

修士論文

論文題名

高輝度 LHC ATLAS シリコンピクセル検出器の

閾値調整機構の性能評価

令和 8 年 3 月 24 日

専攻名 物理学専攻

氏名 北野至

大阪大学大学院理学研究科

高輝度 LHC ATLAS シリコンピクセル検出器の
閾値調整機構の性能評価

大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻
南條研究室 博士前期課程 2 年

北野至

2026 年 3 月 6 日

概要

Large Hadron Collider (LHC) は、スイス・ジュネーブ近郊の地下 100m、周長 27km のトンネル内に建設された陽子・陽子衝突型の円形加速器である。ATLAS 実験の目的は、LHC を用いた新粒子の探索や素粒子標準理論の検証である。研究のさらなる発展のため、2030 年より瞬間ルミノシティを 2.5 倍以上に、積分ルミノシティを 6 倍以上にするという高輝度 LHC が計画されている。それに伴い、2026 年からのシャットダウン期間で現行の内部飛跡検出器は全て新型シリコン検出器に入れ替えられる。新型シリコン検出器は約 1 万台の検出器モジュールからなり、検出器モジュールはシリコンセンサー、フロントエンドチップ、フレキシブルプリント基板で構成される。シリコンセンサーからの信号はフロントエンドチップにより 50 μm 角のピクセル単位で読み出される。ピクセル毎にフロントエンドチップで閾値を設けることでノイズと区別して荷電粒子由来の信号が得られる。閾値はフロントエンドチップのレジスタ値で決まり、ピクセル毎に目標となる閾値に調整できる。ATLAS 実験グループでは調整後の閾値分布の幅が十分小さいことを課している。実機仕様となる検出器モジュールを作ったあと、目標閾値 1500e に調整することで良品・不良品の判定をする検査がある。しかし、目標閾値はその 1 点のみであり、それ以外の閾値の性能や閾値分布の幅は詳細に調べることができない。ところが、運用中は放射線損傷によりノイズが増え、信号出力が減るため、それに合わせて閾値を変える備えが要る。そのため本研究では、広範な目標値において閾値を調整した際の閾値分布の幅を調べた。その結果、合計 8 つのフロントエンドチップについて、20°C では、7 つのチップが運用時の最低閾値である 600e から 1700e にて 40e 未満を達成、-15°C では、3 つのチップが 600e から 1700e にて 40e 未満を達成した。また、調整後において目標閾値から 120e 以上離れた閾値をとる不良ピクセルの原因を調べた。不良ピクセルを分類し、多くのチップに共通する 5 つの特徴についてまとめた。1 つはまだ原因がわかっていないが、4 つは定性的に原因を理解、考察することができた。

目次

第 1 章	序論	7
1.1	LHC ATLAS 実験	7
1.1.1	ATLAS 検出器	7
1.1.2	内部飛跡検出器のアップグレード	8
1.2	新型シリコンピクセル検出器	9
1.2.1	検出器モジュールの構造	9
1.2.2	検出器モジュールの量産と品質保証検査	10
1.2.3	閾値の調整	10
1.3	本研究の目的と意義	11
第 2 章	本研究の動作試験セットアップ	12
2.1	動作試験セットアップの全体構造	12
2.2	検出器モジュールの温度制御	12
2.2.1	cooling box の構造と冷却機構	13
2.2.2	温度の計測と制御	13
2.3	データ取得に必要な制御	13
2.3.1	電源供給 (LV/HV)	14
2.3.2	データ通信	14
第 3 章	フロントエンドチップの内部回路と基本的なレジスタの応答	15
3.1	フロントエンドチップの内部回路	15
3.1.1	電荷信号処理の流れ	15
3.1.2	差動増幅回路 PreComp	17
3.1.3	テスト電荷の入力	19
3.2	閾値を決定するパラメータ	19
3.2.1	グローバル閾値調整レジスタ (Vth1, Vth2)	19
3.2.2	ピクセル別閾値調整レジスタ (TDAC)	19
3.2.3	TDAC の感度を定めるグローバルレジスタ (DiffPreComp)	20
第 4 章	閾値の調整と測定	21
4.1	閾値の測定手法	21
4.1.1	測定のアプローチ	21
4.1.2	測定の失敗	22
4.2	閾値の調整手法	23
4.2.1	グローバル閾値レジスタ調整	24
4.2.2	ピクセル別閾値レジスタ調整	25
第 5 章	閾値測定と閾値を決定するパラメータとその応答	27
5.1	本研究での閾値測定のパラメータ設定	27

5.1.1	テスト電荷注入回数	27
	測定失敗数	28
	測定精度	28
5.1.2	テスト電荷変化幅	29
	測定精度	30
5.1.3	本研究での測定パラメータと測定精度	31
5.2	閾値を決定するパラメータとその応答	32
5.2.1	グローバル閾値調整パラメータ (Vth1, Vth2)	32
5.2.2	ピクセル別閾値調整パラメータ (TDAC)	33
5.2.3	ピクセル別閾値調整パラメータの応答を変化させるパラメータ (DiffPreComp)	35
第 6 章	閾値調整結果と不良ピクセルの調査	37
6.1	閾値分布の標準偏差の結果	37
6.1.1	結果の一例	37
6.1.2	20,-15 度における 2 つの検出器モジュールの結果	38
6.1.3	結果の解釈	42
6.2	外れ値をとるピクセルの調査	43
6.2.1	分類	43
6.2.2	分類結果	44
6.2.3	共通する特徴	47
第 7 章	考察	51
7.1	フィット失敗のピクセルが特定の目標閾値においてピークを持つ原因	51
7.2	展望	55
7.2.1	提案 1 : 20°C における閾値調整手法	55
7.2.2	提案 2 : -15°C における閾値調整手法	55
第 8 章	結論	56
Appendices		56
付録 A	Appendix1	57
A.1	動作試験セットアップの改良	57
A.1.1	改良前の課題	57
A.1.2	改良前の配線と機能	58
A.1.3	改良のためにしたこと	59
	回路基板の設計および製作	59
	使用する部品の再選定	63
	部品取り付け位置の変更	64
A.1.4	改良後の状態	66

図目次

1.1	LHC の概略図 [1]	7
1.2	ATLAS 検出器の全体像 [3]	8
1.3	現行の内部飛跡検出器の全体像 [3]	8
1.4	高輝度 LHC ATLAS 実験で用いる内部飛跡検出器の全体像 [7]	9
1.5	(a) モジュール全体図 [8]	9
1.6	(b) モジュール断面図 [9]	9
1.7	検出器モジュールの組み立ての流れ [9]	10
1.8	目標閾値に向けて調整した後の閾値分布	11
2.1	動作試験セットアップ概略図	12
2.2	cooling box と温度制御に用いる装置の概略図	13
2.3	データ通信におけるセットアップの概略図 [17]	14
3.1	アナログフロントエンド回路の概略図と各段での信号の例 [10]	16
3.2	TOT の概念図 [12]	17
3.3	PreComp の回路図 [10] の図を改変	18
3.4	テスト電荷入力回路の回路図	19
4.1	テスト電荷を複数回注入した際の電荷量分布	21
4.2	閾値測定 の概念図	22
4.3	測定に失敗したピクセルの Scurve の分類	23
4.4	2つの閾値調整に共通する概念図	24
4.5	グローバル閾値調整の過程	25
4.6	ピクセル別閾値レジスタ調整の概念図 [12]	25
4.7	ピクセル別閾値調整の過程	26
5.1	フロントエンドチップ別 テスト電荷注入回数と測定失敗回数の関係	28
5.2	フロントエンドチップ別 テスト電荷注入回数と測定された閾値の平均および標準偏差の平均（誤差棒）の関係	29
5.3	フロントエンドチップ別 テスト電荷変更幅と測定に失敗したピクセル数	30
5.4	フロントエンドチップ別 テスト電荷変更幅と測定された閾値の平均および標準偏差の平均（誤差棒）の関係	31
5.5	フロントエンドチップ別 本研究での閾値測定 の標準偏差の分布	32
5.6	フロントエンドチップ別 グローバル閾値調整レジスタ V_{th1} , V_{th2} を変化させたときの閾値の応答	33
5.7	TDAC を変化させたときの閾値の変化	34
5.8	TDAC を 1 変化させたときの閾値の変化	34
5.9	V_{th1} 別、TDAC の傾きの変化	35
5.10	TDAC の振る舞いの説明	35
5.11	DiffPreComp を変化させたときの閾値分布の違い	36

5.12	目標閾値と DiffPreComp を変化させたときの閾値の応答	36
6.1	閾値調整の結果の一例	37
6.2	各目標閾値における、ガウス関数フィットで得られた平均値と標準偏差	38
6.3	調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの平均値。赤線は目標閾値を示す。	38
6.4	調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの標準偏差。	39
6.5	調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの平均値。赤線は目標閾値を示す。	39
6.6	調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの標準偏差。	40
6.7	調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの平均値。赤線は目標閾値を示す。	40
6.8	調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの標準偏差と目標閾値	41
6.9	調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの平均値。赤線は目標閾値を示す。	41
6.10	調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの標準偏差と目標閾値	42
6.11	目標閾値と測定された閾値の差と、TDAC の関係	43
6.12	閾値測定に失敗し、ヒット率が 100% でなかったピクセルのヒット数分布	44
6.13	結果の一例	45
6.18	グローバル閾値調整後、ピクセル別閾値調整前の閾値分布	48
6.19	グローバル閾値調整後、ピクセル別閾値調整前の閾値分布の平均と標準偏差	48
6.20	動作異常ピクセルのヒット数分布と目標閾値の関係	49
6.21	-15 度のときの、グローバル閾値調整後、ピクセル別閾値調整前の閾値分布の平均と標準偏差	50
7.1	フィット失敗ピクセルの分類。20°C における検出器モジュール 20UPGM23603060 のデータ。	52
7.2	S-curve におけるベースラインの差のずれの分布	53
7.3	調査する領域 (島) の定義	53
7.4	島 1 におけるあるフロントエンドチップの調査結果の例	54
7.5	島の内部、島の間で同じピクセルがフィットに失敗しているのか調査した結果	55
A.1	改良前の課題	57
A.2	改良前の配線と機能	58
A.3	改良を加えた箇所	59
A.4	回路基板に載るもの	59
A.5	完成した回路基板	60
A.6	変更点	60
A.7	回路基板のピン配置	61
A.8	Lock の分岐電線の作り方	62
A.9	パワーリレーと回路基板を繋ぐ電線の写真	62
A.10	12 V 電源と回路基板を繋ぐ電線の図	63
A.11	今回選んだパワーリレー	64
A.12	全体の配線概念図	64
A.13	端子台周辺の配線図	65
A.14	ペルチェの極性	65
A.15	ペルチェの電線の作り方	66
A.16	改良後の状態	66

表目次

5.1	本研究に用いた検出器モジュールおよびフロントエンドチップのシリアルナンバー	27
7.1	フィットに失敗したピクセルの分類定義	51

第1章

序論

1.1 LHC ATLAS 実験

Large Hadron Collider(LHC) は、スイス・ジュネーブ郊外の地下 100 m、周長 27 km のトンネル内に建設された陽子・陽子衝突型円形加速器である。図 1.1 に示すように、LHC には 4 つの衝突点があり、その内の一つにあるのが ATLAS 検出器である。ATLAS 検出器は、衝突で生成される粒子を種類の検出器で捉え、事象を再構成する。これらの事象を用いた新粒子探索や素粒子標準理論の精密測定が ATLAS 実験の目的である。

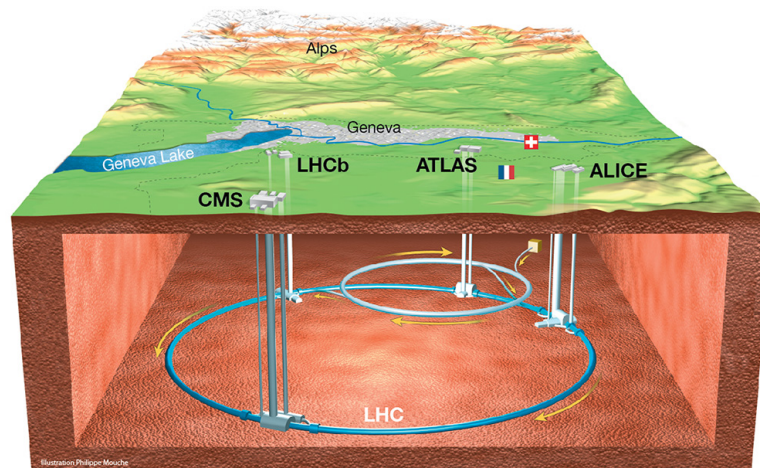


図 1.1: LHC の概略図 [1]

新粒子探索や標準理論の精密測定のためには、統計精度を高めるために大量のデータ取得が必要とされる。LHC は 2022 年から第 3 期実験で 300 fb^{-1} 以上の陽子陽子衝突データを蓄積して新物理を探しているが、いまだ新物理の兆候は掴めていない。このため、2030 年から陽子ビームの輝度を増強した高輝度運転 (高輝度 LHC) が計画されている。この LHC の高輝度化に伴い、ATLAS 実験では内部飛跡検出器を新型シリコン検出器に全て入れ替える。2026 年夏頃から長期シャットダウンの期間に入り、新型シリコン検出器の入れ替えが始まる。そして 2030 年夏頃から高輝度 LHC でデータを取り始める計画である。

