測定システム全体の構成を Fig.4.12に示す。また SQUID に関する全体の配線図を Fig.D.1に示す。具体的な測定データは以下に述べるように、電流ー電圧 (I-V) 特性、磁束ー電圧 (Φ -V) 特性、及びノイズ特性である。 SQUID 駆動方式は、 $IV - \Phi V$ 測定回路を用

いる方式 (*I*-*V*、 Φ-*V* 測定) と、前章で述べた FLL 回路を内蔵した駆動装置を用いる方式 (ノイ ズ測定) の二つを併用した。



Figure 4.12: 測定装置接続全体図

測定の際に SQUID に接続される配線は以下の通りである。各配線の配線図は Fig.4.3に示す。

- 1. Input 用バイアス: TES(ダミー TES) へのバイアス電流を入力する
- 2. Amp:SQUID の両端に出力される電圧変化を読み出す
- 3. Bias:SQUID へのバイアス電流を入力する
- 4. FeedBack:SQUID へ磁束を入れる (FLL 回路では磁束をうち消す) ために電流を入力する

Amp、Bias、FeedBackの配線とInput用バイアス配線は、それぞれ他のものとは別のポート を利用して希釈冷凍機に入るようにしてある。これは希釈冷凍機から出た後直ちにシールドし て、測定器などの機器に接続するまでの経路で入り込むノイズを減らすためである。

4.2.2 駆動回路

I - V測定、 $\Phi - V$ 測定においては SQUID にフィードバックをかけないので、簡単な専用の 電流電圧源を用いて SQUID を駆動した ($IV - \Phi V$ 回路)。微小変化測定のため入力モニター、 出力ともにゲイン 1000 倍のアンプで増幅されるようにしてある。一方ノイズ測定、ダミー TES を含めた動作試験ではフィードバックをかけ、 SQUID ワッシャーを貫く磁束を常に一定に保っ た状態 (§3.1.4FLL 回路 参照) で動作させる必要がある。このために SQUID ヘバイアス電流 をかけ、非線形性を押さえるためのフィードバックをかける FLL 回路 (§3.1.4) を内蔵した駆動 装置としてセイコーインスツルメンツ製の「PH506S」を用いる。

「PH506S」は SQUID にかける DC バイアスを調整し、内蔵された FLL 回路によるフィー ドバックをフィードバックコイルにかけながら SQUID の出力をアンプで増幅して取り出すこと ができるユニット (Fig.4.9) で電源としては専用電池と 100V 電源の両方を使用できる。

実際に SQUID へかかるバイアス電圧、バイアス電流の絶対値を知っておくために、この駆動 装置 (PH506S) の CONTROL UNIT の SQUID ヘバイアスをかけるバイアス目盛りと出力と の関係を、電源が BATTERY UNIT(電池駆動) と POWER UNIT(電源駆動) である場合につ いて調べた。結果は



 Figure 4.13: 電池駆動時の目盛りとその出力

 力 横軸は駆動装置のバイア

 スメモリ読みとり値、縦軸は

 測定した出力電流値 [µA]



 Figure 4.14:
 電源駆動時の目盛りとその出力

 力
 横軸は駆動装置のバイアスメモリ読みとり値、縦軸は測定した出力電流値 [µA]

fig.4.13より

$$I_{battery}(\mu A) = -2.11 \times 10^{-3} + 8.945 \times 10^{-2} \times B_{scale}$$
(4.1)

$$V_{battery}(mV) = -3.18 * 10^{-3} + 1.853 * 10^{-2} \times B_{scale}$$
(4.2)

fig.4.14より

$$I_{\text{power}}(\mu A) = -2.00 * 10^{-3} + 8.955 * 10^{-2} \times B_{scale}$$
(4.3)

$$V_{\text{power}}(\text{mv}) = -4.09 * 10^{-3} + 1.852 * 10^{-2} \times B_{scale}$$
(4.4)

駆動装置のバイアス目盛りの読みを B_{scale} 、バッテリー使用時の出力電圧を $V_{Battely}$ 、出力電流 を $I_{battery}$ と書き、同様に電源使用時のそれぞれをそれぞれの V_{power} 、 I_{power} として校正を行う と式 (4.1) ~式 (4.4) と表せる。この式からわかるように、電源とバッテリーのどちらを使用し ても特に差はない。

4.2.3 I-V 測定

SQUID 素子は臨界電流 I_c 以下の電流が流れる間は両端の電位差は 0(電流状態) であるが、 I_c 以上の電流でバイアスすると電圧を生じる (電圧状態)。従って臨界電流近くにバイアスして



Figure 4.15: *I-V* 測定回路概要

おけば、外部磁束のわずかな変化が SQUID の両端に大きな電位差を引き起こすので非常に感度 の良い電流増幅器として扱うことができる。このためには電流状態と電圧状態とが最もシャー プに変化するように動作条件を設定する必要があり、それは臨界電流が最大になる時に対応し ている。Fig.4.16の左図の曲線は上から下の順に入力磁場を大きくしていった時の *I-V* 曲線を シミュレーション計算したものである。また実線が雑音を含めた場合、点線が雑音を除外した場 合の効果である。この図より、入力磁場が大きくなるにつれて臨界電流値が減っていくのがわか る。また雑音が入ることによっても臨界電流値が下がることがわかる。接合を流れる電流はバイ アス電流と雑音電流の和であるため、ノイズが存在すると接合を流れる電流が増加したことに相 当してしまい、臨界電流が減少する。従ってノイズも外部磁場も無い時が臨界電流最大となる。

このように SQUID を電流増幅器として用いる場合にその感度を決めるのが超伝導臨界電流の大きさである。これはジョセフソン接合をはさむ電位差が0の時に流れる直流電流で I_c で表す。 SQUID に流す電流 I と両端の電位差 V の関係を測定することにより、臨界電流 I_c を評価することができる。これが I-V 測定の目的である。

I-V 特性を測定する為の測定回路を Fig.4.15に示す。この測定回路からわかるとおり、 SQUID 素子の両端に変調された (30Hz) バイアス電流を流す事によって素子の両端に生じる電位差を測 定する。また、このとき Feed BackCoil に直流電流を流す事によって SQUID 素子に外部静磁場 を印可できるようにしてある。これを用いて、 SQUID が磁場をトラップした場合にそれを打ち けすことが可能である。

§?? で述べた SQUID のシャント抵抗の値を I-V 測定から求める事ができる。バイアス電流 I_B と SQUID に生じる出力電圧 V との関係は、 SQUID のシャント抵抗 (SQUID 素子と並列に入れる抵抗) を R_S とし、臨界電流 I_c よりも大きなバイアス電流 I_B を流している場合に

$$V = R_S \sqrt{I_B^2 - I_c^2} \tag{4.5}$$

と表す事ができる。また臨界電流 *I*cよりも十分大きなバイアス電流を流す場合には

$$I_B^2 - I_c^2 \approx I_B^2 \tag{4.6}$$

と近似できる事から

$$V = R_S I_B \tag{4.7}$$

と表せる。このことより十分大きなバイアス電流を流した場合に生じる電圧から SQUID の シャント抵抗を求めることができる。本実験の素子においてシャント抵抗は約 2.6Ω である。(§5 参照)



Figure 4.16: I-V 特性 (左) とフィードバックコイルの Φ -V 特性 (右) (シミュレーション)

4.2.4 **Φ-V**測定

SQUID にかかる磁束 Φ と両端の電圧 V の関係を測ることによって、電流アンプとしての感度を直接調べることができる。 Φ -V 特性を測定する為の測定回路を Fig.4.17に示す。 I-V 測定 との違いは、 SQUID を直流電流 (DC) でバイアスしておき、フィードバックコイルに流す電流 に変調をかけるという点である。これにより SQUID 素子にかかる外部磁束を変調させ、その時の SQUID の両端に生じる電圧 V を測定する。

Fig.4.16の右図の曲線は下から上の順にバイアス電流 $i(i = I_B/I_0^{\dagger})$ を大きくしていったシ ミュレーション計算の曲線であり、縦軸には出力電圧 V、横軸には外部磁束 Φ をとっている。 また実線が雑音のある場合、点線が雑音を無視した場合の効果である。 Fig.4.16の右図よりバイ アス電流 i が大きすぎる場合には磁束に対する感度がほとんどなくなり、逆に i が小さすぎる場 合には大きな磁束 Φ にしか感度を持たなくなる。また雑音が入ると全体に磁束に対する感度が

[†]*I*₀ はジョセフソン接合の臨界電流。§3.1.1 参照



Figure 4.17: Φ-V 測定回路概要

悪くなる。このことより最も良い磁束感度を持たせるためにはi = 2つまり、臨界電流 $I_c(= 2I_0)$ を SQUID にバイアスするのが良い。

SQUID にかかる入力磁束 Φ と SQUID に生じる出力電圧 V との関係は式 (3.17) を式 (4.5) に 代入し $I_B = I_c$ として計算すると

$$V \simeq V_0 |\sin(\pi \frac{\Phi_{ext}}{\Phi_0})|$$

$$V_0 = 2I_0 R_S$$

$$(4.8)$$

と表せる。
$$V_0$$
は出力電圧の振幅を表している。よって出力電圧は Φ_0 の周期を持つことがわかる。また磁束 Φ はコイルに流れる電流 I_L とコイルと SQUID 素子間の相互インダクタンス M_L を用いて次のように表せる。

$$\Phi = M_L I_L \tag{4.10}$$

 Φ -*V* カーブにおいて 1 周期の磁束変化は量子磁束 Φ_0 (= 2.0678 × 10⁻¹⁵ Wb) であり、その時 フィードバックコイルに流れる電流 *I*_L の変化は、 Φ - *V* カーブ測定時のデータから得られる。 従って、フィードバックコイルと SQUID 素子間の相互インダクタンス *M*_L は Φ - *V* カーブの 測定から求める事ができる。

4.2.5 ノイズ測定

Fig.4.18にノイズ測定時の回路図を示す。ノイズ測定では駆動装置 (PH506S) にアンプ、バイアス、フィードバック端子を配線し内蔵された FLL 回路を用いてインプットコイルに電流を流さない状態でのノイズによる出力を FFT アナライザで周波数成分に変換し読み出す。この状態ではインプットコイルに電流が流れていないはずなので SQUID 素子のジョセフソン接合を流れ



Figure 4.18: ダミー TES を用いたノイズ測定回路図

る SQUID 駆動用バイアス電流のショットノイズと配線からくるノイズを中心としたノイズが読み出される。このノイズはインプットコイルに電流を流し検出器として駆動した場合にも同じだけ出てくるノイズであることより SQUID のエネルギー分解能を推算できる。本実験で使用した素子のホワイトノイズレベルは 5.3pA/√Hz である。

ノイズ測定によって周波数成分に変換したノイズ出力から FFL 回路のフィードバックによっ て一意的に決まるカットオフ周波数も読みとることができる(本実験では約10kHz である)。こ のことより駆動装置を用いた場合における読み出しシステムの定数の算出も同時に行う事ができ る。ノイズレベルが高く、かつ FLL 回路のフィードバックが追いつかない高周波ノイズが SQUID 素子に磁束を与える場合には SQUID の動作範囲を超えてしまい出力を読みとれなくなる事も考 えられる。

性能評価の方法として SQUID のノイズに起因するエネルギー分解能を求め、組み込みを予定 している TES のエネルギー分解能と比較し、全体でのエネルギー分解能を算出し評価する。

4.2.6 ダミー TES

実際に TES を結合した動作の際には、 TES の抵抗値変化を電流変化としてインプットコイル に入力して SQUID で読み出すのだが、まずはダミーの TES として 50Ω の金属皮膜抵抗を接続 してノイズの及ぼす影響を調べた。ダミー TES は実際の TES と同様に組み込む。ノイズ測定 時の組み込み回路図 (Fig.4.18) 参照。 Fig.4.19、 Fig.4.20においてダミー TES の組み込み回路 図と実際の TES の組み込み回路図を示す。