1.1.1 ATLAS 検出器

図 1.2 は現行の ATLAS 検出器の全体像である。直径 25 m、長さ 44 m の円筒形である。内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミュオンスペクトロメータがあり、陽子・陽子衝突でできた粒子の運動量やエネルギーを測定し、粒子の種類を同定している [2]。ここでは、本研究に関連する内部飛跡検出器について述べる。

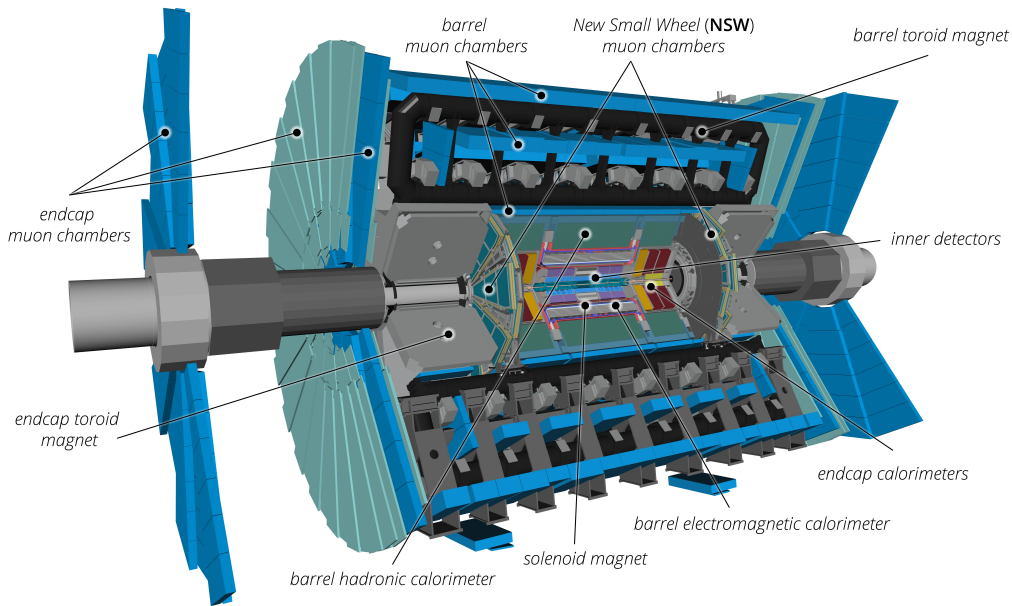


図 1.2: ATLAS 検出器の全体像 [3]

図 1.3 は、現行の内部飛跡検出器の全体像である。内部飛跡検出器は内層からシリコンピクセル検出器 [4]、シリコンストリップ検出器、遷移放射検出器がある [5]。陽子・陽子衝突点を中心としてビーム軸 (z 軸) にそって広がる円筒状のバレル領域と、その両端である擬ラピディティ η^{*1} が大きい領域を覆うエンドキャップ領域からなる。内部飛跡検出器のある領域には、外部の超伝導ソレノイド電磁石で 2 T の磁場をかける。この磁場によるローレンツ力で陽子陽子衝突でできた荷電粒子の軌道が曲げられる。内部飛跡検出器で観測した飛跡の曲率から運動量を求める。

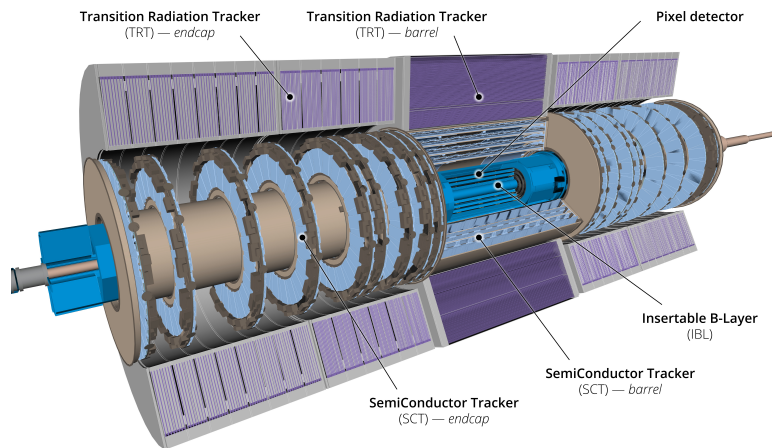


図 1.3: 現行の内部飛跡検出器の全体像 [3]

1.1.2 内部飛跡検出器のアップグレード

LHC の高輝度化に合わせて、現行の内部飛跡検出器は Inner Tracker (ITk) と呼ばれる新型シリコン検出器に入れ替えられる [6]。

図 1.4 は高輝度 LHC ATLAS 実験で用いる内部飛跡検出器の全体像であり、大きさは直径約 2.1 m、長さ約 6.2 m である。

*1 ビーム軸となす角度を θ としたとき $\eta \equiv -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]$ で定義される。

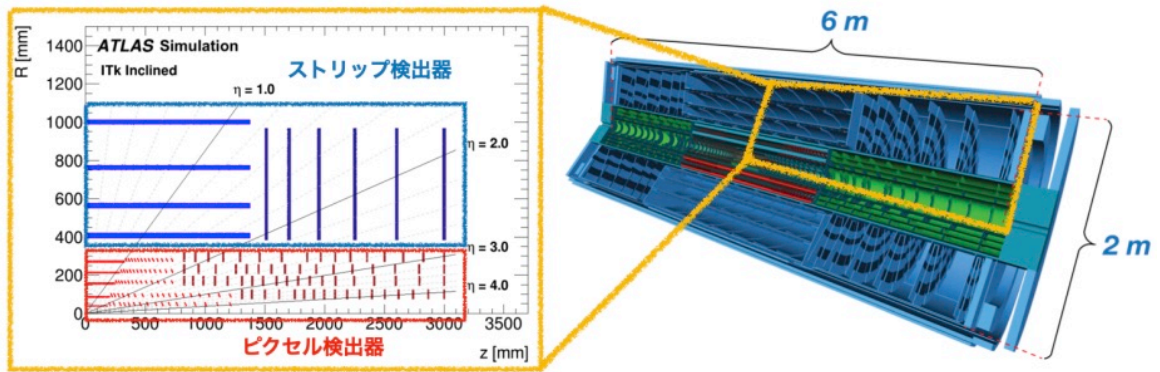


図 1.4: 高輝度 LHC ATLAS 実験で用いる内部飛跡検出器の全体像 [7]

ITk には、ビーム軸に対して内側からピクセル検出器、ストリップ検出器がある。ピクセル検出器は、バレル領域は 5 層、エンドキャップ領域では複数のリングからなる。ストリップ検出器は、バレル領域に 4 層、2 つのエンドキャップ領域にそれぞれ 6 層ある。本研究に関連するシリコンピクセル検出器のみを 1.2 で説明する。

1.2 新型シリコンピクセル検出器

LHC ATLAS 実験で用いるシリコンピクセル検出器は約 1 万台のシリコンピクセル検出器モジュール（以下、検出器モジュール）からなる。

1.2.1 検出器モジュールの構造

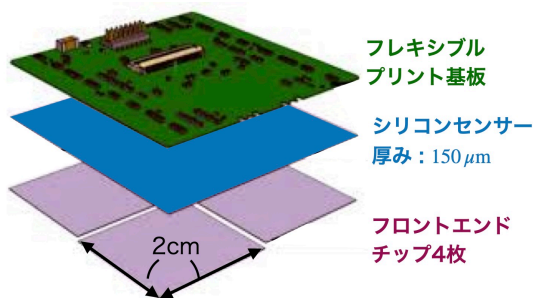


図 1.5: (a) モジュール全体図 [8]

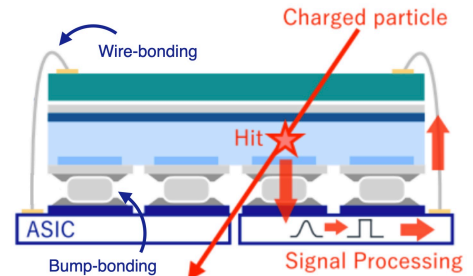


図 1.6: (b) モジュール断面図 [9]

図 1.5、1.6 は、それぞれ検出器モジュールの全体図と断面図である。図 1.5 のように、検出器モジュールはシリコンセンサー、フロントエンドチップ、フレキシブルプリント基板からなる。検出器モジュールの大きさは 4 cm 四方である。

シリコンセンサーは、厚さ 150 μm の半導体検出器である [6]。このセンサーは 50 μm 角に区切られた領域（ピクセル）毎に信号が読み出される。図 1.6 で示されるように、センサー内を荷電粒子が通過すると、落としたエネルギーに応じた数の電子・正孔対ができる。センサー内の電場により、電子と正孔対がそれぞれ電極に移動し信号となる。このようにしてできた電荷信号はピクセル毎に、フロントエンドチップに入る。

フロントエンドチップでは、シリコンセンサーからの電荷信号が処理される [10]。1 枚のフロントエンドチップのサイズは 2 cm 角であり、4 枚のフロントエンドチップで 1 つの検出器モジュールをなす。こちらもシリコンセンサーと同じ 50 μm 角のピクセルに区切られる。1 枚のフロントエンドチップに、ピクセルは一行あたり 400 個、一列あたり 384 個並ぶ。よって合計で $400 \times 384 = 153600$ 個のピクセルがある。シリコンセンサーとフロントエンドチップはバンプと呼ばれる半田球を介して、ピクセル毎に電氣的に接続される（バンプ接合）。フロントエンドチップには各ピクセル毎に信号処理回路があり、シリコンセンサーからの電荷信号を増幅し、閾値を設けることで荷電粒子のヒットを検出する。

フロントエンドチップで処理された信号はワイヤーボンディングで接続されたフレキシブルプリント基板に送られる。このフレキシブルプリント基板は、荷電粒子のヒット情報を外部に送り出し、センサーやフロントエンドチップの電源を供給する。

1.2.2 検出器モジュールの量産と品質保証検査

高輝度 LHC ATLAS 実験に向け、検出器モジュールの量産が進む。先述した通り、ピクセル検出器モジュールは全部で約 10000 台の生産が予定されており、日本グループはそのうちの約 2800 台を担当する。図 1.7 に、検出器モジュール組み立てと品質保証検査の流れを示す。シリコンセンサーとフロントエンドチップをバンプ接合したものをベアモジュールという。ベアモジュールは、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で品質が検査される。ベアモジュールとフレキシブルプリント基板は、ハヤシレピック株式会社第三事業部に送られ、そこで組み立てられる。最初に、ベアモジュールとフレキシブル基板を接着し (Assembly)、次にこれらをワイヤーボンディングで電氣的に接続する (Wirebonding)。こうして組み立てられたモジュールには、放電防止や湿気保護のためのパリレンコーティングと、ワイヤーボンディングを保護するワイヤーボンディングプロテクションが施される。また、組み立ての過程では品質保証検査が実施される。品質保証検査は、非電氣的試験と電氣的試験に分けられる。

非電氣的試験では、組み立ての過程において顕微鏡に取り付けられたカメラで検出器モジュールを撮影する。この写真で外観を目視で確認することにより、ワイヤーボンディングの断線や検出器上の傷や腐食が無いかが確認する。電氣的試験では、シリコンセンサーに逆バイアス電圧を、フロントエンドチップに駆動電圧を印加し、実際にデータを読み出す。電氣的試験は、室温の 20 °C と運用時の温度である -15 °C で実施される。この試験のセットアップは 2 章で説明する。電氣的試験の 1 つに、次に説明する閾値の調整がある。

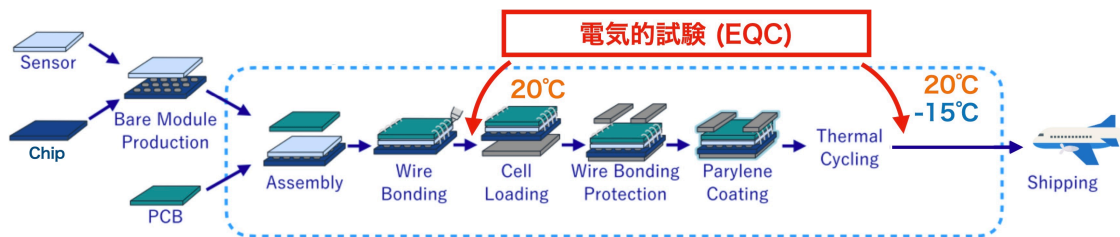


図 1.7: 検出器モジュールの組み立ての流れ [9]

1.2.3 閾値の調整

先述した通り、フロントエンドチップ閾値を設けることで荷電粒子のヒットを検出する。この閾値となる電圧は、フロントエンドチップの内部回路の設定を保持するレジスタ値によってピクセル毎に決まる。

個体差があるため、同じレジスタ値に対して設定される閾値はピクセル毎に異なる。これにより、あるレジスタ値が決まった閾値に対応しているわけではない。そのため、レジスタ値を書き換えと閾値の測定を繰り返すことで、閾値が目標に近づくよう調整する。

詳細な閾値調整の手順は 4 章で説明するが、流れは以下の通りである。

1. 目標となる閾値を決める。
2. 目標閾値に近づくようにレジスタ値を書き換える。
3. 閾値を測定し、目標閾値と比較する。基準よりも大きく外れていたなら 2 に戻る。
4. 閾値が基準範囲内もしくはレジスタ値の書き換えが規定回数に達したら終了。

図 1.8 は、目標閾値に向けて調整した後の、あるフロントエンドチップのピクセル毎に測定された閾値の分布である。調整した後でも、レジスタがデジタル値をとるため、閾値がばらつきを持つことが分布に表れている。どちらのグラフも、多数のピクセルが目標閾値を中心にガウス関数で分布している。しかし、目標閾値から大きく離れた外れ値をとるピクセルもある。そして、そのようなピクセルは目標閾値が 1400 e (e は素電荷) の分布に比べて、600 e の分布

で多いことがわかる。ここから、目標閾値によって調整の良し悪しが変わることがわかる。

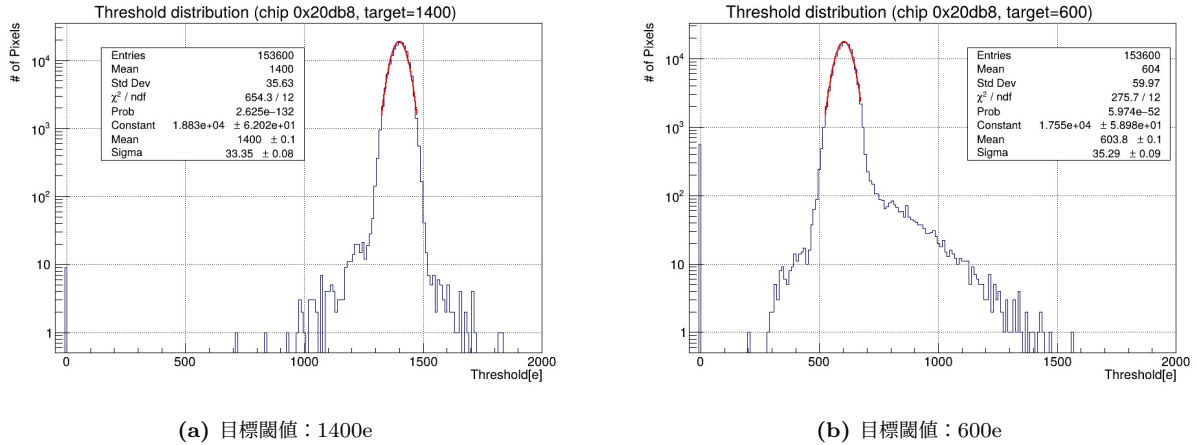


図 1.8: 目標閾値に向けて調整した後の閾値分布

1.3 本研究の目的と意義

閾値を設定する目的は、ノイズと荷電粒子由来の電荷信号を分離するためである。そのため、狙った閾値に調整できることは重要である。よって、全ピクセルに対して、調整された閾値の一様性という観点から閾値調整の性能を評価する。閾値のばらつきについて、現行のピクセル検出器では 40 e が達成されており [11]、本研究の対象である新型シリコンピクセル検出器に用いるフロントエンドチップに対しても同等の性能が要求されている。また、高輝度 LHC ATLAS 実験で調整する最低の閾値は 600 e である。よって、これが満たされているか検証する。しかし、図 1.8 で見たように、実際は理想的なガウス分布にならず多くの外れ値がある。そして、外れ値をとるピクセルの数は、目標閾値によって変わった。本検出器は、運用中の放射線損傷によりノイズの増加や電荷収集効率の低下が予想されるため、それに合わせて閾値を変える備えがある。よって本研究の目的は、広範な目標閾値に対して以下を調べることである。

1. 閾値分布の中心部をガウス関数でフィットしたときの標準偏差が 40e 未満であるか
2. 外れ値をとるピクセルの割合とその原因調査

本研究では、目標閾値 $\pm 120e$ の範囲外を外れ値と定義する。センサーが取り付けられた実機仕様の検出器モジュールで、この調査はされたことがない。また、先行研究 [12] においても、運用時の温度で調査はされていないので、本研究が初となる。

第2章

本研究の動作試験セットアップ

この章では、本研究で用いた動作試験セットアップを説明する。本研究の測定は、(i) 検出器モジュールを安定に動作させるための温度制御、(ii) フロントエンド電源およびセンサー逆バイアス電源の供給、(iii) PC、フロントエンドチップ間の通信とデータ読み出しの3要素からなる。これらの3要素は密接に関係しているため、最初に全体構造を述べる。その後、温度制御の方法と、データ取得の流れ（電源供給とデータ通信）についてそれぞれ説明する。また、私が修士1年の頃、この動作試験セットアップを改良した。改良内容については Appendix 参照のこと。

2.1 動作試験セットアップの全体構造

図 2.1 に本研究の動作試験セットアップの概略図を示す。温度制御、電源供給、データ通信と読み出しは全て PC を用いて制御される。温度制御では、検出器およびその周辺に取り付けられたセンサーによる温度情報を基に、PC が温度制御装置に指令を出す。電源はフロントエンドチップ動作用の低電圧電源 (LV) およびセンサー逆バイアス用の高電圧電源 (HV) からなり、いずれも PC によって所定の値に決められる。これら2つはパワーアダプターカードに接続し、検出器モジュールに1本のケーブルでまとめて供給する。検出器モジュールは信号変換用の基板 (データアダプターカード、Ohio カード) を介して FPGA ボードに接続される。PC のデータ取得用ソフトウェアが FPGA 上のファームウェアを設定、起動することでデータを取得している。

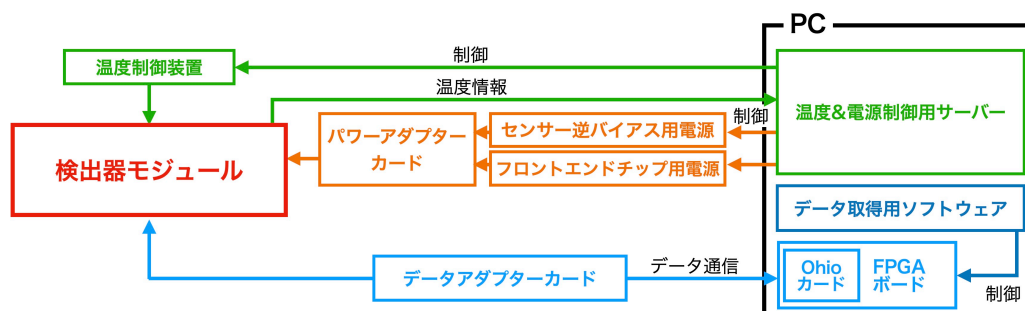


図 2.1: 動作試験セットアップ概略図

2.2 検出器モジュールの温度制御

検出器モジュールは、室温の 20 °C と運用時の温度である -15 °C で品質が検査される。データ取得の際には、検出器モジュールは cooling box と呼ばれる断熱材で覆われた箱に入れられる。cooling box 内部には複数のセンサーや温度制御用の電気素子があり、検出器モジュールは一定温度に保たれる。本節では、温度を一定に保つ方法を説明する。

2.2.1 cooling box の構造と冷却機構

図 2.2 に cooling box と温度制御に用いる装置の概略図を示す。cooling box 内部にはデルリン樹脂で作られたケースがあり、その中に以下で説明する部品が入る。ケース内部には検出器モジュールを載せる冷却用ヘッドがあり、その下部に 2 段のペルチェ素子がある。ペルチェ素子は、ペルチェ効果を利用した熱電素子であり、電圧を印加することで、片面が発熱、もう一方の面が冷却される。本検査装置は、2.2.2 で説明するように、ペルチェ素子の駆動電圧を操作することで温度を制御する。さらにペルチェ素子の下にはシンクがあり、その内部を循環する不凍液が熱を外部に逃がす。シンクに接続された外部のチラーが、不凍液を循環し、温度を一定に保つ役割を担う。先述した通り、検査時において検出器モジュールは -15°C まで冷却される。そのため、冷却時の結露を防ぐためにコンプレッサーと乾燥フィルターで乾燥空気を作り、cooling box 内へ供給する。

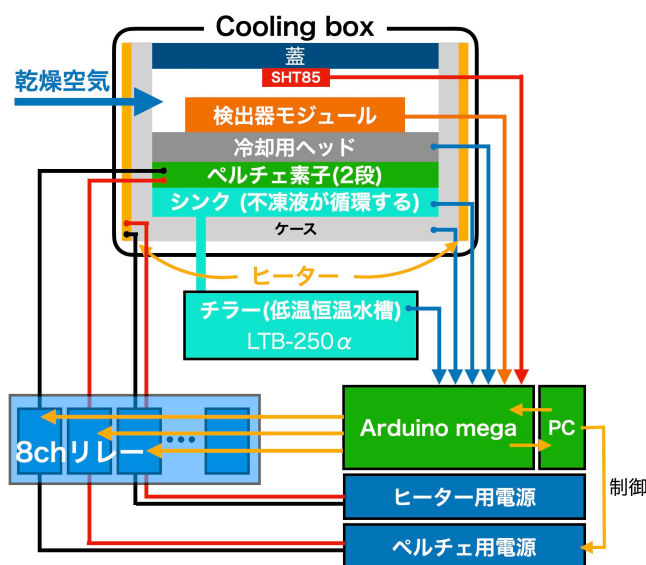


図 2.2: cooling box と温度制御に用いる装置の概略図

2.2.2 温度の計測と制御

温度制御の基準として、検出器モジュールに実装された NTC サーミスタを用いる。加えて検出器モジュールの破損防止のため、cooling box の蓋に取り付けられた温湿度計 (SHT85(Sensirion 製 [13])) や、シンク、冷却用ヘッド、ケースに取り付けられた熱電対を用いて、周辺温度を監視する。これらのセンサーはマイクロコントローラー (Arduino mega2560 Rev3[14]) を介して PC に接続され、その温湿度情報が PC 上で監視・記録される。NTC サーミスタの温度をフィードバックして、PC 上の温度制御用サーバーがペルチェ素子に印加する電圧を変え、検出器モジュールの温度を制御する。このとき、ペルチェ用電源の電圧の絶対値は PC からのシリアル通信で制御するが、加熱と冷却を切り替えるための電圧の極性は PC から直接は制御できない。そのため、図 2.2 で示したように、マイクロコントローラー (Arduino mega2560 Rev3) が 8ch リレーを切り替えることで極性を制御する。さらに、温度制御用サーバーには、検出器モジュールが高温にさらされたり、結露することを防ぐため、危険を事前に回避するインターロック機能がある。本研究では、測定中も温度や湿度を可能な限り継続的に監視し、異常の兆候がないことを確認しながら運用した。

2.3 データ取得に必要な制御

本節では、電源供給とデータ通信を含むデータ取得の流れを述べる。データは、フロントエンドチップの動作電圧 (LV) とセンサーの逆バイアス用の電圧 (HV) を印加した状態で取得する。そのため、まず LV, HV を印加して温度

が安定するまで待つ。これには大体 10 分程度かかる。目標の温度で安定することを確認したら、PC でフロントエンドチップと通信し、レジスタ値を変えることでフロントエンドチップの動作を決め、データをとる。電源供給、データ通信それぞれについては以下の通りである。

2.3.1 電源供給 (LV/HV)

検出器モジュールへの電源供給は、フロントエンドチップの動作電源である LV と、センサー逆バイアス用の HV の 2 系統からなる。ピッグテールと呼ばれるフラットケーブルを介して、検出器モジュールと外部の電源装置は接続される。両電源は PC で制御され、測定時の電源状態は電圧・電流を含めて監視・記録される。これらの電源は、2.2.2 で述べたインターロック機能に対応している。そのため、異常時にはマイクロコントローラー (Arduino mega2560 Rev3) を介して状況に応じて電源が自動で切られる。

2.3.2 データ通信

図 2.3 は、データ通信の概略図である。モジュールは、ピッグテールと呼ばれるケーブルを介してデータアダプターカードに接続する。さらに、Ohio カードと呼ばれる信号変換の基板を介して、検出器モジュールを FPGA ボードに接続する。FPGA は内部の回路を書き換えられる素子である。FPGA の内部回路設定をファームウェアという。FPGA からフロントエンドチップに信号を送り、レジスタ値を変えることでフロントエンドチップの動作を制御する [15]。こうして得られたデータは PC 上のソフトウェアで解析される。また逆に、PC のソフトウェアから、フロントエンドチップのレジスタ値を書き換えや、データを取得するための信号の送信ができる。FPGA のファームウェア、PC のソフトウェアには、アメリカの研究機関である LBNL が開発した YARR [16] というシステムを使用した。



図 2.3: データ通信におけるセットアップの概略図 [17]