Fig.4.19、Fig.4.20からわかるようにダミー TES 組み込み回路では TES の代わりに 50 Ω の



 Figure 4.19: ダミー TES 回路図
 金属皮

 膜抵抗を用いている。

Figure 4.20: 組み込みを目標としている TESの回路図

金属皮膜抵抗を用い、シャント抵抗として 5 Ω を用いている。シャント抵抗は実際の TES の組 み込み回路においても使用される。これは TES にかかる電圧を定電圧にして Bias からのノイ ズを減少させるためめであるがダミー TES においても同様の意図をもって組み込まれている。 またシャント抵抗を入れる事によって TES、ダミー TES ともに過電流が流れる事でインプット コイルで急激な磁束変化を生じさせないためでもある。 TES、ダミー TES の抵抗値を R_0 とし シャント抵抗を R_S とした場合に R_0/R_S は TES、ダミー TES ともに 10 であり同じ値にしてあ る。ダミー TES の R_0 が TES の抵抗値に比べて大きいのはインプットコイルに流れる電流値を 小さくし SQUID に負荷をかけて壊す事の無いようにするための安全策である。

現在開発中で、カロリメータとして使用する目標となっている TES のスペックを用いてダミー TES とのノイズの比較シュミレーションを行った。ダミー TES のノイズはジョンソンノイズに よる熱雑音であるので

$$\text{NEP}_{\text{Dummy}}^2 = \frac{4k_B T}{R} \tag{4.11}$$

と表せる。ここで $R = 50\Omega$ であり、その動作温度は 0.1 K とする事から $1.104 \text{A}^2/\text{Hz}$ と求められる。

また実際の TES のノイズを $\S3.2.1$ にある数値を使用して $\S2.2.4$ で述べた NEP_{cal} を計算して、 先ほど求めたダミー TES のノイズとともにグラフに描画して比較をおこなった。

Fig.4.21より、このダミー TES は実際の TES に比べて約1桁ノイズレベルが低い事がわかる。 よってこれを用いて、バイアス電流値を変化させる事で TES が抵抗変化を起こしているように SQUID へ電流変化を伝える事で、実際の TES よりもノイズの面において容易に信号検出のシ ミュレーションが行えると考えられる。



Figure 4.21: TES のノイズレベルとダミー TES のノイズレベルのシュミレーション

Chapter 5

SQUID の性能評価

5.1 入力電流端子を短絡させた SQUID の動作

本実験ではまず SQUID の素子自身の基本特性、 SQUID としての動作、そのノイズレベルなど を外部からの影響の最も少なくなるような条件で評価した。このために SQUID の入力電流端子 をシールド内部にて短絡させ入力から入るノイズをできる限り小さくし、 SQUID の基本動作確 認及び入力以外からのノイズによる出力のノイズレベル測定を行った。

5.1.1 測定条件

- 1. §4の 4.9にあるように SQUID 素子を 1K Pot に熱的に接続した
- 2. 入力端子をマンガニン線で短絡 (1Ω)
- 3.1 層式シールド使用

5.1.2 電流 / 電圧 (I-V) 特性

まず SQUID バイアスに 45 μ A の振幅を持つ交流電流 (Fig.5.1) を入れるたときの I-V グラフを Fig.5.2に示す。 -45μ A ~ 45μ A のバイアス電流 × R^* を X 軸、 SQUID 素子の両端に生じる電 圧差を Y 軸にとってある。また同様に、 SQUID バイアスに 150 μ A の振幅を持つ交流電流をい れた場合の I - V カーブを Fig.5.3に示す。どちらの場合にも SQUID シールド内部に残留する る磁束をうち消し、 SQUID ループを貫く磁束を 0 にするためにフィードバックコイルに 6 μ A の 直流電流を流している。どちらのデータも Average 100[†]で記録してある。

Fig.5.2の測定で、入力バイアス電流を $45(\pm 3\%)\mu$ A の振幅 (周波数 30Hz) でふったときの電 圧変化 V_{p-p} は 928mV であった。よって

$$R_{AC} = \frac{928 \text{mV}}{90 \mu \text{A}} \sim 10.3 \pm 0.3 [\text{k}\Omega]$$
(5.1)

である。 V_{p-p} の測定誤差は $\sim 0.06\%$ 以下であることから I-V 測定回路の出力電流誤差 3% 分が大きく寄与し使用した抵抗値 ($10k\Omega$ の金属皮膜抵抗)と誤差内で一致している。また出力

 $^{^*}R$ は IV- Φ V 駆動回路に組み込まれた電圧変換抵抗。 $10 \mathrm{k}\Omega$ の金属皮膜抵抗

[†]100 個のデータの平均値



Figure 5.1: I-V 測定時にバイアスに入力する電流 振幅 45µA 周波数 30Hz



Figure 5.2: Input 短 絡 時 の I-V 測 定動作温度 1.7K SQUID バイ アス 45µA

Figure 5.3: Input 短 絡 時 の I-V 測定 動作温度 1.7K 横軸は 振幅が 150µA の SQUID バイ アス。縦軸は Gain のかかる前 の出力電圧

電圧が0である範囲 (SQUID のジョセフソン接合が電流状態)の V_{p-p} は 596mV と読みとれる ことから臨界電流は

$$2I_c \times R_{AC} = 596 [\text{mV}]$$

(5.2)

となり、 $I_c = 28.9 \pm 0.9 \mu$ A と求められる。臨界電流の誤差は測定回路の誤差と読みだしに用 いたオシロスコープの誤差 (~ 0.06%)の重ね合わせであることから、 3.05% と考えられる。こ の値は使用した SQUID の標準的な値と比較すると予想よりも小さい値である。これは配線など から来るノイズの影響があるためと思われる。また、 Fig.5.3は横軸を入力バイアス電流値に変 換し、縦軸を 1000 倍の Gain がかかる前の値、つまり Fig.5.2と同じスケールになおしてプロッ トした。この Fig.5.3で入力電流が臨界電流 I_c より十分大きな電流で流れている部分について一 次関数でフィットした。この領域の I-V カーブの傾きは式 (4.7) で示すようにシャント抵抗によ るものである。ジョセフソン接合が並列に2つ入っている事から、接合1つあたりのシャント抵抗はフィットした線の傾き $(1.276 \frac{\text{mV}}{\mu \text{A}})$ より、 $R_S = 2.55 \pm 0.08\Omega$ と求められる。シャント抵抗の誤差は臨界電流の誤差と同様に考えられることからこのシャント抵抗の値は SQUID 素子のスペックと良くあっている。また I-V カーブの形、特に電流状態から電圧状態への変化のシャープさオフセットなど点で SQUID の基本特性がよく出ていることから、ほぼ満足できる特性が得られたと言える。

5.1.3 磁束 / 電圧 (Φ-V) 特性

フィードバックコイルに入力する交流電流の値を X 軸にとり、そのときの出力電圧を Y 軸にとっ た $\Phi-V$ カーブを Fig.5.4に示す。入力電流 *I* によって外部磁束 Φ_{ext} を SQUID 素子にかけてい るために周期的な変化を示している。この周期が磁束量子 Φ_0 (= 2.0678 × 10⁻¹⁵Wb) である。 Fig.4.16(右) に示したシミュレーションと同様に $I_B < I_c$ の範囲においては大きな磁束にしか感 度を持たない半整流のようなカーブになり、逆に $I_B > I_c$ の範囲においてはシャント抵抗に電流 がながれるために出力電圧は増えるものの、変調幅が減少していく。つまり I_0 付近で V/ Φ の傾 きが最大になることがわかる。この傾きは磁束変化に対する出力電圧の変化を表していて、つま りは SQUID の感度を示している事に他ならない。この傾きが大きいほど感度の良い SQUID と いえる。つまり臨界電流値付近において最大感度を持つことがこのグラフより読みとれる。



Figure 5.4: Input 短 絡 時 の Φ-V 特性 @1.7K AVG100 入 力電流振幅:40[μA]



Figure 5.5: Input 短絡時のΦ-V 特性 @1.7K AVG100 入力電流 振幅:40[μA] SQUID バイア ス:I_c X軸をΦ₀を単位とし た。

Fig.5.4から読みとることのできる出力電圧の周期は $28.68[\mu A]$ であることよりフィードバッ クコイルと SQUID 素子との相互インダクタンス M_{fw} は

$$M_{fw} = \frac{\Phi_0}{28.73\mu\text{A}} = 72.0 \pm 2.2[\text{pH}]$$
(5.3)

となる。この誤差も臨界電流の誤差と同様に 3.05% と考えられる。ノイズの多い測定ではあるがセイコーインスツルメンツ社の測定結果 80pH にほぼ近く測定方法としては正しいと考え

られる。ただし周囲の配線による測定値のずれについては後節で考察する。 SQUID とフィード バックコイルの相互インダクタンスと、 I-V 測定時に得られた残留磁束を打ち消すための電流値 から残留磁束を計算すると $(47.1\pm2.0) \times 10^{-17}$ Wb である。残留磁束の測定誤差はフィードバッ クコイルに流した定電流の誤差と先ほど求めた相互インダクタンスの誤差の重ね合わせになる ので 4.28% と計算される。また Fig.5.5は、 X 軸のフィードバックコイルへの入力電流を 1 周期 が Φ_0 である事から磁束に変換して Φ_0 を単位として表し、 $\Phi_0/4$ 付近において直線でフィット した。この傾きは SQUID 素子の磁束電圧変換のゲイン $[V/\Phi_0]$ である。これより SQUID ルー プを貫く磁束と出力のゲインは

$$\frac{V_{out}}{\Phi} = \frac{47.14 \times 10^{-3}}{\Phi_0} = \frac{47.14 \times 10^{-3}}{2.0678 \times 10^{-15}} = (23.6 \pm 4.5) \times 10^{12} [V/Wb]$$
(5.4)

と求まる。ゲインの誤差は電流の読みだし誤差と電圧の読みだし誤差、ソウゴインダクタンスの読みだし誤差の重ね合わせであるので 3.06% と考える。 Table.4.1にあるインプットコイルの相互インダクタンス 3.0nH を用いて、インプットコイルに電流を流した場合の SQUID 素子のみの検出感度を求めると

$$\frac{V}{I_{input}} = \frac{V}{\Phi_0} \times 3\mathrm{nH} = (70.7 \pm 2.2) \times 10^3 \mathrm{[V/A]}$$
(5.5)

と求めることができる。これが SQUID 素子の持つ入力電流に対する SQUID のゲインである。

5.1.4 ノイズ測定

ノイズレベルの測定を行った。この測定の設定ではインプットコイルをマンガニン線で短絡して いるので、ここから SQUID への磁束の進入は考えられない。つまり FLL 回路で増幅され FFT アナライザで読み出されるノイズは SQUID 素子の持つショットノイズと、配線からくるノイズ、 磁気シールドで遮蔽しきれない磁束変化によるものと考えられる。ただし FLL 回路を用いてい るので静磁場 (地磁気など) はフィードバックにより打ち消され出力には影響しない。

バイアスが最適動作状態のノイズスペクトルを Fig.5.6~ Fig.5.11に示す。またそれぞれのグラフにおいて、10000[Hz] 付近にできる山と高周波でのカットオフの構造は、フィードバックフィルターの持つ特性で、特性がフラットである 1024Hz の値を用いてノイズレベル i_n を評価する。 カットオフ周波数は 1024[Hz] におけるノイズの $1/\sqrt{2}$ 倍 (図における点線) になる周波数とする。 FLL 回路を電源駆動とした場合 (Fig.5.6) よりも電池駆動 (Fig.5.7) の方がノイズが低減すること、また動作温度が低いほうがノイズレベルが低いことがはっきりとわかる。

5.1.5 まとめ

測定結果を Table.5.1に示す。



Figure 5.6: Input 短 絡 時 の ノイズ 測 定 1.7K Bias:34.2µA 電源駆動時 1024Hz におけるノイズレベル は 28.5pA/√Hz





Figure 5.7: Input 短絡時のノイ ズ測定 1.7K バッテリー駆動時 Bias:34.2µA 1024Hz における ノイズレベルは 23 5pA / √田z



Figure 5.8: Input 短絡時のノイズ測定 2K Bias:34.2µA 1024Hz における ノイズレベルは 29.8pA/√Hz

Figure 5.9: Input 短絡時のノイズ測定 2.6 ~ 2.8K バッテリー使用時 Bias:34.2µA 1024Hz における ノイズレベルは 25.8pA/√Hz

まず、SQUID の動作温度を上げると臨界電流値が小さくなっていく傾向がある。また温度が 上がるにつれ動作が安定しなくなり、 5.6K ではほとんど測定にはならなかった。これらの結果 より、この SQUID 素子を安定動作させるには2 K 以下であることが望ましい。またシャント 抵抗値は測定温度によらずほぼ一定の値を示した。またノイズレベルは、電池駆動の方が電源駆 動に比べて低いことから、電源経由でグラウンドノイズが入っていると思われる。しかし実際の 駆動を考える場合には、使用した電池の減りが早く長時間の測定において安定した動作を望めな いことから、今後は電源駆動を中心に測定を行うこととした。







Figure 5.11: Input 短 絡 時 の ノ イ ズ 測定 5.6K バッテリー使用時 Bias:334.2µA 1024Hz におけ る ノ イ ズ レ ベ ル は 28.4pA/√Hz

(5.6)

T[K]	$I_c[\mu A]$	$R_S[\Omega]$	$M_{fw}[\text{pH}]$	$i_n[\mathrm{pA}/\sqrt{\mathrm{Hz}}]$	カットオフ周波数 [Hz]
1.7 (電源駆動)	$28.9{\pm}0.9$	2.55 ± 0.08	$72.0{\pm}2.2$	$28.5 {\pm} 6.1$	12544
1.7 (電池駆動)	$28.9{\pm}0.9$	$2.55{\pm}0.08$	$72.0{\pm}2.2$	$23.5 {\pm} 4.5$	12800
2	$9.4{\pm}0.3$	$2.55{\pm}0.08$	$72.0{\pm}2.2$	29.8 ± 3.5	11904
2.7	$9.2{\pm}0.3$	$2.55{\pm}0.08$	$72.0{\pm}2.2$	$25.8 {\pm} 3.0$	12800
5.6 (測定器が発熱)	×	2.55 ± 0.08	$78.3 {\pm} 2.4$	×	×
5.6 (測定器が通常温度)	×	2.55 ± 0.08	78.3 ± 2.4	28.4 ± 3.4	5888

Table 5.1: Input 短絡時 測定結果

5.1.5.1 エネルギー分解能

TES カロリメータのエネルギー分解能 ΔE_{cal} が 0.6eV である場合に、読み出しシステムを含め たエネルギー分解能を 1eV 以下にするような SQUID のエネルギー分解能 ΔE_{SQUID} は

$$\Delta E_{SOUUD} = \sqrt{1^2 - 0.6^2} = 0.8 \text{eV}$$

と 0.8 eV 以下であれば良いと求められる。そこで SQUID の測定値の中で最もノイズレベル i_n pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の低い値と Table.3.1、§2.2.5の式 (2.22)、後述の式 (6.2) を用いて SQUID のエネル ギー分解能を推算してみると

$$\Delta E_{SQUID} = 2.35 R_0 I i_n \sqrt{\tau_{SQUID}} = 0.05 \text{eV}$$
(5.7)

T:	測定温度
$I_c[\mu A]$:	臨界電流
$R_S[\Omega]$:	シャント抵抗
$M_{fw}[pH]$:	フィードバックコイルと SQUID ワッシャーの相互インダクタンス
$i_n[pA/\sqrt{Hz}]$:	ノイズレベル

と求められる。目標としている SQUID のエネルギー分解能 0.8eV よりも十分良いことがわ かる。このノイズレベルであれば十分測定に足りる分解能が得られるはずである。またこの時点 での全体のエネルギー分解能を求めると

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_{SQUID}^2 + \Delta E_{cal}^2} = 0.602 \text{eV}$$
(5.8)

となり、このノイズレベルで駆動することができるならばカロリメータとには SQUID のノイ ズは問題にならないことがわかる。

5.2 ダミー TES を組み込んだ SQUID の動作

5.2.1 測定条件

次に TES が結合された場合に近い電気的環境において SQUID の性能を評価するために、ダミー TES を用いた実験をおこなった。§4.2.6に述べたダミー TES を配線して Experimental Plate 上 に配置する事でインプットコイルへの配線をシールド外へ出す。ただし、ダミー TES へのバイ アス配線はせず、 Experimental Plate 上でバイアスは OPEN (浮いている状態)にする。この 事でインプットコイルに TES 相当がつながった場合の出力ノイズを測定する。この時点でノイ ズレベルを低くできないとダミー TES へのバイアスを希釈冷凍機外部へ配線し入力電流端子へ 信号入力をする事はできない。また前節の実験からの変更として配線ノイズを減らす為にフェラ イト[‡]を使用している。

- 1. 入力電流端子にダミー TES(§4.20 参照) として 50 、シャント抵抗として 5 を配線
- 2. 入力電流端子からダミー TES までの配線には半田シールドを使用。
- 3. 測定時温度:1.4K(1K POT)
- 4. Experimental Plate の温度は 0.1K
- 5. 駆動回路: 電源使用
- 6. FFT アナライザの電源は駆動装置とは別の電源からトランスを介して取った
- 7. フィッシャーコネクタの $port4^{\$}$ が open だったのでグランドに落した。
- 8. フェライトを駆動装置の電源、ヘッドアンプ[¶]への配線、電源、希釈冷凍機用ニードルバ ルブへの配線に付けた。

5.2.2 電流 / 電圧 (I-V) 特性

SQUID シールド内部に残留する磁束をうち消し、 SQUID ループを貫く磁束を 0 にするために フィードバックコイルに 5.34 μ A の直流電流を流している。

^{*}強磁性体であるフェライトコアに配線を貫通させる構造。高周波ノイズを熱に変換し吸収する[12]

[§]希釈冷凍機内部配線を外部へ出すためのコネクタ。未使用

[¶]駆動装置とSQUID との間におくアンプ





Figure 5.12:ダミーTES 配線した I-V 測定 (TESバイアス引き出さず)SQUID動作温度:1.4KSQUID バイアス:83.5µA横軸はゲインがかかった入力電圧、縦軸はゲインがかかった出力電圧

Figure 5.13: ダ ミー TES 配 線 し た I-V 測定 動作温度 1.4K 横 軸は振幅が 200µA の SQUID バイアス。縦軸はゲインのか かった出力電圧

Fig.5.12より、入力バイアスを 83.5±3% μ A の振幅 (周波数 30Hz) でふったときの電圧変化 V_{p-p} は 1656mV である。よって

$$R_{AC} = \frac{1656 \mathrm{mV}}{167 \mu \mathrm{A}} \sim 9.91 \pm 0.3 [\mathrm{k}\Omega]$$

(5.9)

であり、出力電圧が0である範囲の V_{p-p} は712mVと読みとれることから臨界電流は

 $2I_c \times R_{AC} = 712 [\text{mV}]$

(5.10)

となり、 $I_c = 35.9 \pm 1.1 \mu$ A と求められる。この値は $\S5.1$ におけるインプット短絡時の結果 と比べて大きいが、SQUID としては標準的な値であり、フィルター等によって改良したと考え られる。また、Fig.5.2.2において、入力電流が求めた臨界電流 I_c より十分大きな電流で流れて いる部分についてフィットを行った。これよりシャント抵抗はフィットした線の傾き (1.273) よ り、 $R_S = 2.55 \pm 0.08\Omega$ と求められる。これらの結果は前回の実験とほぼ一致している。

5.2.3 磁束 / 電圧 (Φ-V) 特性

Fig.5.14より $-1.2I_0$ 付近で傾きが最大になることがわかる。また Fig.5.14から読みとること のできる出力電圧の周期は $28.73\mu A$ であることよりフィードバックと SQUID との相互インダ クタンス M_{fw} は

$$M_{fw} = \frac{\Phi_0}{28.73[\mu A]} = 72.0 \pm 2.2[pH]$$
(5.11)

となる。この結果を用いて、残留磁束を計算すると $(42.7 \pm 1.8) \times 10^{-17}$ Wb を得られる。また Fig.5.15は前セクションと同様にして、 $\Phi_0/4$ 付近において直線でフィットしたものである。これより SQUID ループを貫く磁束と出力のゲインは

$$\frac{V_{out}}{\Phi} = \frac{89.56 \times 10^{-3}}{\Phi_0} = \frac{89.56 \times 10^{-3}}{2.0678 \times 10^{-15}} = 43.3 \times 10^{12} [V/Wb]$$
(5.12)



Figure 5.14: ダ ミー TES を 配 線 し た (TES バイアス引き出さず)Φ-V 特性 @1.4K AVG100 入力 電流振幅:75[μA]



Figure 5.15: ダ ミー TES を 配 線 した (TES バイアス引き出さ ず)Φ-V 特性 @1.4K AVG100 入力電流振幅:75[μA]SQUID バイアス:-1.245I_c X 軸を Φ₀ を単位した。

と求まる。 Table.4.1にあるインプットコイルの相互インダクタンス 3.0nH を用いてインプットコイルに流した場合の SQUID 素子のみの電流感度を求めると

$$\frac{V}{I_{input}} = \frac{V}{\Phi_0} \times 3\mathrm{nH} = (129.9 \pm 4.0) \times 10^3 [\mathrm{V/A}]$$
(5.13)

と求めることができ、いずれも前回の実験結果と比較しても2倍近く感度が上がっていること がわかる。これはフェライトなどの配線ノイズ軽減策および Port4 をグラウンドに落とした効果 が、その原因と考えられる。

5.2.4 ノイズ測定

Fig.5.16は SQUID の駆動電流を変えた時の 1024Hz でのノイズレベルをプロットしたもので ある。最もノイズの抑えられているのは駆動電流が 465[DIV] に対応する時であり、これを変換 式 (4.3) を用いてバイアス電流値に変換すると

$$I_{power} = 41.639[\mu A] = 1.017I_c \tag{5.14}$$

となる。このときの *I_{power}* は駆動回路を電源で使用した場合を意味している。 Fig.5.17および Fig.5.18はこの最適なバイアス電流値での測定である。ノイズとしては前回の 1/3 という低い 値を得られている。

5.2.5 まとめ

ダミー TES を入力電流端子に配線しバイアスは引き出さない場合の測定結果を Table.5.2にしめ す。§5.1の結果 Table.5.1と比較して臨界電流 I_c が大きくなり、逆に 1024Hz におけるノイズレ ベル i_n が大幅に減少した。インプットコイルにはダミー TES の新しい配線がつながっていて、



Figure 5.16: ダミー TES を配線し、そのバイアスを引き出さない場合におけ るノイズレベルの駆動バイアス依存@1024Hz

多少のノイズがインプットコイルに流れ込むことはあっても、これがノイズを減少させていると は考えにくい。したがって各測定装置の電源からくるノイズをフェライトを用いることで減少さ せると同時に各装置のシャーシアースを一点接地した事が大きな要因であると思われる。それを 示すように§5.1の測定と比較して臨界電流値が大幅に向上したことがあげられる。また希釈冷凍 機の未使用ポートのコネクタが前回の測定において剥き出しであったのをアルミ箔でシールドし てグラウンドに落としたことで希釈冷凍機内部への外部磁束の侵入を抑えることできたと思われ る。

T[K]	$I_c[\mu A]$	$R_S[\Omega]$	$M_{fw}[pH]$	$i_n[\mathrm{pA}/\sqrt{\mathrm{Hz}}]$	カットオフ周波数 [Hz]
1.4	$35.9{\pm}1.1$	$2.55{\pm}0.08$	$72.0{\pm}2.2$	$8.4{\pm}1.1$	10364

Table 5.2: ダミー TES 配線 (TES バイアスは OPEN) 測定結果

T:	測定温度
$I_c[\mu A]$:	臨界電流
$R_S[\Omega]$:	シャント抵抗
$M_{fw}[pH]$:	フィードバックコイルと SQUID ワッシャーの相互インダクタンス
$i_n[\mathrm{pA}/\sqrt{\mathrm{Hz}}]$:	ノイズレベル