第3章

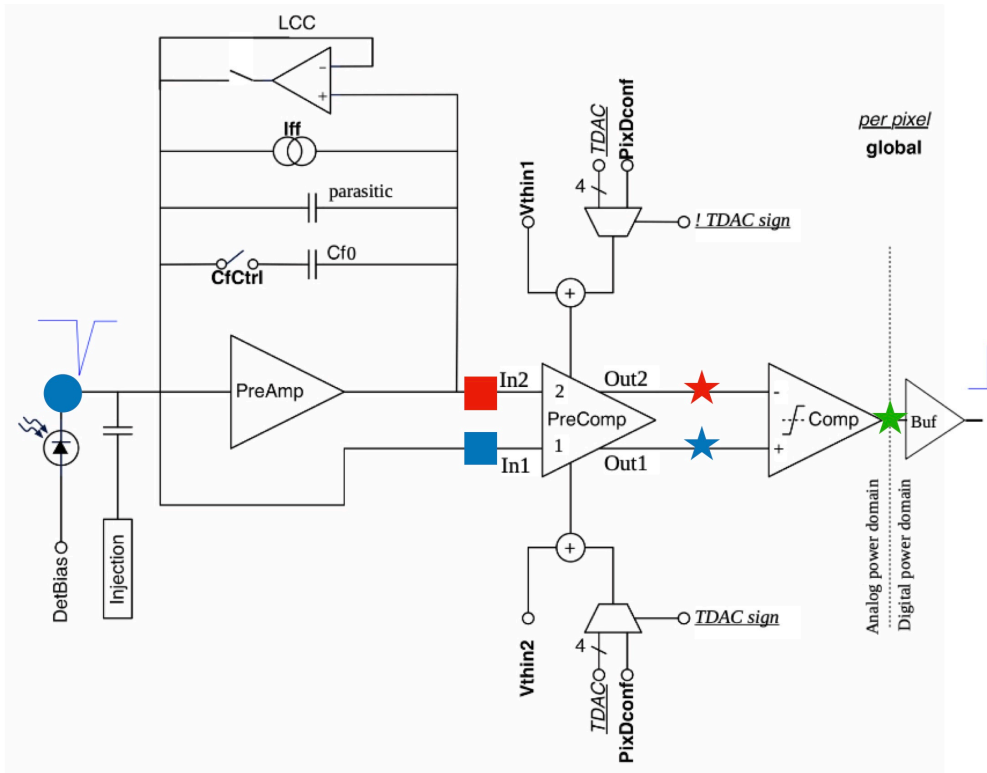
フロントエンドチップの内部回路と基本的なレジスタの応答

本章では、シリコンセンサーから入力される電荷信号が、アナログフロントエンド回路内で処理され、最終的にヒット情報としてデジタル化される流れを説明する。

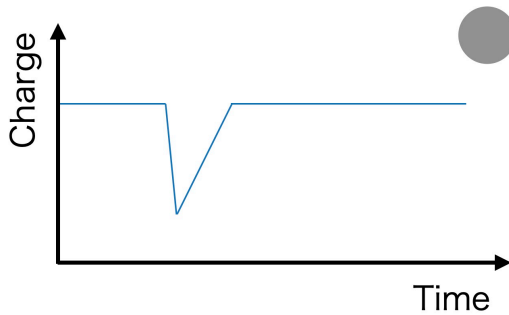
3.1 フロントエンドチップの内部回路

3.1.1 電荷信号処理の流れ

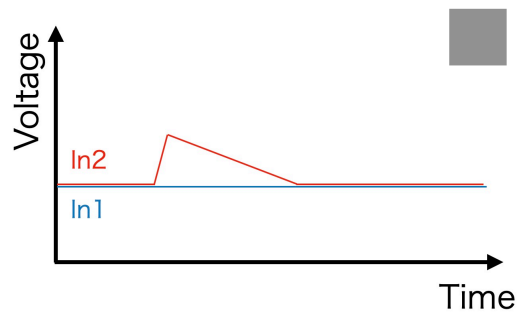
図 3.1a は、アナログフロントエンド回路の概略図である。シリコンセンサーの信号電荷はバンプ接合を介して各ピクセルのアナログ回路に入力される。(i) 前段増幅回路 (PreAmp)、(ii) 後段増幅回路 (PreComp)、(iii) コンパレータ (Comp) の順に処理される。PreAmp は電荷信号を電圧信号へ変え、PreComp は差動増幅とベースライン調整を行って差動信号をつくり、Comp が閾値超過の有無を判定して矩形波として出力する。この矩形波はデジタル回路へ渡され、ヒット情報になる。



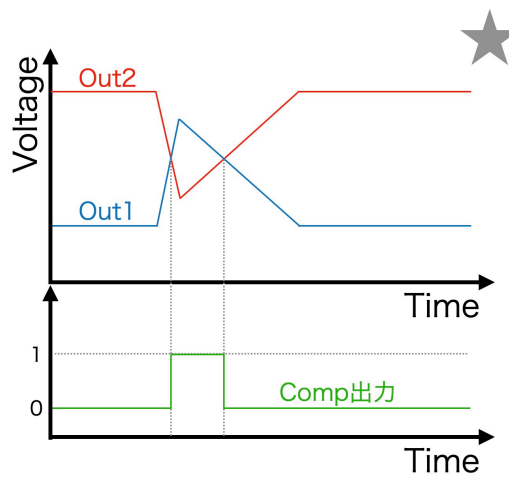
(a) アナログフロントエンド回路の概略図。それぞれの記号の位置における信号の例が (b)~(c) である。



(b) 入力される電荷信号



(c) PreComp への入力



(d) PreComp, Comp の出力信号

図 3.1: アナログフロントエンド回路の概略図と各段での信号の例 [10]

PreAmp は入力電荷 Q_{in} を電圧に変換する積分回路として機能する。図 3.1a における parasitic の静電容量を $C_{parasitic}$ とする。このとき、 $C_f = C_{parasitic} + C_{f0}$ として理想的には、

$$V_{out} = \frac{Q_{in}}{C_f} \quad (3.1)$$

が成り立つ。このとき、 C_{f0} は CfCtrl のスイッチに対応するレジスタ値で使用するか選択できる。また、Iff のフィードバック電流により、信号が来ていないときは、入力ノードの電位と PreAmp の出力電位は等しくなっている。そのため、入力ノードの電位と PreAmp の出力電圧の差動信号が次の PreComp に入る。

PreAmp で処理された電圧信号は次に PreComp に入る。PreComp は、PreAmp からの差動信号を増幅する回路である。この差動構成により、ノイズなどの影響を小さくする。3.1.2 で述べるように、差動出力信号それぞれの増幅度と出力電位のオフセットを変え、実効的に閾値を与える。

Comp は PreComp から与えられる 2 つの入力を比較し、 $Out1 > Out2$ のときに矩形波を出す。この矩形波の幅が Time over Threshold (ToT) に対応し、入力電荷が大きいほど ToT が長くなる。図 3.2 は ToT の概念図である。これによりヒット時に落とした電荷の大きさも情報として記録される。

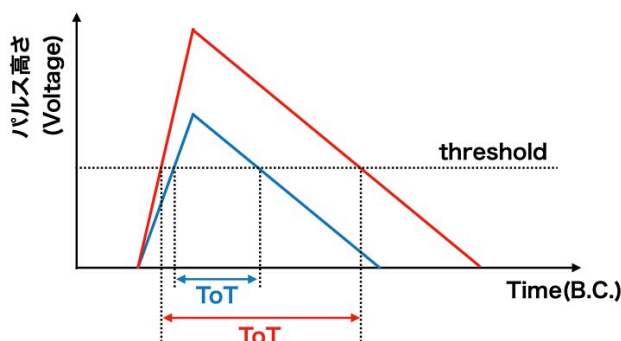


図 3.2: ToT の概念図 [12]

3.1.2 差動増幅回路 PreComp

本節では、閾値が導入される PreComp に焦点を当てる。PreComp は 2 つの入力に対して 2 つのブランチを持つ対称的な回路構造をとる。これら 2 つのブランチにおける出力部の電圧オフセットと信号の増幅度により閾値が導入される。PreComp には信号を増幅する機能もあるが、閾値を与える機能もある。

閾値導入の仕組み

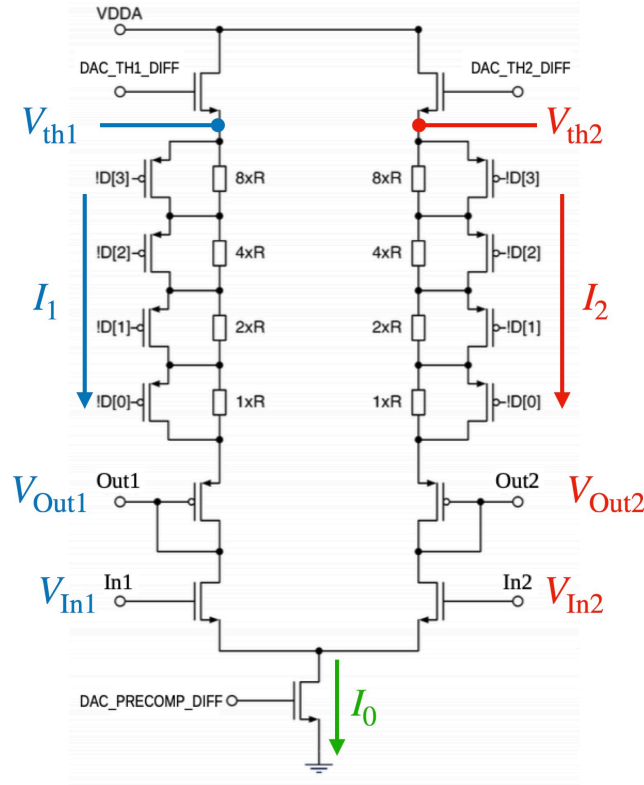


図 3.3: PreComp の回路図 [10] の図を改変

図 3.3 は、PreComp の回路図である。2つの対称的なブランチがあり、その下に DAC_PRECOMP_DIFF で決定される定電流源がある。この電流を I_0 とする。In2 の方のブランチを見ると、上から、ブランチに印加する電圧を決める DAC_TH2_DIFF レジスタ、!D[0]~!D[3] で大きさを変えられる抵抗列、Out2, In2 がある。Out2, In2 はそれぞれ図 3.1a にある PreComp の出力、入力である。DAC_TH2_DIFF で決まる電圧、Out2, In2 それぞれの電位を $V_{th2}, V_{Out2}, V_{In2}$ とする。さらに、抵抗列の合成抵抗を R_2 とし、このブランチを流れる電流の大きさを I_2 とする。もう片方のブランチについても、対称的な構造であるため同様の記号をつける。このとき、以下が成り立つ。

$$I_0 = I_1 + I_2 \quad (3.2)$$

$$V_{Out1} = V_{th1} - R_1 I_1 \quad (3.3)$$

$$V_{Out2} = V_{th2} - R_2 I_2 \quad (3.4)$$

$$V_{Out1} - V_{Out2} = V_{th1} - V_{th2} - (R_1 I_1 - R_2 I_2) \quad (3.5)$$

図 3.1d にあるように、 $V_{Out1} - V_{Out2}$ が正のときに Comp は矩形波を出力してヒット判定を下す。そのため式 3.5 の符号が負から正に変わるときにヒットとなる。

信号が入ってきていないとき、 $I_1 = I_2 = I_0/2$ となる。したがって式 3.5 は $V_{Out1} - V_{Out2} = V_{th1} - V_{th2} - (R_1 - R_2)I_0/2$ となる。これより、無信号時のオフセットが $V_{th1}, V_{th2}, R_1, R_2$ で決まることがわかる。このオフセットが閾値を決定する要素の 1 つである。

次に、信号が入ってきたときのことを考える。このとき、In2 に荷電粒子由来の信号が入力されるので、この MOSFET のソース、ドレイン間を流れる電流量 I_1 が増える。すると、抵抗列での電圧降下 $R_1 I_1$ が増加するため、 V_{Out1} の電位が下がる。逆に、式 3.2 よりもう一方のブランチを流れる電流 I_2 は小さくなるので、 V_{Out2} の電位は上がる。これにより、図 3.1d のように電圧が変わる。そのため、この電圧変化によりオフセットを超えて式 3.5 の符号が負から正に変わる電荷量が閾値になる。このとき、式 3.3, 3.4 で示されるように、電圧変化は抵抗 R_1, R_2 の値にも依存する。この信号増幅が閾値を決定する要素の 2 つ目である。このように、 $V_{th1}, V_{th2}, R_1, R_2$ の組み合わせで閾値

が決まる。

3.1.3 テスト電荷の入力

本研究に用いたフロントエンドチップにはテスト電荷を入れる機能がある。これにより、4章で説明する閾値調整、閾値測定や読み出し系の健全性を確認できる。テスト電荷の入力にはアナログ回路に入れるものと、アナログ部分をバイパスしてヒット処理回路にデジタルパルスを入れるものの2種類ある。閾値調整と閾値測定に使われるアナログ回路に入れるテスト電荷入力を説明する。図3.4はテスト電荷入力回路の回路図である。この回路がピクセル毎にある。2つのDC電圧(V_{cal_Hi} , V_{cal_Med})に異なる電圧を印加すると、 C_{inj} に電荷 $Q_{inj} = C_{inj}(V_{cal_Hi} - V_{cal_Med})$ が蓄えられる。そして、S0もしくはS1に送られる制御信号がLowからHighに切り替わった時にキャパシタに蓄えられた電荷がアナログフロントエンド回路に流れる。このとき、 V_{cal_Hi} , V_{cal_Med} と2つの電圧差を用いることで、チップ内の局所的なGNDドロップの影響を受けにくくしている。 C_{inj} の公称値は8.02 fFであるが、製造過程でばらつく。各ピクセルの回路における C_{inj} は測定できないが、測定できる参照用のキャパシタが用意されている。本研究では、この参照用キャパシタで測定された静電容量を使った。

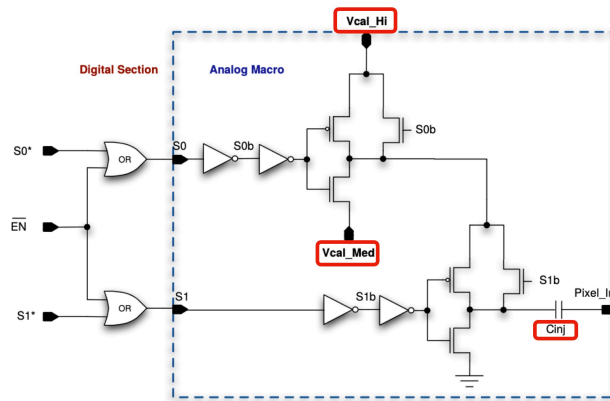


図 3.4: テスト電荷入力回路の回路図

3.2 閾値を決定するパラメータ

本節では、PreCompで導入される閾値が、具体的にどのレジスタで決定されるのかを説明する。ここでは概念的な説明に留め、実際のフロントエンドチップの応答は5章で見る。本研究で扱った閾値を決定するレジスタは大きく分けて3種類ある。(i) グローバル閾値調整レジスタ、(ii) ピクセル別閾値調整レジスタ、さらに、(iii) ピクセル別調整レジスタの感度を変えるレジスタである。

3.2.1 グローバル閾値調整レジスタ (V_{th1} , V_{th2})

3.1.2で説明したように、閾値を決める要素として、 V_{th1} , V_{th2} がある。これらはそれぞれ、DAC_TH1_DIFF, DAC_TH2_DIFFというレジスタが対応する(以下、 V_{th1} , V_{th2} と表す)。ここで、 V_{th1} , V_{th2} のレジスタ値が V_{th1} , V_{th2} ではないことに注意がある。5章で実際にこのレジスタ値を変化させた際の応答を見る。また、これらはフロントエンドチップ全体で共通するグローバルレジスタであり、ピクセル毎に値を調整することはできない。そのため、閾値を決める際には、各ピクセルの閾値のばらつきは変えずに、全ピクセルの平均を変える。

3.2.2 ピクセル別閾値調整レジスタ (TDAC)

3.1.2で説明したように、閾値を決める要素に R_1 , R_2 もあった。これらは2のブランチそれぞれにおける、!D[0]~!D[3]で大きさを変えられる4つの抵抗列の合成抵抗値である。この抵抗値はTDACと呼ばれる5bitのレジスタ

によって、 R_1, R_2 をまとめて扱う。4bit で!D[0]~!D[3] の 4 つの抵抗を有効にするか選ぶ。5 番目の bit は符号ビットであり、2 つのブランチのどちらの抵抗列を有効にするかを選べる。TDAC は-15~15 の値をとる。このレジスタはピクセル毎に調整できる。そのため、閾値を決める際には、ピクセル毎のばらつきを小さくする。

3.2.3 TDAC の感度を定めるグローバルレジスタ (DiffPreComp)

3.1.2 では、信号が来た際に 2 つのブランチを流れる電流が変わり、それぞれの抵抗列での電圧降下量が変わることで、出力電圧 V_{Out1}, V_{Out2} が変わることを見た。このとき、抵抗列での電圧降下量は、 $R_i I_i (i = 1, 2)$ である。よって、TDAC で決まる抵抗値だけではなく、電流値も閾値に影響を与える。そして、2 つのブランチを流れる電流には式 3.2 の関係式があり、 I_0 は DAC_PRECOMP_DIFF レジスタ（以下、DiffPreComp と表す）で決まる。よって、DiffPreComp が大きいと $I_i (i = 1, 2)$ が大きくなるため、TDAC で変わる閾値の変化幅が大きくなる。このように、閾値を決める際には、TDAC を変えたときの閾値変化幅 (感度) を変える性質を持つ。この性質は、目標閾値に到達できる調整幅と、各ピクセルで測定される閾値の分布の幅に関わる。例えば、TDAC 感度が小さすぎると、分布の端のピクセルが目標へ届かず飽和 (TDAC 上限/下限) するピクセルが増える。一方で感度が大きすぎると、TDAC を 1 bit 変化させたときの閾値変化が大きいため、各ピクセルで測定される閾値の分布の幅が大きくなる。よって、DiffPreComp は十分なレンジを確保しつつ、幅が大きくなりすぎない値を選ばなければならない。また、DiffPreComp はフロントエンドチップ全体で共通するグローバルレジスタである。

第4章

閾値の調整と測定

本章では、閾値の調整方法と、調整後に閾値を測定する方法を説明する。

4.1 閾値の測定手法

3章で説明したように、フロントエンドチップの閾値は複数のレジスタ値の組み合わせで決まる。閾値がどのくらいの電荷量に相当するかを確認するためには閾値を測定する必要がある。そのため、この節では閾値の測定手法を説明する。

4.1.1 測定のアプローチ

ここでは、閾値測定のアプローチを説明する。閾値の測定には、3章で説明したテスト電荷を用いる。図4.1はテスト電荷を複数回注入した際の電荷量分布である。テスト電荷を注入する回路にはノイズが乗る。そのため、実際に注入される電荷量はばらつく。閾値よりも大きな電荷が注入されるとヒットとなるので、図4.1における赤色で塗った部分の積分値がヒット回数となる。

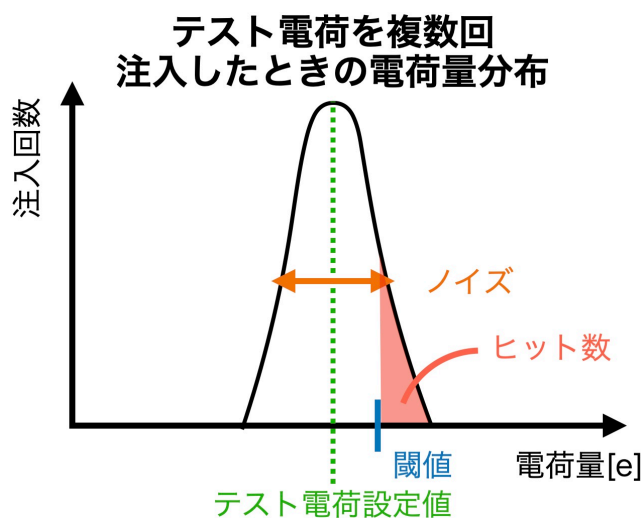


図 4.1: テスト電荷を複数回注入した際の電荷量分布

このテスト電荷を用いて、閾値は以下のような手順で測定される。

1. 最初にテスト電荷の最小値 Q_{injmin} 、最大値 Q_{injmax} 、変化幅 Q_{step} を決め、テスト電荷の初期値を最小値 Q_{injmin} にする。
2. テスト電荷 Q_{inj} を各ピクセルに対して N_{inj} 回注入し、ヒット回数 N_{hit} を数える。
3. テスト電荷 Q_{inj} の値を Q_{step} だけ変化させ、最大値 Q_{injmax} に到達するまで2を繰り返す。最大値 Q_{injmax} に到達したら4に進む。

4. 横軸をテスト電荷 Q_{inj} 、縦軸をヒット回数 N_{hit} として図 4.2b のようなグラフを作成する。
5. 4 で得られたグラフの測定点を式 4.1 でフィットする。ここで得られる μ が閾値である。

図 4.2 は、閾値測定 の概念図である。図 4.2a は、テスト電荷の大きさを 変えながらヒット回数を求める過程を示し、手順 2、3 に対応する。図 4.2b は、手順 4 で作られるグラフの概念図である。この形状から、S-curve と呼ばれる。

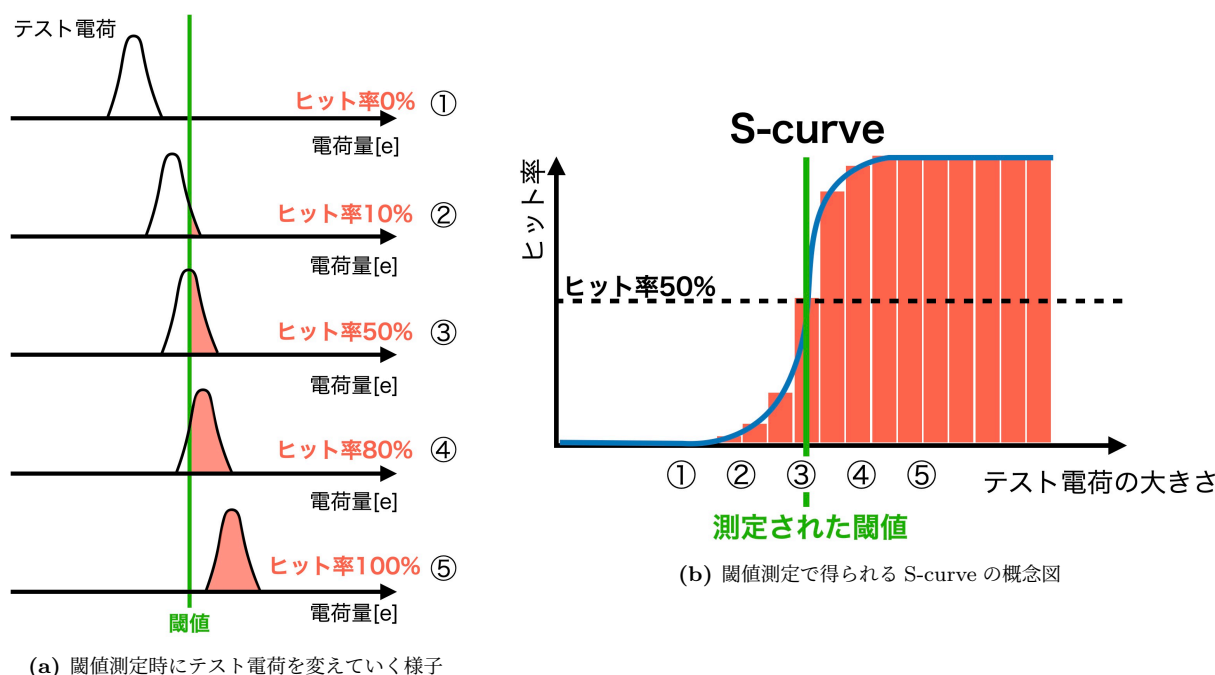


図 4.2: 閾値測定 の概念図

$$f(x) = N_0 + \frac{1}{2} N_1 (1 + \operatorname{erf}(\frac{x - \mu}{\sqrt{2}\sigma})) \quad (4.1)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (4.2)$$

ここで、 N_0 : ベースライン、 N_1 : N_{hit} に対応するフィッティングパラメータ、 μ : 測定された閾値、 σ : 測定されたノイズである。本研究では YARR[16] の測定アルゴリズムを用いた。一般に、各測定点には二項分布の誤差が付くが、YARR のアルゴリズムでは誤差を 1 に固定してフィットする。YARR のアルゴリズムには、4.1.2 で述べるフィット後にフィットが成功したか判別するプログラムがある。また、測定の手順 5 において、テスト電荷が最大値 $Q_{inj_{max}}$ のときにヒット回数 N_{hit} が 0 の場合はフィットが実行されない。本研究では、フィットが実行されなかったものも、測定に失敗したとみなす。フィット成功の具体的な判別基準は 4.1.2 で説明する。

4.1.2 測定 の失敗

YARR の閾値測定アルゴリズムでは、フィット後にフィットが成功したか判別するプログラムがある。具体的な判別基準は以下の通りである。これら全てを満たすときに成功したと判別される。

1. μ (閾値の測定結果) が $Q_{inj_{min}} < \mu < Q_{inj_{max}}$ を満たす。
2. σ (ノイズの測定結果) が $0 \leq \sigma$ かつ $\sigma < Q_{inj_{max}} - Q_{inj_{min}}$ を満たす。
3. 誤差を 1 に固定したフィットでの reduced χ^2 (χ^2/ndf) について、 $10^{-6} < \chi^2/ndf < 2.5$ を満たす。
4. フィッティングパラメータ N_0, N_1 に対して、 $|\frac{N_1 - N_0}{N_{inj}} - 1| < 0.1$ を満たす。

4 は、ベースラインとテスト電荷の注入回数に対応するフィッティングパラメータの差が実際のテスト電荷の注入回数と 10% のずれの範囲内で一致することを要求している。また、これらの条件を満たさずフィットが失敗したと判

別されたピクセルの閾値は0として保存される。ここで、測定に失敗したピクセルの S-curve を見てみると、大きく分けて2つに分類できることが分かった。それはピクセルの動作の健全性による分類である。Analog scan とよばれる、閾値よりも十分に大きいテスト電荷を100回注入する試験がある。閾値測定の前に実施した Analog scan でヒット率が100%となったピクセルを動作正常とし、それ以外を動作異常と定義した。そして、図4.3は、実際に測定したときの S-curve の一例を分類別にプロットしたものである。図4.3aは正常に測定に成功したピクセルの S-curve の一例である。図4.3b,4.3cはどちらも測定に失敗したピクセルの S-curve の一例である。動作が異常なピクセルの S-curve はベースラインが0でなく、またヒット率が100%を超えている点もある。一方で動作が正常だが測定に失敗したピクセルの S-curve は、測定に成功したピクセルの S-curve とあまり違いは見られない。このような測定の失敗については、7章で考察する。