Noise Level [hAll]

Figure 5.17: ダミー TES 配線 (TES バイ アスは OPEN)1.4K、バイア ス 42.639 µA ノイズレベル 8.4±1.1pA/√Hz @1024Hz

Figure 5.18: ダミー TES 配線 (TES バイ アスは OPEN) 時のノイズス ペクトル 1.4K、バイアス 42.639µA ~ 100Hz

5.2.5.1 エネルギー分解能

Table.3.1を用いて SQUID のエネルギー分解能を算出してみると

$$\Delta E_{SQUID} = 2.35 R_0 I i_n \sqrt{\tau_{SQUID}} = 0.02 \text{eV}$$
(5.15)

と求められる。目標としている SQUID のエネルギー分解能よりも十分良いことがわかる。ま た前回の実験時よりもノイズレベルが減少しており、このノイズレベルであれば十分測定に足り る分解能が得られるはずである。またこの時点での全体のエネルギー分解能を§5.1.5.1 と同様に して求めると

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_{SQUID}^2 + \Delta E_{cal}^2} = 0.6003 \text{eV}$$
(5.16)

となる。

5.3 ダミー TES のバイアスを引き出した SQUID の動作

入力電流端子はダミー TES に配線してあり、ダミー TES にかけるバイアス電流用の両端は SQUID の出力配線とは別のコネクタを用いて希釈冷凍機外部へ引き出されている。ダミー TES のバイ アスを希釈冷凍機外へ引き出すことで出力に影響するノイズを測定する。ダミー TES のバイア スに信号を入力してインプットコイルへ電力変化を入力するための設定でもある。また駆動装置 の電源からくるノイズ成分を減少させるために FFT アナライザの電源を別の場所からトランス を介してとる。この事で多少のノイズ軽減が期待される。 5.3.1 測定条件

§5.2と主に異なる条件を以下に示す。

- 1. 測定時温度:2K(1K POT)
- 2. ダミー TES にかけるバイアスを希釈冷凍機外部へ引き出し。
- 3. 全ての未使用コネクタを冷却前からグラウンドへ落とした。
- 5.3.2 電流 / 電圧 (I-V) 特性

SQUID シールド内部に残留するる磁束をうち消し,SQUID ループを貫く磁束を0にするために フィードバックコイルに 142µA の直流電流を流している。



Figure 5.19: ダミー TES(バイアス引 き出し) 配線時 I-V 測定 @ 1.7K AC:83.5µA

Figure 5.20: ダ ミー TES(バイアス引 き出し) 配線時 I-V 測定 @ 1.7K AC:110µA

fig.5.19より、入力バイアスを 83.5μ A の振幅 (周波数 30Hz) でふったときの電圧変化 V_{p-p} は 1672mV である。よって

$$R_{AC} = \frac{1672 \text{mV}}{167\mu\text{A}} \sim 10.0 \pm 0.3 [\text{k}\Omega]$$
(5.17)

であり、出力電圧が0である範囲の V_{p-p} は624mVと読みとれることから臨界電流は

$$2I_c \times R_{AC} = 624 \text{mV} \tag{5.18}$$

となり、 $I_c = 31.2 \pm 1.0 \mu$ A と求められる。また、Fig.5.20において、入力電流が求めた臨界 電流 I_c より十分大きな電流で流れている部分についてフィットした。これよりシャント抵抗は フィットした線の傾き (1.33)より、 $R_S = 2.66 \pm 0.08\Omega$ と求められる。これらの値は§5.2の値 に近い結果である。



Figure 5.21: 入 力 電 流 端 子 に ダ ミー TES(バイアス引き出し) 配線時の -V 特性 @1.9K AVG100 AC:83.5[µA]



Figure 5.22: 入力電流端子にダミー TES(バイアス引き出し)配線時の -V特性 @1.9K AVG100 AC:83.5[μA] SQUID バイア ス:1.049*I*_c X軸をΦ₀を単位した。

5.3.3 SQUID 素子の磁束 / 電圧 (Φ-V) 特性

Fig.5.21より 1.0 I_0 付近で最大感度を持つことがこのグラフより読みとれる。しかし今までの 実験結果と比べて全体的に Φ – V カーブが Flat で感度が悪いことがわかる。また Fig.5.21から 読みとることのできる出力電圧の周期は 26.76 μ A であることよりフィードバックと SQUID と の相互インダクタンス M_{fw} は

$$M_{fw} = \frac{\Phi_0}{26.76[\mu \text{A}]} = 77.3 \pm 2.4[\text{pH}]$$
(5.19)

となる。この結果から残留磁束を計算すると $(1138\pm48.7)\times10^{-17}$ Wb を得られる。また Fig.5.22で前セクション同様のフィットを行なうと SQUID ループを貫く磁束と出力のゲインは

$$\frac{V_{out}}{\Phi} = \frac{6.14 \times 10^{-3}}{\Phi_0} = \frac{6.14 \times 10^{-3}}{2.0678 \times 10^{-15}} = 2.97 \times 10^{12} [\text{V/wb}]$$
(5.20)

と求まる。 Table.4.1にあるインプットコイルの相互インダクタンス 3.0nH を用いてインプットコイルに流した場合の SQUID 素子のみの電流感度を求めると

$$\frac{V}{I_{input}} = \frac{V}{\Phi_0} \frac{1}{3\mathrm{nH}} = (8.9 \pm 0.3) \times 10^3 \mathrm{[V/A]}$$
(5.21)

となる。このゲインは§5.2の実験結果と比較して、約1/5に低下してしまっている。恐らくダ ミー TES のバイアスを引き出したことでインプットコイルに入るノイズ又は、SQUID シール ド内部の残留磁束が大きく影響していると考えられる。

5.3.4 ノイズ測定

今回、入力電流端子に配線したダミー TES のバイアス用配線を希釈冷凍機の外へ出した実験で は、ノイズレベルが高くなりすぎ、そのために測定可能レベルを超えてしまった。これは配線を 通しての外来ノイズの進入が主な原因と考えられる。また、希釈冷凍機の使用していない Port の遮蔽およびグラウンドへの接続が完全でなかったが、このために磁場が進入し、冷却中にシー ルド内部へ磁場をトラップしてしまった可能性も考えられる。

5.3.5 まとめ

ゲインが低く、ノイズも極めて高い実験結果になった。得られた結果を Table.5.3にまとめて示 す。測定時の温度が高いが、臨界電流値が§5.1の測定温度 2K の場合の結果と比較しても十分良 いことから、温度による影響は多くないと考えられる。

T[K]	$I_c[\mu A]$	$R_S[\Omega]$	$M_{fw}[pH]$	$i_n[\mathrm{pA}/\sqrt{\mathrm{Hz}}]$	カットオフ周波数 [Hz]
2	$31.2{\pm}1.0$	$2.66{\pm}0.08$	77.3 ± 2.4	×	×

Table 5.3: ダミー TES バイアス引出し時 測定結果

T:	測定温度
$I_c[\mu A]$:	臨界電流
$R_{S}[\Omega]$:	シャント抵抗
$M_{fw}[pH]$:	フィードバックコイルと SQUID ワッシャーの相互インダクタンス
$i_n[\mathrm{pA}/\sqrt{\mathrm{Hz}}]$:	ノイズレベル

5.4 2 層式シールドを用いた SQUID の動作 (バイアスを引き出さない ダミー TES 使用)

SQUID を磁気ノイズから強力に遮蔽する2層式シールド(§4.1.2.2 仁木工芸製)を組み込んだ。 このシールドを用いる事で SQUID ループにかかる磁気ノイズの軽減が期待される。また§5.3に おいてダミー TES のバイアスを希釈冷凍機外部へ引き出したところ、測定レベルを超えるノイ ズが入力してしまった事を考慮してグラウンドループの改善をおこなった。

5.4.1 測定条件

グラウンドループに起因するノイズを減少させるために配線を改良した。希釈冷凍機につい ている温度計、配管から AVS の電源を通り配電盤へ、 SQUID の配線から測定装置をとおり配 電盤への2点でグラウンド設置されていることがわかる。 SQUID の配線には配線のシールドも 含まれている。配線のシールドは SQUID の磁気シールドである Nb シールドと導通があるため に両方のグラウンドへ落ちていることになる。また配電盤において2つのグラウンドは導通があ る。

1.2層式シールド使用



Figure 5.23: 測定環境グラウンド配線図

- 2. 入力電流端子にダミー TES を配線
- 3. ダミー TES のバイアスは希釈冷凍機外へ出さずに Experimental Plate にて OPEN
- 4. **測定時温度**:1.93K(1K POT)
- 5. Experimental Plate 温度: 1.9K



Figure 5.24: Nb 製 SQUID 台 座 に SQUID 基板を載せた写真



Figure 5.25: Nb 製 SQUID 台 座 に SQUID 基板を載せ配線し た写真

2 層式 SQUID シールドを使用し、入力電流端子はダミー TES に配線してあり、ダミー TES にかけるバイアス電流用の両端は OPEN にして Experimental Plate 上に設置されている。た

だし、ダミー TES 用配線と同様の簡易ノイズ測定用配線を希釈冷凍機内部から出してある。 Fig.5.26か らもわかるように、簡易ノイズ測定配線の先には 5 の抵抗が配線されており SQUID のインプッ トコイルに関係なく、配線がもつノイズレベルの測定ができるようにしてある。



Figure 5.26: ダミー TES のバイアス引き出し用配線回路図 希釈冷凍機内部



Figure 5.27: ダミー TES のバイアス引き出し用配線回路図希釈冷凍機外部

希釈冷凍機から外へ出るコネクタ (フィッシャーコネクタ) 内部に 10 MHz 以上の高周波をカットするローパスフィルターとして π 型 EMI(ElectroMagnetic Interference)Filter を内蔵させた (Fig.5.27)。またフィッシャーコネクタから先はツイストシールド線を用いている。

5.4.2 電流 / 電圧 (I-V) 特性

SQUID シールド内部に残留する磁束をうち消し、SQUID ループを貫く磁束を0にするために フィードバックコイルに流す直流電流値は0µA であった。このことより内部に残留している磁 束はほぼ無いと思われる。



Figure 5.28: 2 層 式 シー ル ド を

用いたダミー TES(バイアス

OPEN) 配線時 I-V 測定 @

1.9K AC:50[µA] 横軸はゲイ

ンがかかった入力電圧、縦軸

はゲインがかかった出力電圧



Figure 5.29: **2** 層 式 シール を用いたダミー TES(バイア ス OPEN) 配線時 I-V 測定 @ 1.9K 横軸は振幅が 150μA の SQUID バイアス。縦軸は ゲインのかかった出力電圧

fig.5.28より、入力バイアスを 50µA の振幅 (周波数 30Hz) でふったときの電圧変化 V_{p-p} は 10646mV である。よって

$$R_{AC} = \frac{1064 \text{mV}}{100 \mu \text{A}} \sim 10.6 \pm 0.3 [\text{k}\Omega]$$
(5.22)

であり、出力電圧が0である範囲の V_{p-p} は776mVと読みとれることから臨界電流は

 $2I_c \times R_{AC} = 776 \text{mV}$

(5.23)

ド

となり、 $I_c = 36.5 \pm 1.1 \mu A$ と求められる。また、Fig. 5.29において、入力電流が求めた臨界 電流 *I*c より十分大きな電流で流れている部分についてフィットを行った。これよりシャント抵 抗はフィットした線の傾き (1.375) より、 $R_S = 2.75 \pm 0.08\Omega$ と求められる。