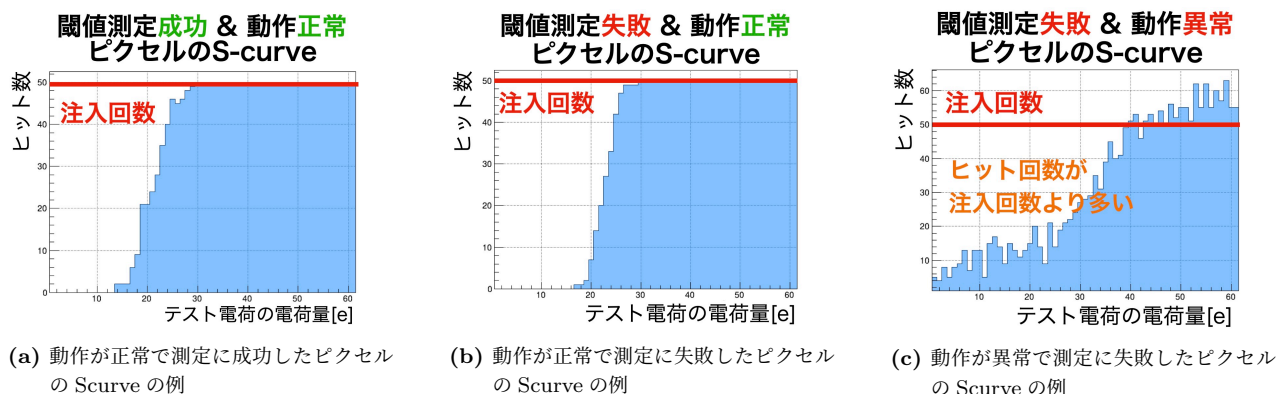


図 4.3: 測定に失敗したピクセルの Scurve の分類

4.2 閾値の調整手法

閾値調整の目的は、全ピクセルの閾値を目標値に近づけることである。3章で説明したように、閾値はチップの内部回路の設定を保持するレジスタ値によって決まる。よって、このレジスタ値を書き換えることで、閾値を調整する。閾値調整で書き換えるレジスタは、大きく分けて2つある。グローバル閾値調整レジスタ (Vth1, Vth2) とピクセル別閾値調整レジスタ (TDAC) である。グローバル閾値調整レジスタはピクセル毎のばらつきはそのまま全体の平均値を決め、ピクセル別閾値調整レジスタはピクセル毎のばらつきを小さくする役割がある。そのため、先にグローバル閾値レジスタで粗く調整し、その後ピクセル別閾値レジスタを調整する。このとき、ピクセル別閾値レジスタを調整する前にグローバル閾値レジスタで閾値を下げすぎてしまうとノイズの影響を受け調整に失敗するという先行研究がある [12]。そのため、一連の閾値調整においては、グローバル閾値レジスタ調整で仮の目標閾値を設定する。最終的な閾値調整の目標閾値を $Q_{finaltarget}$ とすると、グローバル閾値レジスタ調整の目標閾値は $Q_{finaltarget} + 200 e$ 、ピクセル別閾値レジスタ調整の目標閾値は $Q_{finaltarget}$ といった具合である。200 という数値は、現在の品質検査試験で用いられている値である。

図 4.4 は2つの閾値調整に共通する概念図である。また、調整の基本的な流れは以下の通りである。

1. 目標閾値 (例: 600e など) を決める。
2. 閾値が目標に近づくように、レジスタ値を更新する。
3. 目標閾値と同じ電荷量のテスト電荷のヒット率を測定し、目標との差を確認する。
4. 目標との差が基準を満たす、もしくは規定のレジスタ値更新回数に達するまで手順 2、3 を繰り返す。

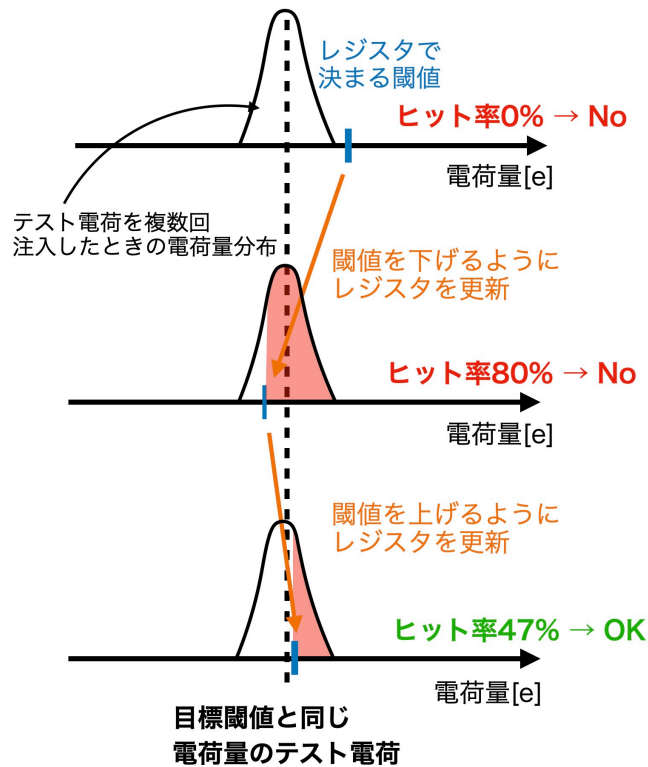


図 4.4: 2つの閾値調整に共通する概念図

グローバル閾値レジスタの調整とピクセル別閾値レジスタの調整では、具体的な調整方法や上記手順 4 の基準が異なる。そのため、その具体的な調整方法や基準についてそれぞれ以下に説明する。

4.2.1 グローバル閾値レジスタ調整

グローバルレジスタは、チップ全体に共通の設定である。グローバル閾値調整レジスタには V_{th1} , V_{th2} の 2 つが存在し、ともに 10 bit の値を取れる。この 2 つのレジスタの差で閾値が決まる。そのためグローバル閾値調整では V_{th2} を固定し、 V_{th1} を動かすことで調整する。2 つのレジスタの差が重要であるため、 V_{th2} の固定値は何でもよい。本研究では品質保証検査と同じ 50 に設定した。手順は以下の通りである。

1. 目標閾値 Q_{target} を決め、テスト電荷を $Q_{inj} = Q_{target}$ にセットする。
2. V_{th1} の初期値を 400、調整幅の初期値を -32 にセットする。
3. テスト電荷を 50 回注入し、ヒット数が 1~49 であったピクセル数 N_{entry} を記録する。
4. N_{entry} が前よりも増加した場合、 V_{th1} に調整幅を加えて 2 に戻る。
 N_{entry} が前よりも減少した場合、調整幅を $-1/2$ 倍して更新してから V_{th1} に調整幅を加えて 2 に戻る。
5. 手順 3,4 を繰り返す、調整幅が 0 になる、もしくは $V_{th1} = 0$ になったら終了。

図 4.5 は、実際のグローバル閾値調整の過程の様子である。各グラフの横軸はヒット回数を、縦軸はそのピクセル数を表している。最初は目標閾値よりも実際の閾値が大きいため、ヒット数が 1~49 の範囲のうち、注入回数の半分である 25 回よりも少ないピクセルが多い。しかし、図 4.5a~4.5d の変化を見ると、ヒット数が 25 以上となったピクセルの数が徐々に増えていき、図 4.5d,4.5e ではヒット数 25 を中心としたグラフの左右のバランスが逆転していることがわかる。そして、最終的には概ね左右対称なグラフとなり、全ピクセルの平均閾値を目標閾値に近づけられていることがわかる。

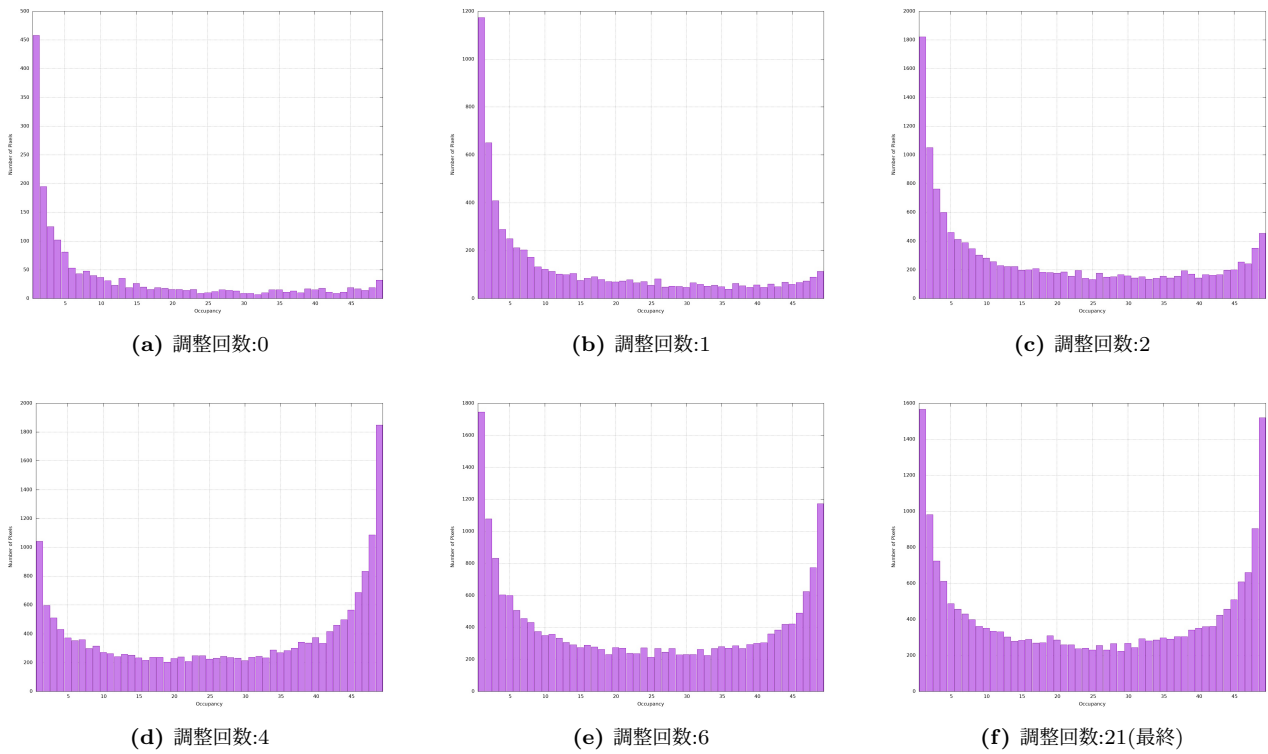


図 4.5: グローバル閾値調整の過程

4.2.2 ピクセル別閾値レジスタ調整

図 4.6 は、ピクセル別閾値レジスタ調整の概念図である。グローバル調整だけでは、ピクセル間のばらつきが残るため、各ピクセルに個別の補正値を与えてばらつきを減らす。この補正を担うのがピクセルレジスタであり、TDAC と呼ばれる。TDAC は-15~15 の値を取る。

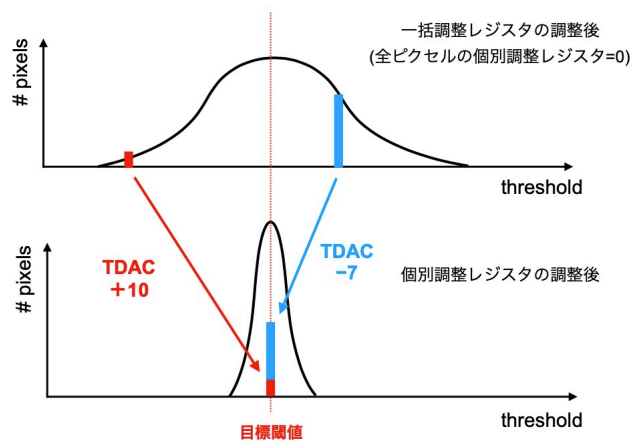


図 4.6: ピクセル別閾値レジスタ調整の概念図 [12]

ピクセル調整では、注入するテスト電荷に対するヒット率を用いる。手順は以下の通りである。

1. 目標閾値 Q_{target} を決め、テスト電荷を $Q_{\text{inj}} = Q_{\text{target}}$ にセットする。
2. テスト電荷を 50 回注入し、ヒット率が特定の範囲内 ($50 \pm N\%$) にある場合は TDAC を変更しない。
範囲外にある場合は、ヒット率が 50% に近づく方向に特定の変化幅 (step) を TDAC に加える。
3. 2 を 14 回繰り返す。特定の範囲を決める N 、特定の step は、14 回の繰り返しでその都度決められた値をと

る。^{*1}。14回繰り返されたら終了。

図 4.7 は、実際のピクセル別閾値調整の過程の様子である。横軸が1~49のヒット回数で、縦軸がピクセル数である。先述した通り、グローバル閾値レジスタ調整では、仮の目標閾値としてピクセル別閾値レジスタ調整の目標閾値+200eに調整した。そのため、最初はヒット率が50%よりも小さいピクセル数が多い。また、調整回数が8回目までは、ピクセル毎のばらつきが大きいいためヒット率が50%近傍よりも0%,100%近傍のピクセル数が多い。しかし、調整回数が9回目に達するとピクセル毎のばらつきが小さくなり、ヒット率が50%近傍のピクセルが増え、凹字型の分布が凸字型の分布になる。