SQUID 素子の磁束 / 電圧 (Φ-V) 特性 5.4.3

Fig.5.30より 1.03I₀ 付近で SQUID の感度を示している。また出力電圧の周期は 26.4[µA] であることよりフィードバックと SQUID との相互インダクタンス M_{fw} は

$$M_{fw} = \frac{\Phi_0}{26.4[\mu A]} = 78.3 \pm 2.4[pH] \tag{5.24}$$

となる。また Fig.5.31より SQUID ループを貫く磁束と出力のゲインは

$$\frac{V_{out}}{\Phi} = \frac{151.73 \times 10^{-3}}{\Phi_0} = \frac{151.73 \times 10^{-3}}{2.0678 \times 10^{-15}} = 73.38 \times 10^{12} [V/Wb]$$
(5.25)

と求まる。 Table.4.1にあるインプットコイルの相互インダクタンス 3.0nH を用いてインプッ トコイルに流した場合の SQUID 素子のみの電流感度を求めると

$$\frac{V}{I_{input}} = \frac{V}{\Phi_0} \times 3\mathrm{nH} = (220.1 \pm 6.7) \times 10^3 \mathrm{[V/A]}$$
(5.26)

と求めることができる。ゲインとしては、これまでで最も高い値が得られたことがわかる。



Figure 5.32: ダミー TES 配線 (TES バイアスは OPEN)時のノイズレベル **のバイアス依存@1024Hz**



Figure 5.31: ダ ミー TES を 配 線 し た (TES バイアス引き出さず)Φ-V 特性 @1.7K AVG100 入力 電流振幅:75[µA] SQUID バイアス:1.03*I*_c X 軸を Φ₀ を単位とした。

配線時

-V 測定

୭

1.9K

AVG100 AC:74[μ A]







63

$$I_{power}(\mu A) = -2.00 \times 10^{-3} + 8.995 \times 10^{-2} \times B \tag{5.27}$$

$$I_{power} = 39.846[\mu A] = 1.023I_c \tag{5.28}$$

このときの I_{power} は駆動回路を電源で使用した場合を意味している。 5.33におけるグラフ はこの最適なバイアス電流値での測定である。このときノイズレベルは 15.7 ± 2.3 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ とな り§5.2の実験に次ぐ低い値となった。



Figure 5.33:] 2 層式シールドを用いたダミー TES(バイ ア ス OPEN) 配 線 時 ノ イ ズスペクトル 1.9K、バイアス 39.8 [µA] 17.5pA/ Hz @1024Hz 128 ~ 51K[Hz]

Figure 5.34:] 2 層式シールドを用いたダミー TES(バイ ア ス OPEN) 配 線 時 ノ イ ズ スペクトル 1.9K、バイアス 39.8 µA ~ 100K[Hz]

5.4.4 まとめ

§5.2の実験と比較してダミー TES を配線したのは同じであるが、今回の場合には希釈冷凍機外 ヘダミー TES のバイアスを引き出すための配線をおこなっている。ただし、 Experimental Plate 上で結線されていない。にも関わらずゲインが高く、これまでの実験のなかで一番良かった§5.2の 2 倍近い値が出ている。これは、グラウンドの配線を改良した事と2 層式シールドで SQUID を シールドしたことが原因であると考えられる。得られた結果を Table.5.4に示す。しかし、2 層 式シールドを1 K ポットに熱接触させる熱伝導アームの影響で Experimental Plate が 1K ポッ トと熱接触を起こしてしまい目的の 0.1K まで冷却することができなかった。今後 TES を組み 込む事を考え改良する必要がある。

T[K]	$I_c[\mu A]$	$R_S[\Omega]$	$M_{fw}[pH]$	$i_n[\mathrm{pA}/\sqrt{\mathrm{Hz}}]$	カットオフ周波数 [Hz]
1.93	$36.5 {\pm} 1.1$	$2.75{\pm}0.08$	78.3 ± 2.4	17.5 ± 2.3	11776

Table 5.4: 2 層シールドを用いたダミー TES 配線 (TES バイアスは OPEN) 時測定結果

T:	測定温度
$I_C[\mu A]$:	臨界電流
$R_S[\Omega]$:	シャント抵抗
$M_{fw}[pH]$:	フィードバックコイルと SQUID ワッシャーの相互インダクタンス
$i_n[\mathrm{pA}/\sqrt{\mathrm{Hz}}]$:	ノイズレベル

5.4.4.1 エネルギー分解能

§5.1.5.1 と同様にして SQUID のエネルギー分解能を算出してみると

$$\Delta E_{SQUID} = 2.35 R_0 I i_n \sqrt{\tau_{SQUID}} = 0.04 \text{eV}$$
(5.29)

と求められる。またこの時点での全体のエネルギー分解能を求めると

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_{SOUID}^2 + \Delta E_{cal}^2} = 0.601 \text{eV}$$
(5.30)

と求められる。

5.5 実験全体の考察

5.5.1 ノイズの原因

まず SQUID 信号のノイズとして考えられるものの侵入経路および与える影響を次にまとめた。

- SQUID 固有のノイズ: SQUID を極低温 $(k_BT < eV)$ の範囲で動作させる場合にはジョセフソン接合を流れる電流のショットノイズが主要なノイズとして現れてくる。これは SQUIDの構造を変える以外下げることはできない。
- 入力電流端子からのノイズ: 入力電流端子に入る電流性ノイズはインプットコイルで磁束ノ イズへと変換され SQUID へ入力される。入力電流端子の先を伸ばすとノイズが乗りやす くなる。このノイズが大きくなると、 SQUID の動作範囲の磁束変化 (Φ₀/2) を超える変 化が素子に瞬間的に与えられ測定不能になる。ただし、入力電流端子をシールド内部で短 絡させると、ノイズ成分は抑えられ大きく影響してこない。また入力電流端子にダミー TES を配線し、そのバイアスを希釈冷凍機外部へ引き出しグラウンドに落とす場合、もしくは 入力電流を流す場合にはグラウンドからくるノイズが SQUID に磁束変化として入ってし まうのでグラウンドからのノイズ成分も注意する必要がある。
- 配線からのノイズ: 出力、入力ともに配線に乗るノイズ。配線をツイストシールド線にする こと、極低温では超伝導線を用いることで軽減することができる。また環境から来るノイ ズも乗りやすく測定時間帯によって大きく変化する。経験的に深夜で近くで他の実験を行っ ていない状態がよいと思われる。
- グラウンドからのノイズ: グラウンドループや同じグラウンドを取っている測定機器からの ノイズ。同じグラウンドを取る全ての配線にのるノイズであり影響も大きい。グラウンド ループの改善やグラウンドの取り方でノイズ量が大きく変化する。

磁気ノイズ: 磁気シールドを冷却する段階で、磁気シールド内部にトラップされる静磁場と磁 気シールドを透過してのる動磁場から来るノイズ。静磁場ノイズは駆動装置で SQUID を 駆動する場合には、フィードバックコイルの磁束で打ち消される。また I-V 測定において フィードバックコイルに直流電流を流すことで静磁場を打ち消すことができ、その時の電 流値から静磁場の磁束を求めることもできる。

5.5.2 結果全体のまとめ

本章で行なった全実験の測定条件を以下に、その結果を Table.5.5にまとめて示す。

- §5.1の測定条件
 - SQUID シールドは1層
 - 入力電流端子をシールド内で短絡
 - 駆動装置は電池駆動
- §5.2の測定条件
 - SQUID シールドは1層
 - 入力電流端子にダミー TES を配線し Experimental Plate に設置
 - ダミー TES バイアスは Experimental Plate 上で OPEN
 - 駆動装置は電源駆動
 - ノイズ対策としてフェライトを使用
 - 未使用コネクタの Port4 をグラウンドへ落とした
- §5.3の測定条件
 - SQUID シールドは1層
 - 入力電流端子にダミー TES を配線し Experimental Plate(E/P) に設置
 - ダミー TES バイアスを希釈冷凍機の外へ専用ポートを用いて配線
 - 全ての未使用コネクタを冷却前からグラウンドへ落とした
- §5.4の測定条件
 - SQUID シールドに2層式シールドを使用
 - 入力電流端子にダミー TES を配線し Experimental Plate に設置
 - ダミー TES バイアスは Experimental Plate 上で OPEN
 - ダミー TES バイアス用の配線と同じものを 5Ω で短絡させ、 E/P から引き出してある。
 - グラウンド配線の改善

測定条件	$\S{5.1}$	$\S{5.2}$	$\S5.3$	$\S{5.4}$
T[K]	1.7	1.4	2	1.9
$R_S[\Omega]$	$2.55{\pm}0.08$	$2.55{\pm}0.08$	$2.66{\pm}0.08$	$2.75{\pm}0.08$
$I_c[\mu \mathrm{A}]$	$28.9{\pm}0.9$	$35.9{\pm}1.1$	$31.2{\pm}1.0$	$36.5{\pm}1.1$
Gain $\times (10^3)$ [V/A]	$70.7{\pm}2.2$	$129.9{\pm}4.0$	$8.9{\pm}0.3$	$220.1{\pm}6.7$
$M_{fw}[pH]$	$72.0{\pm}2.2$	$72.0{\pm}2.2$	77.3 ± 2.4	$78.3 {\pm} 2.4$
$i_n [\mathrm{pA}/\sqrt{\mathrm{Hz}}]$	$23.5{\pm}4.5$	$8.4{\pm}1.1$	×	$17.5{\pm}2.3$
カットオフ周波数 [Hz]	12800	10364	×	11776
ΔE_{SQUID} [eV]	0.05	0.02	×	0.04
残留磁束 (10 ⁻¹⁷)[Wb]	$47.1 {\pm} 2.0$	42.7 ± 1.8	$1138 {\pm} 48.7$	$0{\pm}0.02$

Table 5.5: 各測定条件での測定結果

T[K]:	測定温度
$I_c[\mu A]$:	臨界電流
$R_S[\Omega]$:	シャント抵抗
$M_{fw}[pH]$:	フィードバックコイルと SQUID ワッシャーの相互インダクタンス
$i_n [pA/\sqrt{Hz}]$:	ノイズレベル
カットオフ周波数 [Hz]:	ノイズスペクトルで $i_n/\sqrt{2}[{ m pA}/\sqrt{{ m Hz}}]$ になる周波数
Φ_{ext} [Wb]:	${}^{M}{}_{fw}$ を用いて求めた $_{ m SQUID}$ 素子にかかっている静磁場
Gain[V/A]:	sQUID 素子の電流電圧変換係数
ΔE_{SQUID} [eV] :	SQUID 読み出しシステムのエネルギー分解能

5.5.3 考察

Table.5.5にまとめた結果について、測定誤差を考慮し考察をおこなう

• シャント抵抗 *R*_S について……

シャント抵抗は素子の内部にあるため温度依存性をのぞいて一定のはずである。この抵抗 値は3.05%の誤差が見積もられているが各測定にの誤差は8%であった。これは配線の 引きまわし等に起因する誤差が含まれているものと考えられるが、ほぼ一定の値を得るこ とができた。このことから臨界電流 *I*_cの精度もこれと同等程度であると考えられる。

● 臨界電流 *I_c* について……

SQUID の性能として常に一定の値を持つべきではあるが、実際の測定においては 20 % 程 度の差が生じている。この原因として SQUID のリングを流れる電流性ノイズや磁束の影 響が考えられる。既に磁束の影響で臨界電流値を小さくしてしまうことがシミュレーショ ンなどから知られている。Fig.4.16の左図にあるように SQUID リングにある磁束を与え ると臨界電流値は小さくなっていく。しかし I-V 測定ではフィードバックコイルに電流を 流すことで SQUID にかかっている静磁場は打ち消している。つまりインプットコイルが 短絡されシールド内部に存在している状況 (§5.1の条件) ではインプットコイルからの磁束 ノイズの侵入は無いと考えられる。このことより、フィードバックコイルに流している電 流のノイズと、シールドそのものを侵入してくる外部磁場、そして SQUID から引き出し ているアンプ、バイアス、フィードバックなどの配線を介して侵入してくる磁束が考えら れる。またグラウンドなどの配線を改善しノイズを乗りにくくし、かつ2層式シールドを 用いて測定を行った§5.4の測定結果を見ると臨界電流値はセイコーインスツルメンツ社が 行った測定でのスペック値 34μ A に十分等しく、シールド内部の静磁場が0 であることか ら、§5.4で行ったノイズ対策によって配線からくるノイズは十分に落とせていると思われ る。また Table.5.1より、臨界電流が動作温度を上げることで急激に減少している。これ は SQUID 固有のノイズであるショットノイズと SQUID 回路中のジョンソンノイズに起 因するノイズだけではなく温度が安定しなかったことにも原因があると思われる。 SQUID の動作温度としてこの素子の場合には希釈冷凍機の1 K ポット温度が安定する 2K 以下で シャント抵抗の Al が超伝導にならないよう 1K 以上であることが望ましい。

• SQUID のゲイン [V/A] について.....