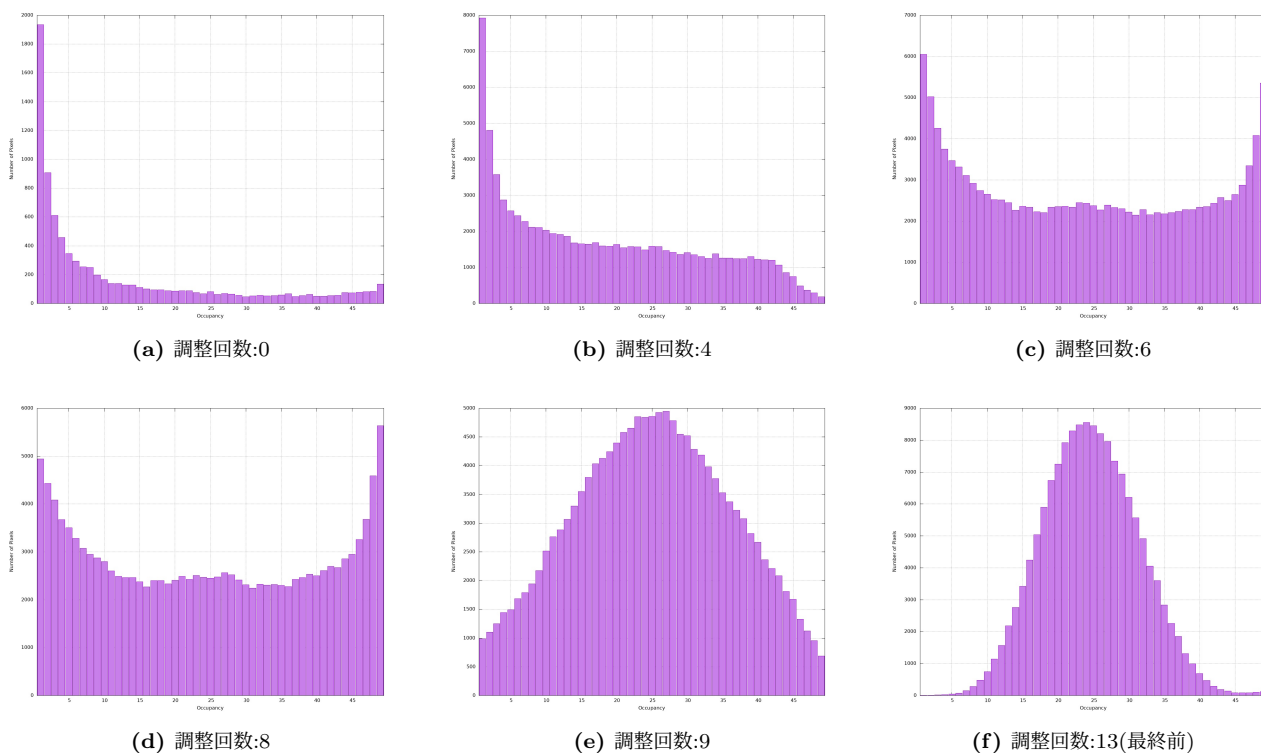


図 4.7: ピクセル別閾値調整の過程

^{*1} ヒット率の許容範囲を決める N は 14 回の繰り返しにおいて順に、 $N = 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 10, 20, 30, 40$ である。同様に $\text{step} = 4, 4, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 2, 1, 1, 1, 1, 1$ である。

第 5 章

閾値測定と閾値を決定するパラメータとその応答

3 章で見たように、複数の閾値を決めるパラメータがある。これまでは、回路図でそのパラメータを変えたときの、閾値の変化を予測した。閾値調整を評価する前に、各パラメータが実際に期待通りの応答を示すか確かめる必要がある。そのため、この章では実機仕様のモジュールでの結果を示す。また、その前に準備段階として、閾値測定の精度が本研究に十分であるか確認する。

先に、本研究で用いた検出器モジュールをここで示す。本研究では 1 つの検出器モジュールを用いて重点的に調べた。その後、他のモジュールでも同様の挙動を示すのか確認するため、最後にもう 1 つの検出器モジュールで同様の調査をし、結果を比べた。時間的な制限から、調べられたのは合計で 2 つの検出器モジュールとなった。検出器モジュールはモジュールシリアル番号と、それを構成する 4 枚のフロントエンドチップのシリアル番号で管理する。本研究に用いた検出器モジュールのシリアル番号は以下の通りである。

表 5.1: 本研究に用いた検出器モジュールおよびフロントエンドチップのシリアルナンバー

検出器モジュール	チップ 1	チップ 2	チップ 3	チップ 4
20UPGM23603060	0x20f26	0x20dd7	0x20db8	0x20dc8
20UPGM23603020	0x20f83	0x20f8d	0x20f64	0x20f79

5.1 本研究での閾値測定のパラメータ設定

4 章で閾値測定のアプローチを説明した。さらに、測定に失敗することがあることも述べた。本節の目的は、本研究で十分な精度と成功率の測定パラメータを決めることである。閾値測定には以下のパラメータがある。テスト電荷の最小値 $Q_{inj_{min}}$ 、最大値 $Q_{inj_{max}}$ 、変化幅 Q_{step} 、注入回数 N_{inj} である。テスト電荷の最小値 $Q_{inj_{min}}$ 、最大値 $Q_{inj_{max}}$ によって測定範囲が決まる。そのため、測定する試験に合わせてその都度範囲を決めた。変化幅 Q_{step} 、注入回数 N_{inj} は測定精度や測定の成功率に影響しうる。そのため、本研究の測定で十分な精度と成功率のパラメータ範囲を調べる。

5.1.1 テスト電荷注入回数

この節では、テスト電荷注入回数を変えたときの応答を示す。今回はテスト電荷注入回数を 50, 100, 150, 200 に決め、それぞれ 30 回ずつ測定を繰り返した。いずれも目標閾値 $1500e$ に一度調整し、その閾値を決定するレジスタを変更せずに閾値測定のみを繰り返した。よって各ピクセル毎の真の閾値は一連の測定を通して変わらない。

測定失敗数

4章で説明した通り、YARRのアルゴリズムでは測定に失敗することがある。テスト電荷注入回数が、測定を複数回繰り返したときの失敗回数とそのピクセル数にどう影響するかを見た。

図5.1は、テスト電荷注入回数と測定失敗回数に関係があるかを調べるために作ったグラフである。x軸はテスト電荷注入回数、y軸は測定失敗回数、z軸はそのピクセル数を表している。ここでy軸について、測定失敗回数が0となったピクセル数は除外している。1つのフロントエンドチップあたりのピクセル数は153600個であるため、測定に失敗しているのは数%程度である。全てのチップに共通して言えることは、失敗回数が30となるピクセル数が、他の失敗回数に比べて圧倒的に多いということである。今回の測定回数は30回であるので、これは特定のピクセルが測定に毎回失敗しているということを示している。しかし、シリアル番号が0x20dd7のチップは測定失敗回数が30以外の多くの数字で見られる。この挙動の原因はまだわかっておらず調査中である。しかし、ここでは測定失敗回数がテスト電荷注入回数に依存するのかを調べるのが目的であるため、別問題である。この図から分かったことは、テスト電荷注入回数と測定失敗回数に相関はないということである。

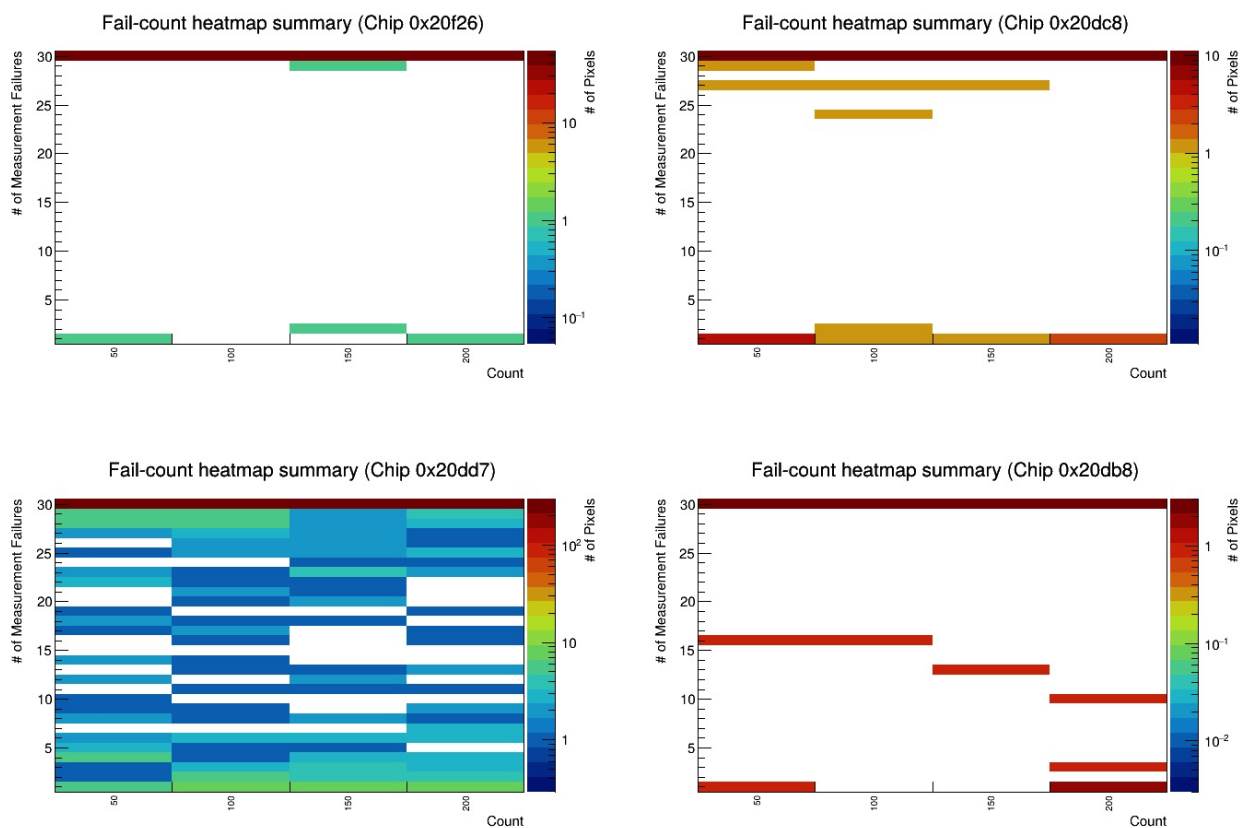


図 5.1: フロントエンドチップ別 テスト電荷注入回数と測定失敗回数の関係

測定精度

真の閾値が同じであっても、測定する際に計測されるヒット数は二項分布でばらつくため、毎回測定結果が同じになるとは限らない。そのため、測定を複数回繰り返したときの標準偏差から測定精度を求める。このとき、測定に失敗することがあるため、成功した測定値のみを標準偏差の計算に用いた。

図5.2は、テスト電荷注入回数と測定された閾値の関係を示したグラフである。縦軸の点が測定された閾値分布の平均、誤差棒の大きさは標準偏差の平均である。測定された閾値の平均値そのものについてはチップ毎にばらつきがあるが、これは調整の良し悪しによるものである。測定された閾値の平均値は、テスト電荷注入回数の変化に対してはあまりばらつきがない。一方で、テスト電荷注入回数が多いほど標準偏差の平均値は小さくなる。これは、テス

ト電荷注入回数が多いほど、ヒット数の誤差が小さくなりフィッティングの精度がよくなるからである。このことから、テスト電荷注入回数が多いほど測定精度が良くなることがわかる。

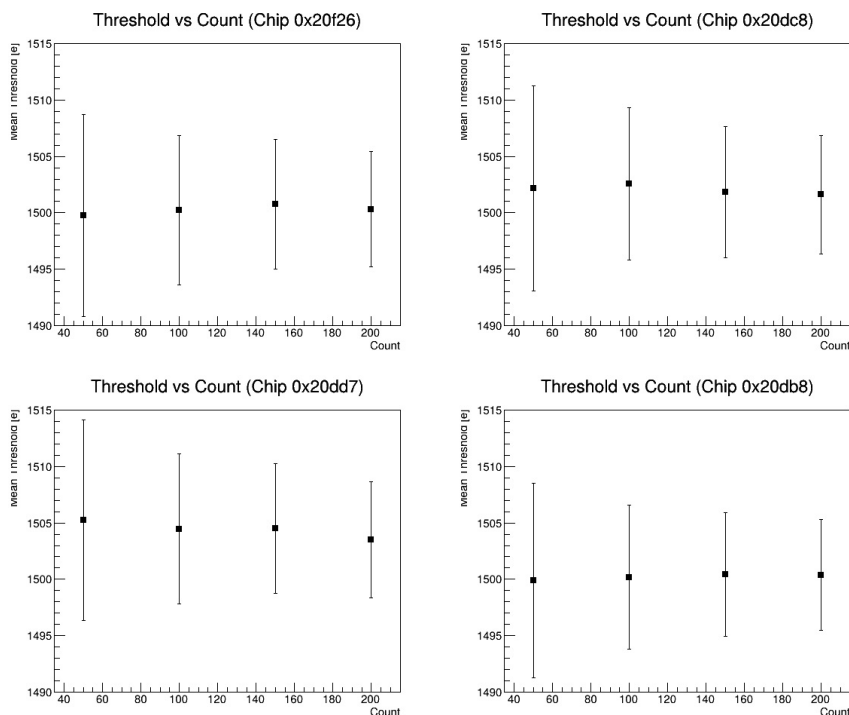


図 5.2: フロントエンドチップ別 テスト電荷注入回数と測定された閾値の平均および標準偏差の平均（誤差棒）の関係

5.1.2 テスト電荷変化幅

この節では、テスト電荷変化幅を変化させたときの応答を示す。テスト電荷変化幅のデフォルト値は 5 である。設定を変えながら、測定失敗数、測定精度を評価基準として調べた。