SQUID としてゲインー定であることが望ましいが、実際は SQUID 素子にかけるバイア ス電流値、ノイズレベル、残留磁束などによって影響を受ける。本章でおこなった実験結 果から§5.4において最大感度を示している。これはノイズレベルが十分低く、かつ残留磁 束が0であった事に起因していると思われる。§5.2の測定において残留磁束を FLL 回路に よって打ち消された状態のノイズレベルは、本章の実験の中で最も低い値を出しているが、 残留磁束の量は§5.1の測定時よりも大きい。この残留磁束がゲインの低下を引き起こして いるのではないかと思われる。

フィードバックコイルと SQUID の相互インダクタンス M_{fw} について.....
 §5.3を境にインダクタンスが異なるのは測定誤差とは考えにくい。外部からフィードバックコイルへの配線からの磁束の影響が SQUID 素子に入っているのではないかと思われる。§5.3以降セイコーインスツルメンツ社のスペック値とほぼ同じ値になったのは、全ての希釈冷凍機内部より配線されているコネクタを冷却前からグラウンドへ落とした事により、 SQUIDシールドが超伝導状態になり磁気シールドになる瞬間に入り込む磁束を大幅に減らせたことも影響していると思われる。

• ノイズレベルについて.....

数多くの測定より、その測定誤差は 10% 以下であと考えられる。 $\S5.1$ 、 $\S5.2$ を比較してみ ると、入力電流端子を Experimental Plate 上まで引き出すだけであれば、ノイズレベル には影響が無いと思われる。§5.2で、入力電流端子を引き出したにもかかわらずノイズレ ベルが劇的に減少しているのは、測定用 FFT アナライザの電源をトランスを介してとっ たことと同時に、各電源部分及び信号線にフェライトを用いた事が効いていると思われる。 つまり SQUID に起因するノイズよりも、 SQUID 素子からの電圧読み出し配線、駆動装 置内配線、 FFT アナライザまでの配線がノイズに寄与しているのではないかと思われる。 これの対処法としては
§5.4でおこなったグラウンド
配線の改善で
ノイズレベルの減少が
見 込まれる。事実、§5.4においては Experimental Plate から直接インプットコイルに接続 はされていないが、ダミー TES のバイアス用に使用する配線を Experimental Plate 上ま で配線してある。当然この配線から希釈冷凍機、しいては SQUID シールド内部ヘノイズ が侵入すると思われるのだが、十分測定可能なノイズレベルで収まっている。このことよ り、今後バイアス線を引き出す場合にはこの§5.4で使用した測定環境を用いることでノイ ズレベルや信号入力が可能になると思われる。セイコーインスツルメンツ社におけるイン プットコイルを短絡して得られたホワイトノイズは $5.3 \mathrm{pA}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ である。実際の駆動にお いてはインプットコイルの配線を希釈冷凍機の外へ引き出す必要があるため、ホワイトノ イズと同じレベルのノイズは実現できないと考えるが、§5.2の実験と比較して、§5.4の実

験においては入力電流端子からの配線を室温にまで引き出している事を考えると、現在の ノイズレベルよりもさらなるノイズを軽減することが可能であると思われる。

- カットオフ周波数について……
 もほぼ測定から10kHzと読み取ることができる。これがSQUIDの動作から来るものではなくノイズ測定で使用した駆動回路に含まれるFLL回路の特性であるためである。この駆動回路を用いて測定している限りカットオフ周波数の逆数で表される読み出しシステムの時定数は速めることができない。
- エネルギー分解能について.....

現時点で求められているエネルギー分解能は 1eV の検出器を開発するという目的を達成す る事が十分可能な値を出している。ただし、この計算において TES の時定数に SQUID が 追いついているとしているが、実際には 2 桁も SQUID の時定数は遅い。今後ともエネル ギー分解能に効いてくる SQUID のノイズレベルとカットオフ周波数の改善が望まれる。 カットオフ周波数は全ての測定において 10kHz というほぼ共通の値が出てきている。こ れはノイズ測定で使用した FLL 回路の特性である。 SQUID 自身の限界としては GHz ま で動作させることが可能である。つまり SQUID AMP に置き換えることで 10kHz という カットオフ周波数を高くすることも可能である。また、 SQUID 自身の干渉等によるノイ ズレベルの改善をすることがエネルギー分解能を良くする重要な方法である。







Figure 5.36: 各実験における Φ-V 測定 横 軸は Φ₀ を単位とした磁束 縦 軸は出力電圧 [mV]

Fig.5.35は本章でおこなった I-V 測定の結果を、1つのグラフにまとめたものである。横軸は SQUID にかけるバイアス電流値、縦軸は、そのときの出力電圧である。Fig.5.35においてシャ ント抵抗 R_S を表す臨界電流 I₀ より十分おおきなバイアス電流をかけた範囲の傾きは、どの測 定においてもほぼ一致していることがわかる。このことより各測定が正しく行なわれているこ とを示している。しかし左側 (負のバイアスをかけた部分)の電圧状態から電流状態への変化に おいて右側 (正のバイアスをかけた部分)ほど一致しない。このことが各測定において臨界電流 が多少異なる理由である。この現象はジョセフソン接合の非対称性からくるものと考えられる。 [16] Fig.5.37の (d) のグラフが一番近い形を示していることより、本実験で使用した SQUID 素 子のジョセフソン接合それぞれの臨界電流値に違いが存在するのでは無いかと考えられる。 Fig.5.36は本章で行なった Φ – V 測定の結果を 1 つのグラフにまとめたものである。横軸は フィードバックコイルが SQUID に与える磁束を磁束量子 Φ₀ を単位としたものであり、縦軸は そのときの出力電圧である。このグラフから多少の位相差が存在することがわかる。これは残留 磁束によるものであると考えられる。Fig.5.36における Section4 は入力磁束が 0 の場合に出力 もほぼ最低になっていることがわかる。これは§5.4の実験において残留磁束が 0 であったことと 等価であるといえる。つまり残留磁束が 0 もしくは Φ₀ の整数倍の値をもつようにしなくてはな らない。しかし どの測定結果においても、理論上はサインカープを描くはずであるのに、ここ では右側にゆがんでいる。これは Fig.5.37と比較して、 (i) のグラフに近い現象であると思われ る。これはシャント抵抗の特性が揃っていないことを示している。

現段階では誤差範囲以上の改善が見られているが、今後現在の誤差範囲よりも細かいレベルで 改善を行う場合には誤差の中心を占めている I-V 測定用駆動回路の定電流出力の精度を上げるな どの改変が必要になってくると思われる。



Figure 5.37: 特性の揃っていないジョセフソン接合における SQUID の特性 [16] (a,d,g)I-V 特性、 (c,f,i)Φ - V 特性 $I_{012} = (1 \pm \alpha)I_0$, $R_{S12} = R_S/(1 \pm \rho), L = (1 \pm \eta)L/2$

Chapter 6

TES との結合に関する考察

6.1 SQUID と TES の動作範囲

-V 測定におけるグラフからわかるように SQUID は入力電流を磁束に変換させて読み出す。 FLL 回路によって常にフィードバックがかかり動作点からずれる事は無いのだが、FLL 回路の フィードバックがかかるよりも十分速い信号が入力されたときに、その磁束変化がある一定以上 に大きくなると増幅率に折り返しが来てしまう。そこで折り返しのこない範囲で電流変化を調整 する必要がある。 -V グラフから磁束が $\Phi_0/4$ の点を動作点とし磁束変化幅が $\Phi_0/4$ 以下であ れば折り返しには入らず測定が可能になることがわかる。このことより入力電流の変化幅 ΔI は 次の式で求められる

$$\Delta I < \frac{\Phi_0}{4} \frac{1}{M_{iw}} \tag{6.1}$$

ここで M_{iw} はインプットコイル相互インダクタンスであり、Table.4.1から $M_{iw} = 3.0$ nHまた $\Phi_0 = 2.067 \times 10^{-15}$ wbを用いて求めると

$$\Delta I < 0.167 \times 10^{-6} [A] \tag{6.2}$$

と求める事ができる。つまりインプットコイルに流れる電流変化が ΔI 以下であるなら SQUID が正常に動作する事ができる。

このことより TES に掛けるバイアス電流値は次のようにして求める事ができる。 Fig.2.3より インプットコイルに流れる電流 *I* は

$$I = \frac{R_S}{R + R_S} I_B \tag{6.3}$$

と表せる。ここで I_B は Fig.2.3における Bias 電流である。よって ΔI は

$$\Delta I = -\frac{R_S}{(R+R_S)^2} I_B \Delta R \tag{6.4}$$

と求められる。 ΔR は TES の X 線入射による温度上昇からくる抵抗値変化である。定常状態からの狭い線型近似の可能な温度範囲において α を定数とみなして

$$R = R_0 T^{\alpha} \tag{6.5}$$
と表せる事を用いて ΔR は

$$\Delta R = R \frac{\Delta T}{T} \alpha \tag{6.6}$$

と表せるので、 ΔI は

$$\Delta I = -\frac{R_S R}{(R+R_S)^2} I_B \frac{\Delta T}{T} \alpha \tag{6.7}$$

$$\Delta I = -\frac{R_S R}{(R+R_S)^2} I_B \frac{1}{T} \alpha \frac{E}{C}$$
(6.8)

と表せる。この式 (6.8) と式 (6.2) から *I_B* のとれる範囲は入射エネルギーが 10KeV の場合で は Table.3.1を用いて

$$|\Delta I| = 2.1 \times 10^{-3} I_B < 0.167 \times 10^{-6} [A]$$
(6.9)

と求められる。よって *I_B* の範囲は

$$I_B < 79.5\mu A \tag{6.10}$$

となる。同様に22KeVの入射エネルギーの場合には

$$I_B < 36\mu A \tag{6.11}$$

6KeV の場合には

$$I_B < 131\mu A \tag{6.12}$$

と計算する事ができる。

6.1.1 エネルギー分解能

SQUID のエネルギー分解能は

$$\Delta E = 2.35 R I i_n \sqrt{\tau_{SQUID}} \tag{6.13}$$

で求めることができる。ここに式 (6.2) と Table.5.5における§5.4のノイズレベル i_n 、 Table.3.1に おけるカロリメータの動作抵抗 R を用いて

$$\Delta E = 0.37 \text{eV} \tag{6.14}$$

と求める事ができる。また TES のエネルギー分解能は $\S2.2.5$ での計算から式 (2.20) と、式 (2.25)、 $\alpha = 100$ 、 n = 5を用いて 0.6eV と求めることができたので読み出しシステムを含めたエネル ギー分解能は

$$\Delta E = \sqrt{0.37^2 + 0.6^2} = 0.7 \text{eV} \tag{6.15}$$

と求められ、1eV を満たすエネルギー分解能がこの読み出しシステムとTES を用いて理論上 実現可能であることが求められる。

6.1.2 パルス

Table.5.5から駆動回路を用いた測定では 10KHz でカットオフがかかる事がわかる。これは FLL 回路の特性である。このことより駆動回路を用いた読み出しシステムの時定数 τ_{SQUID} は 100 μ sec に一意的に決められてしまう。また式 (3.19) で求めた TES カロリメータの有効時定数 τ_{eff} に 比べて 2 桁悪いことより読み出しシステムがローパスフィルターの役割を果たしてしまう。そこ で入力 i(0) に対する出力を i(t)、パルスの時定数を τ_{eff} 、読み出し系の時定数を τ_{SQUID} とす ると周波数成分が式 (6.17) で表されるパルスがローパスフィルタに入る。

$$i(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty i(0) e^{-(i\omega + \frac{1}{\tau_{eff}})t} dt$$
(6.16)

$$i(\omega) = \frac{i(0)}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{i\omega + \frac{1}{\tau_{eff}}}$$
(6.17)

これを時間空間に戻すと

$$i(t) = \frac{i(0)}{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{i\omega + \frac{1}{\tau_{eff}}} \frac{1}{1 + iw\tau_{SQUID}} e^{iwt} d\omega$$
(6.18)

$$i(t) = \frac{i(0)}{\frac{\tau_{SQUID}}{\tau_{eff}} - 1} \left(e^{-\frac{t}{\tau_{SQUID}}} - e^{-\frac{t}{\tau_{eff}}} \right)$$
(6.19)

よってこれを微分すると読み出しシステムを通ったパルスのピークを与える時間 *t_{peak}* が求まる。

$$t_{peak} = \frac{\ln \frac{\tau_{SQUID}}{\tau_{eff}}}{\frac{1}{\tau_{eff}} - \frac{1}{\tau_{SQUID}}}$$
(6.20)

ここに $\tau_{eff} = 4.59 \mu \text{sec}$ 、 $\tau_{SQUID} = 100 \mu \text{sec}$ を代入してピークになる時間を求めると

$$t_{peak} = 15.4[\mu \text{sec}] \tag{6.21}$$

と求められる。また式(6.19)に今求まった t_{peak} を代入するとパルスハイトが求められる。よって求めると

$$i(t_{peal}) = 0.04 \times i(0)$$
 (6.22)

パルスハイトは SQUID の時定数が TES カロリメータの時定数に比べて遅ければ遅いほど悪 くなる事が式 (6.19) からわかる。このことより読み出し側の時定数を速くする事で Gain をあげ る事ができるとわかる。 6.1.3 SQUID の読み出し電圧

式 (6.2) より、 SQUID の読み出し電圧幅 ΔV_{OUT} は駆動回路は 750000[V/A] の入力感度を持つ ので

$$\Delta V_{OUT} = 0.167 \times 10^{-6} \times 750000 = 125 \times 10^{-3} \tag{6.23}$$

と求める事ができる。つまり駆動回路を用いた場合の SQUID の出力は最大 125mV までであ る事がわかる。しかし式 (6.22) で求めたように実際には SQUID の時定数が TES カロリメータ の時定数と比べて十分遅いためにパルスハイトが減少してしまう。これを考慮した駆動装置の入 力感度は 30000[V/A] だと考えられる。よってこの駆動回路を用いて出力される推定の出力電圧 *V_{OUT}* は 5mV となる。

また SQUID の持つノイズ成分が出力に与える影響は i_n を 10 kHz まで周波数積分した電流変 化量 I_n をもちいて

 $V_n = 30000 \times I_n \tag{6.24}$

と与えられる事より、 $\S5.4$ のノイズを用いて求めると 46μ Vとなる。 次に駆動回路を用いず SQUID のみで読み出した場合の出力電力を求める。

Fig.6.1は§5.4における -V 特性の最大感度である $1.03I_c$ のバイアスをかけたデータを横軸 Φ_0 にして $0 \sim \Phi_0/2$ の範囲で最小二乗法を用いて Fitting したデータを加えたものである。



Figure 6.1: 横軸は入力磁束 Φ_0 縦軸は出力 [mV]

ここで 0 ~ $\Phi_0/2$ の範囲で Fitting した線 $V_{OUT} = 147.56\Phi + 0.53$ の傾きより

$$\frac{V_{OUT}}{\Phi} = 0.148\tag{6.25}$$

となる事がわかる。これよりインプットコイルの相互インダクタンス 3.0nH を用いて Gain を 求めると

$$\frac{V_{OUT}}{I} = \frac{0.148 \times 3.0 \times 10^{-9}}{2.067 \times 10^{-15}} = 0.215 \times 10^6 \tag{6.26}$$

と Gain が求められる。つまり SQUID 素子のみの Gain は 215000[V/A] であることが求められる。この Gain より

 $\Delta V_{OUT} = 0.167 \times 10^{-6} \times 215000 = 35.9 \times 10^{-3} \tag{6.27}$

よって SQUID 素子のみで出力を読み出すと最大 35.9[mV] の出力が見える事になる。しかし SQUID 素子のみでは動作が安定せず、安定して動作点におくことが難しい。

Chapter 7

まとめ

7.1 本実験における問題点

現時点でインプットコイルに配線されたダミー TES のバイアスを希釈冷凍機外部へ引き出す 事でインプットコイルに大量のノイズ流入がある。§5.4においてダミー TES バイアスを引き出 すシールド線を作りノイズの軽減が確認されたが実際にインプットコイルへ入力を入れての測定 には至っていない。

また2層式シールドを利用するにあたり専用の熱伝導アームを作成したが、この熱伝導アーム が原因となり E/P への熱流入がおこり E/P が希釈冷凍機の冷却能力を著しく悪くしていると思 われる。これにより TES を配置した場合のその動作温度である 0.1K までの冷却が現在できな い状態である。

Fig.5.23からわかるように希釈冷凍機の配管によるグラウンドループが起きている。これは配 管をつないでいるクランクを絶縁体で電導の無い物を利用する事で改善できる。

SQUID 素子のジョセフソン接合の特性が揃っていないことが I-V 測定、 $\Phi - V$ 測定より判明した。この特性のずれの補正をおこなう必要がある。

現時点でのノイズレベルは TES の信号読み出しに十分なレベルにすることができたが、読み 出しシステムに用いている FLL 回路の時定数が TES の時定数に比べ遅い。

- 7.2 今後の課題
 - 現時点でのノイズレベルはホワイトノイズレベルと比較してみて3倍程高い。このノイズ を軽減をおこなう。
 - 現時点ではインプットコイルに信号入力をしていない為、この読み出しシステムの実際の ゲインを求められていない。今後、ダミー TES のバイアスにテストパルスを入力し出力 の測定をおこないゲインを求め、計算値との比較をおこなう。またパルスの立ち上がり時 間 t_{peak}、そのパルスハイトを周波数別に測定し計算値との比較をおこなう。
 - 読み出しシステムの時定数 *T_{SQUID}* が TES カロリメータの時定数 *T_{eff}* と比較して1桁違う。これでは信号読み出しはできない。駆動装置を用いた読み出しシステムの時定数 *T_{SQUID}* を下げるために SQUID AMP の利用を考える。

希釈冷凍機内に TES カロリメータと X 線源を入れて実際の X 線信号の読み出しを行うこと が現状の FLL 回路を用いた駆動装置を利用しては時定数の遅さが原因で TES の速い信号に対し て追いつかないことが判明した。今後は SQUID-AMP を用いた方法を検討するべきである。

Appendix A

誤差計算

ここでは各測定についている誤差について述べる。ここでは誤差の基本公式である式 (A.2) を用いている。 σ は誤差を表す。

$$a = b^r \times c^s \tag{A.1}$$

であるならばaの誤差である σa は

$$\left(\frac{\sigma a}{a}\right)^2 = r^2 \left(\frac{\sigma b}{b}\right)^2 + s^2 \left(\frac{\sigma c}{c}\right)^2 \tag{A.2}$$

また使用したオシロスコープ (TDC420) の誤差は 0.06% であり、 I-V、 $\Phi - V$ で使用した駆動回路に入っている R_{AC} の誤差は 3% である。

A.1 I-V、 $\Phi - V$ 測定

まず臨界電流の誤差を求める。臨界電流は

$$2 \times I_c = \frac{V}{R_{AC}} \tag{A.3}$$

であることから、各誤差を重ね合わせて求めると

$$\left(\frac{\sigma I_c}{I_c}\right) = \sqrt{(0.06\%)^2 + (3\%)^2} = 3.05\% \tag{A.4}$$

同様にしてシャント抵抗 R_{AC} の誤差は

$$\left(\frac{\sigma_{R_{AC}}}{R_{AC}}\right) = \sqrt{(0.06\%)^2 + (3\%)^2} = 3.05\% \tag{A.5}$$

またフィードバックコイルと SQUID ループとの相互インダクタンスは

$$M_{fw} = \frac{\Phi}{I} \tag{A.6}$$

より同様にして求めると

$$\frac{\sigma M_{fw}}{M_{fw}} = \sqrt{(\frac{\sigma \Phi}{\Phi})^2 + (\frac{\sigma I}{I})^2} = 3.05\%$$
(A.7)

臨界電流值 I_c	3.05%
回路内抵抗 R_{AC}	3%
シャント抵抗 R_s	3.05%
相互インダクタンス M_{fw}	3.05%
内部磁束 Φ	4.28%
$\Phi-V$ 測定時ゲイン	3.06%

Table A.1: 各測定誤差

I-V 測定でフィードバックコイルに流した電流 I から求められる SQUID シールド内部の内部 磁束はフィードバックコイルと SQUID ループとの相互インダクタンスを用いて

$$\Phi = I \times M_{fw} \tag{A.8}$$

と表せる事から、内部磁束の誤差はフィードバックコイルと SQUID ループとの相互インダク タンスの誤差の式 (A.7)を用いて

$$\left(\frac{\sigma\Phi}{\Phi}\right) = \sqrt{(3)^2 + (3.05)^2} = 4.28\%$$
 (A.9)

と求められる。 $\Phi - V$ 測定時におけるゲインの誤差は

$$Gain = \frac{V}{I \times M_{fw}} \tag{A.10}$$

より

$$\left(\frac{\sigma Gain}{Gain} = \sqrt{(0.06)^2 + (0.06)^2 + (3.05)^2} = 3.06\%\right)$$
(A.11)

と求められる。これらの計算で求められた各測定誤差をTable.A.1にまとめる。

A.2 ノイズ測定

ノイズ測定における誤差は各測定におけるデータのふらつき幅をもって誤差幅とする。

htb

Appendix B

TES と SQUID の結合の為の予備実験

B.1 RuO₂ 温度計

B.1.1 キャリブレーション方法

RuO₂を宇宙研の希釈冷凍機によってゆっくりと冷却しそのときの温度と抵抗値を測定する。重要となるのは M/C の温度を用いて測定しているので、 RuO₂ の温度との熱平衡状態に無いと温度に誤差が出てくる。つまり熱平衡状態になるために十分ゆっくりとした温度変化で冷却をおこない抵抗値を測定する。また温度上昇時にも同様に測定を行い、熱平衡状態にならないほど早い 温度変化の場合は除外してキャリブレーションを行う。

B.1.2 結果

- Smothing 10
- $1 < T_{M/C} < 2$, $\Delta T_{M/C} < 0.1$
- $T_{M/C} < 0.1$, $\Delta T_{M/C} < 4$
- $T_{M/C} < 1$, $\Delta T_{M/C} < 0.4$
- $T_{M/C} < 10$, $\Delta T_{M/C} < 0.04$

Smothing 10 とはデータを 10 づつまとめてスムージングを掛けた事を意味する。また $T_{M/C}$ とは mixing chamber の温度を意味している。つまり 1 < $T_{M/C}$ < 2, $\Delta T_{M/C}$ < 0.1 とは mixing chamber の温度が 1K ~ 2K の範囲では温度変化 $\Delta T_{M/C}$ が 0.1K 以下であるデータのみを取り出す事である。上記の条件でデータを取り出して Fitting したものが Fig B.1である.。また Fig B.2は Fitting した曲線と実際に測定したデータのずれを%で表示した物である。

B.1.3 精度

Fig B.2よりこの条件で作成したこの Fitting Carve は1%までの誤差を持つ事がわかる。これ は十分な測定精度を持つものと言える。

$$T = \frac{1}{\{0.34173654 \times (\ln R)^2 + 0.384280222 \times \ln R + 0.284764531\}^2}$$
(B.1)

B.1.4 道川キャリブレーションとの比較

98年に同じ温度計を用いてキャリブレーションを道川*さんが行っている。式 B.2がそのときの キャリプレーションした式である。

$$T = \frac{1}{(-0.055 \times (\ln R)^2 + 0.938 \times \ln R - 0.199)^2}$$
(B.2)

これは R-T であるので直接は比較できないが、この式 B.2を Fig.B.1に破線で加えてあるので 比較してみると、低温付近では今回のキャリブレーションカーブの方がデータに対して精度が高 い事がわかる。このことより、今後は本実験で行ったキャリブレーションを用いるのが良いと思 われる。

B.2 TES ホルダー

Fig.B.3 ~ Fig.B.5に TES ホルダーの部品及びその写真を示す。全ての材質には熱伝導度のよい OFC を用いている。

B.3 TES のスペック

TES	$300 \mathrm{K}$	$4.2 \mathrm{K}$	$T_c(\text{RRR}=5 \%)$
А	217Ω	56.2Ω	0.281Ω
В	235Ω	60.7Ω	0.304Ω
С	Open	Open	Open
D	221Ω	54.8Ω	0.274Ω

Table B.1: 宇宙研測定データ (残留抵抗比を 5%として転移温度を推定)

B.4 臨界温度、エッジの傾き、残留抵抗比

B.4.1 測定環境

TES Holder(Fig B.3) は Spacer(Fig B.4) に固定され (Fig B.4) における斜線部分)、同様に Spacer に設置されたヒーターによって温度調節が可能になっている。この TES Holder を固定 した Spacer は希釈冷凍機の Experimental Plate : E/P) 上に設置され、最低到達温度 33mK まで冷却することが可能である。また TES からの配線は一旦 Spacer の背面にアルミテープで テンション止めを行った後、 E/P にある 26Way Connector に配線される。このテンション止 めは E/P の温度への熱流出を、配線から直接 TES が受けない為でもある。

本実験に用いた測定装置について述べる。

• V 測定:Keithlay 2001

^{*}道川幸男:1999, 東京都立大学 理学研究科 物理学専攻 修士課程卒業

Keithlay2001			
Range	FullScale	Resolution	Accuracy(5min)
$200 \mathrm{mV}$	± 210.00000	10 nV	3+3
2V	± 2.1000000	100 nV	2+1.5

Table B.2: Keithlay 2001 のスペック

Keithlay Model 236		
Min	Max	
0.1pA	100mA	

Table B.3: Keithlay Model 236 のスペック

- 定電流源:Keithlay Model 236
- 温度測定装置:LTC20
- Heater: 400Ω 抵抗

 Table B.2は TES の温度測定の為の電圧測定装置 Keithlay 2001 のスペック表、また Table

 B.3は TES の温度測定の為の定電流源装置のスペック表である。

TES の温度測定は4端子入力を用いて定電流 (10nA 程度) をかけて、 V を求める。そこから V=IR より R を求める。 R の値から Fig ?? を用いて温度に変換し、測定する。

 T_c 時の抵抗値を 0.25Ω とした場合に、10nA の電流を流すとすると測定される電圧は 2.5nV となる。また残留抵抗値を 60Ω とした場合に 1nA の電流を流すとすると、測定される電圧は 60nV となる。

よって、この測定において電圧計は $2.5 \text{nV} \sim 60 \text{nV}$ までの測定ができなくてはならない。上記のスペックから見ると、 T_c 付近での測定では 10 nV(Range 200 mV)の分解能では測定にならない。

よって、電圧を増幅して測定する必要がある。

分解能から最低増幅率は4倍。また同じレンジで常温での測定も可能とするならば250Ω 程 度までの抵抗測定が必要であり、1nA 流すとして $0.25\mu V$ の測定ができなくてはならないので 最大で840000 倍までである必要がある。現実的には100 倍程度のGain があれば十分である。 400Ω の抵抗を用いて Tes の温度をコントロールする。宇宙研では、LTC20 を用いて50Ω の 抵抗を使い0.05W の発熱を0.1%でコントロールできる。都立大では400Ω の抵抗を用いてい る。つまり同じ装置でも0.4W の発熱を0.1%でコントロールする事になる。これは40 μ W4 の 発熱である。40 μ W の発熱で $G = 1 \times 10^{-4} W/K$

より、 400mK の温度上昇になる。しかし これでは高すぎる。 $\Delta T = 0.01mK$ とする為に は上記の計算より $10^{-3}\mu W$ の発熱である必要がある。 $P = I^2 R$ より、電流値を 1/200 にすれ ば 0.01mK の温度上昇を可能とする事ができる。電流値を 1/200 にする分流回路を Fig B.7に示 す。

- Tc= 転移温度
- T= 測定温度
- R= 転移時の抵抗値
- $\Delta Tc =$ 温度微小变化
- $\Delta R =$ 抵抗微小变化

$$\frac{\Delta Tc}{Tc} = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta R}{R} \tag{B.3}$$

より、 ΔR は次のように書ける

$$\Delta R = \frac{\Delta R}{R} \times \alpha R \tag{B.4}$$

 ΔR に誤差が n %乗るとすると

$$\Delta R' = \frac{n}{100}R + \Delta R \tag{B.5}$$

これを用いて ΔT を求める

$$\Delta T = \frac{\Delta R'}{\alpha R} T \tag{B.6}$$

これに代入すると

$$\Delta T = T + \frac{nT}{100\alpha} \tag{B.7}$$

となる。これより以下の条件での誤差は

- Tc=0.4K
- T=0.4K
- $R = 0.281\Omega$
- $\alpha = 100$
- $\Delta Tc = 0.5mK$
- n=5 %

$$\Delta \Delta T = 0.2mK \tag{B.8}$$

ここでは $\Delta Tc=0.5$ mK で測定しているので、0.2mK の誤差はぎりぎり許容できると考えられる。そこで R の誤差が 5 %以下になるような温度計の精度があれば測定可能であることがわかる。

B.5 結果

B.5.1 カロリーメーターの R-T 測定

• 最低到達温度:33mK

B.5.2 Tc 測定

TES	$300 \mathrm{K}$	$4.2\mathrm{K}$	$33 \mathrm{mK}$
А	220.9Ω		
В	238.9Ω	60.15Ω	62Ω
С	Open	Open	Open
D	227.9Ω		

この結果からもわかる様に、この TES は転移しなかった。

B.5.3 カロリーメーターの I-R 特性

TES にかける電流を大きくしていき、温度変化 (Fig B.8&抵抗値変化 (Fig B.9)を見てみた。

この測定での温度は希釈冷凍機の AVS(内蔵されている温度計)の読みだしを用いている。 Fig B.8で2点大きくずれている点があるが、これは読みだしの誤差だと考えられる。 Keithlay の積 分時間を次第ではさらに正確な値になるはずである。 Fig B.9において $10^{-7}A$ 付近に数点飛び 出している点がありますが、この点は希釈冷凍機の M/C についている Heater を用いて温度を 上昇させて測定をしたときのモノであり、そこ以外の点は Heater は0 にして TES にかける電 流のみを変化させた。

B.6 考察

今回測定を行なった TES は転移しなかった。また、 TES の温度上昇から 100µA より大きな電流を流すと温度上昇が激しい。つまり nA のレンジでの電流であれば比較的発熱が少なく、希釈 冷凍機の冷却能力が発熱を抑えられる事が判明した。スペーサーの形状を多少変えて熱伝導度を 多少悪くした方が測定には良いと思われる。また、今回の冷却では 33mK まで冷却できたので 配線等による熱流入は無いものと考えていいと思われる。今後はこの配線で TES の動作を測定 できると思われる。つまり SQUID との組み合わせを行なうことが可能である。



Figure B.1: RuO₂ 温度計の温度 - 抵抗値 (T-R) 曲線



Figure B.2: RuO₂ 温度計の Fitting Carve と測定データとの差の割合



Figure B.3: TES Holder



Figure B.4: Heater & Spacer 部分



Figure B.5: TES Holder



Figure B.6: 本測定における全体の配線図 1番 Pin がショートしていたので9番 Pin で代用







Figure B.8: T-R Carve

Figure B.9: I-R Carve

Appendix C

設計図各種



名称	材質	尺度
サンプルホルダー	Nb	1/1

Figure C.1: 2 層シールドの SQUID Holder 材質に Nb を用いてある。溝 部分に配線を通す事で磁気遮蔽効果を高めている。仁木工芸株 式会社に発注



Figure C.2: 2 層シールドの内部シールド 材質に Nb を用いてある。仁木工芸株式会社に発注

Fig.C.2にある内部シールドの外側にさらにパーマロイ製の外部シールドを被せる。これによりシールドが2層構造になり、磁気を遮蔽する。



 Figure C.3: 2 層式シールド用ブリッジ設計図。材質は OFC を用いてある。

 仁木工芸株式会社に発注

Appendix D

配線図



Figure D.1: 測定全体の配線図

91

謝辞

本研究において指導教官である大橋先生には多大なる御迷惑をおかけして申し訳ありませんで した。本研究を行えたのも大橋先生のおかげです。また修論を書くにあたり理論に関する多くの 知識、文献、まとめ方を指導していただいた山崎様には感謝の言葉もありません。実験を行うに あたり装置の使い方から実験の進め方まで石崎様には事細かに指導して頂き大変勉強になりまし た。宇宙科学研究所にて既に SQUID の研究を行っていた宮崎様、そして宮崎様の下で研究をお こなっていた大島様には SQUID の使用方法から実験の方向性まで色々と教えて頂き感謝してい ます。大島様には深夜に何度も電話をして御迷惑をおかけ致しました。また研究室の先輩である 古庄様、久志野様には宇宙物理の基礎から色々教えて抱きました。同じ修士課程の伊藤様、授業 の事や実験の手伝い等色々気にかけて頂きとても助かりました。博士課程に進んでも頑張って下 さい。そして、実験の手伝いを多くしてもらい、徹夜の実験等に何度も付き合わせてしまった影 井君には実験以外の事でも色々と感謝しています。大事なデータの入ったパソコンがクラッシュ したとき夜中にもかかわらず診断および復旧手順を京都からナビゲートしてくださった京都府在 住のうゑの様、本当にありがとうございました。お蔭様で大事なデータを失わずに修論を書く事 ができました。そして直接的では無いが、パソコンの壁紙などから微笑んでくれるその笑顔がど れだけ心を落ち着かせ、やる気にさせてくれたか計り知れない前田愛様には本当にありがたく 思っています。

その他にも数多くの方々の力添えがあり修士論文の形にこぎつけることができました事をこの 場を借りて感謝しお礼を述べさせていただきます。

Bibliography

- [1] 修士論文「X線マイクロカロリメータのための低雑音信号処理の研究」,1998, 道川幸男, 東京都立大学
- [2] 道川ノート,1998,道川幸男,東京都立大学
- [3] 修士論文「Ti 薄膜を用いた X 線マイクロカロリメータの開発研究」,1998, 前神佳奈, 東 京大学
- [4] 修士論文「超伝導トンネル接合検出器のX線撮像性能の研究」,1998, 久志野彰寛, 東京都 立大学
- [5] 修士論文「超伝導トランジッションエッジを用いた X 線マイクロカロリメータの開発研 究」,1998, 昆野康隆, 東京大学
- [6] 宮崎レポート,1998,宮崎利行,東京大学
- [7] X 線結像光学,1999, 波岡武 山下広順, 培風館
- [8] 物性測定の進步 II,1996, 小林俊一, 丸善
- [9] Bolometer Noise:Nonequilibrium,1982,John C. Mather,Applied Optics
- [10] ジョセフソン効果の物理と応用,1988,Antonio Barone & Gianfranco, 近代科学社
- [11] IrwinD 論,Irwin
- [12] エミフィル^Rによるノイズ対策,1997,株式会社 村田製作所
- [13] キッテル固体物理学入門上,1998,Charles Kittel, 丸善
- [14] 理科年表 国立天文台編,1997, 小平桂一, 丸善
- [15] 低温工学ハンドブック,1982,VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, 内田老鶴圃新社
- [16] C.D.Tesche and John Clarke, 1977, J. Low Temp. Phys , 29, 301