最初に、テスト電荷変化幅を (1,2,3,4,5,6,10,20,25,30,50,60) に設定し、それぞれ 1 回閾値を測った。図 5.3 はテスト電荷変化幅と測定失敗ピクセル数の関係を表すグラフである。テスト電荷変化幅が 20 を超えると大幅に測定に失敗するピクセル数が増える。これはテスト電荷変化幅が大きくなることで、S-curve におけるヒット率 ε が $0 < \varepsilon < 1$ の範囲をとる測定点が少なくなり、フィットに失敗しやすくなるためである。しかし、テスト電荷変化幅が 20 のときに測定に失敗するピクセル数は多くても 10^2 オーダーであり、総ピクセル数が 153600 であることから十分少ない。テスト電荷変化幅が 10 以下のときはあまり変化が見られない。このことから、テスト電荷変化幅は 10 以下で十分とわかる。

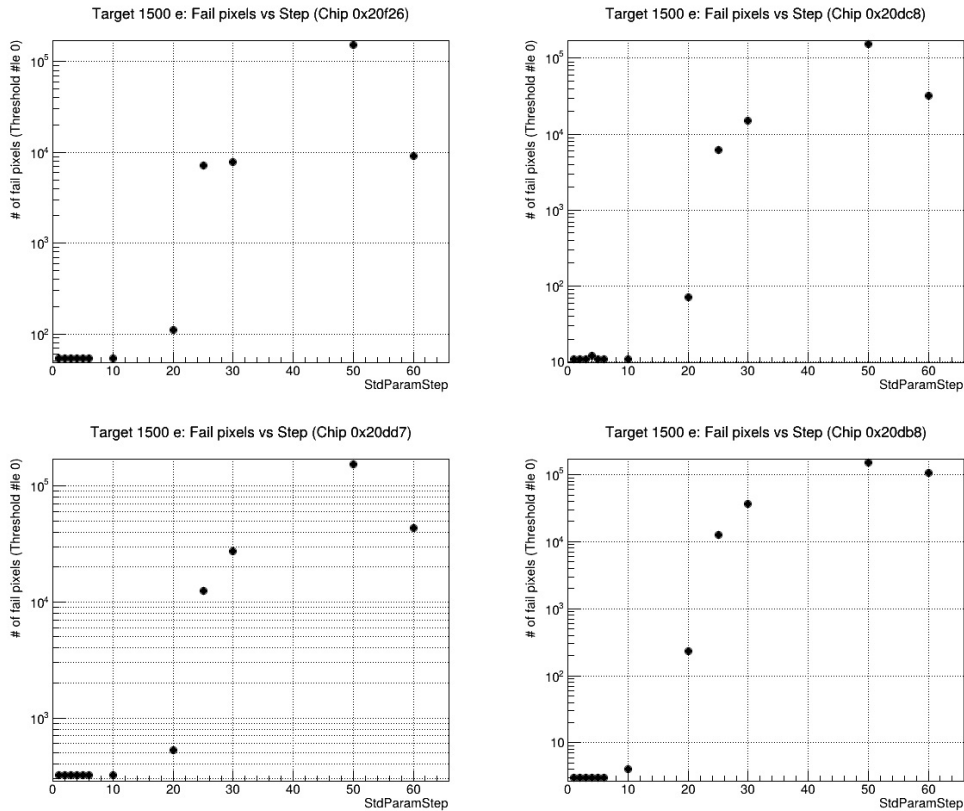


図 5.3: フロントエンドチップ別 テスト電荷変更幅と測定に失敗したピクセル数

測定精度

テスト電荷注入回数の調査時と同様、テスト電荷変化幅が測定精度に与える影響を調べた。こちらも、測定に失敗することがあるため、成功した測定値のみを標準偏差の計算に用いた。図 5.4 は、テスト電荷注入回数と測定された閾値の関係を示したグラフである。縦軸の点が測定された閾値の平均、誤差棒を標準偏差の平均を表す。測定された閾値の平均値そのものについてはチップ毎にばらつきがあるが、これは調整の良し悪しによるものである。測定された閾値の平均値は、テスト電荷変化幅の変化に対してはあまりばらつきがない。一方で、テスト電荷変化幅が小さいほど、標準偏差の平均値は小さくなる傾向が見える。これは、テスト電荷変化幅が小さいことにより S-curve におけるヒット率 ε が $0 < \varepsilon < 1$ の点を多く取ることができるようになり、フィットの精度が良くなるからである。しかし、そこまで大きな違いはないと判断し、本研究ではデフォルト値の 5 を選択した。

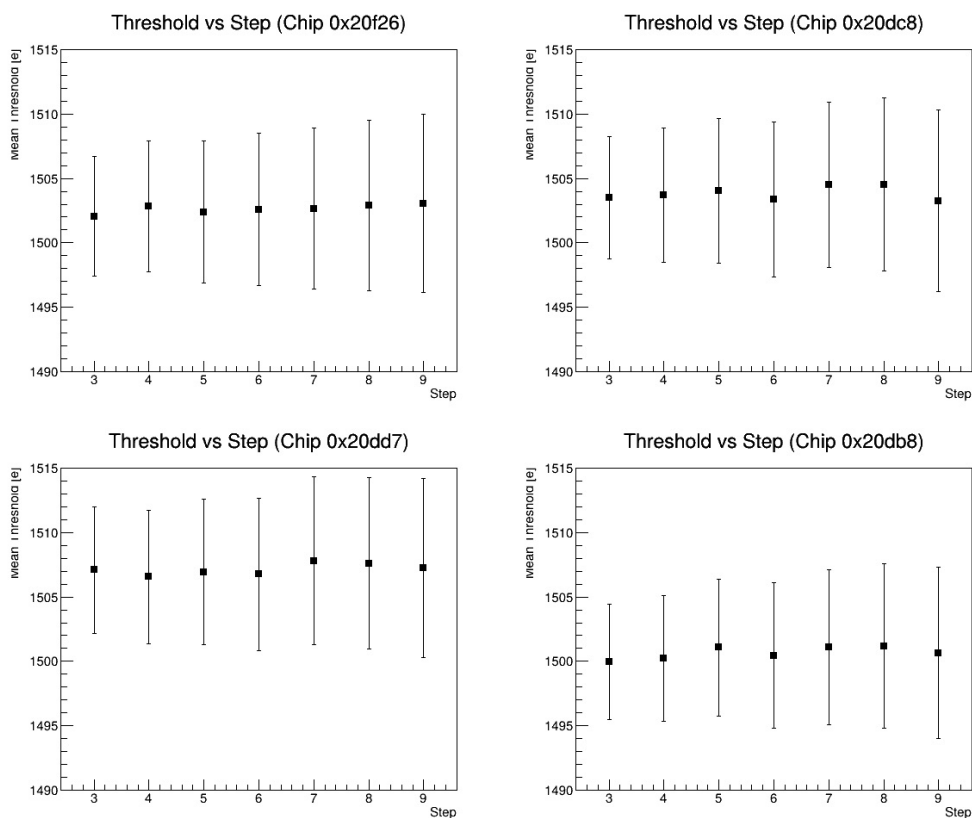


図 5.4: フロントエンドチップ別 テスト電荷変更幅と測定された閾値の平均および標準偏差の平均（誤差棒）の関係

5.1.3 本研究での測定パラメータと測定精度

改めて、今回の測定パラメータは次のように決定した。テスト電荷注入回数：150、テスト電荷変化幅：5 この条件において改めて閾値測定を 100 回繰り返したときの標準偏差の分布が図 5.5 である。

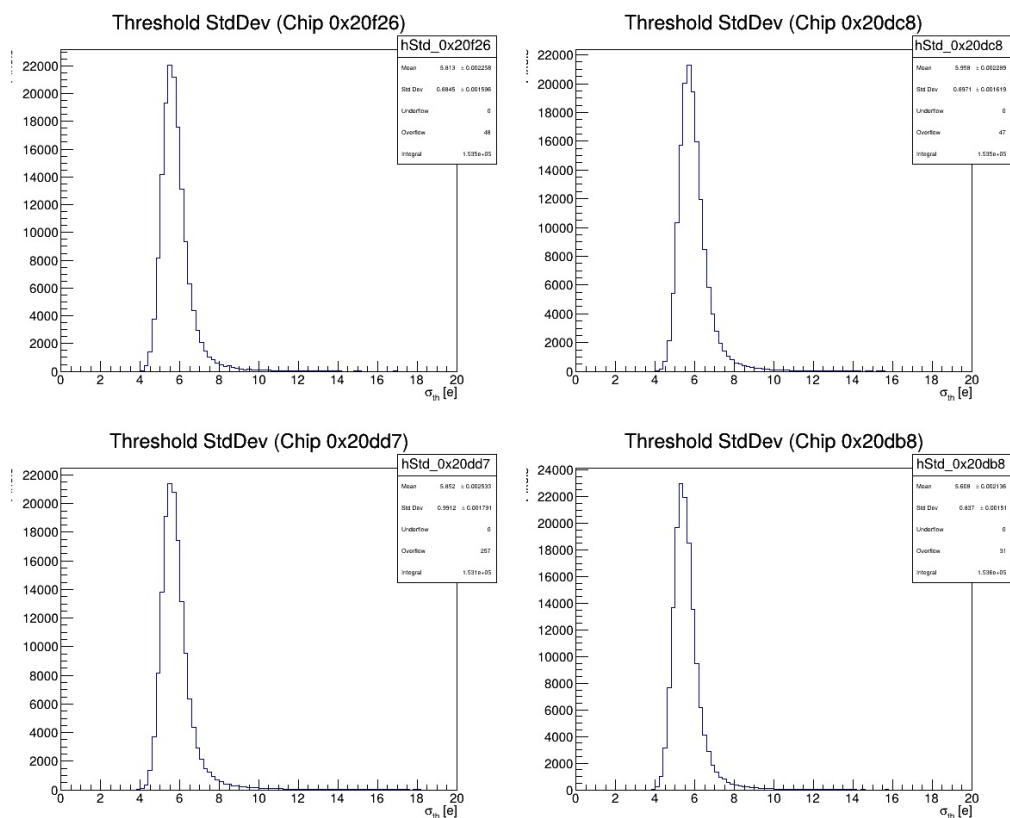


図 5.5: フロントエンドチップ別 本研究での閾値測定標準偏差の分布

この分布をガウス関数でフィットすると平均はいずれのチップにおいても 5e 程度であった。あとで見るように、TDAC で閾値を変化させたときの変化幅は、小さいときでも平均で 20e 程度である。このことから、本研究における閾値測定は、十分良い精度があると言える。

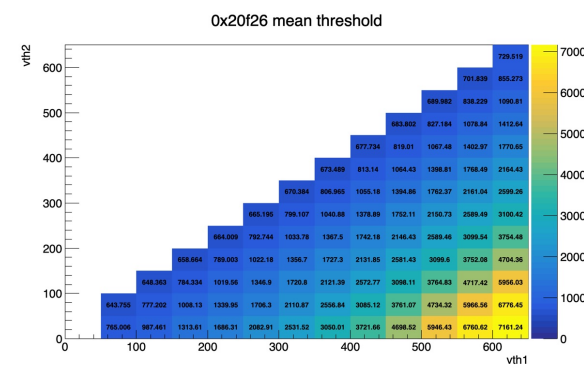
5.2 閾値を決定するパラメータとその応答

この節では、3 章で説明した閾値のパラメータを変えたときの応答を見る。ここでの目的は、実機仕様の検出器モジュールが 3 章で説明したような応答を示すのか実際に確かめることである。

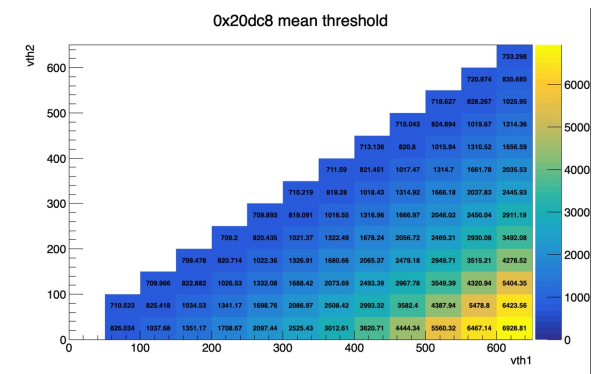
5.2.1 グローバル閾値調整パラメータ (Vth1, Vth2)

3 章で説明したように、グローバル閾値調整パラメータ Vth1, Vth2 はチップ全体における平均閾値を変化させる役割を持つ。これら Vth1, Vth2 を変化させたときに閾値がどう変化するかを調べた。そのため、2 つのパラメータをそれぞれ 50 刻みで変化させて、その都度閾値を測定した。今回は $0 \leq Vth2 \leq Vth1 \leq 700$ の範囲で変えた。

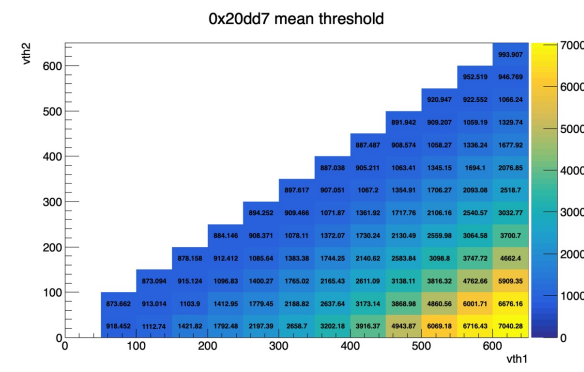
図 5.6 は x 軸に Vth1、y 軸に Vth2、z 軸に測定された閾値の平均値 [e] をプロットしたグラフである。3 章の説明通り、Vth1 と Vth2 の差で閾値が決まり、差が大きいくほど閾値は大きくなるがこの図から確認できる。



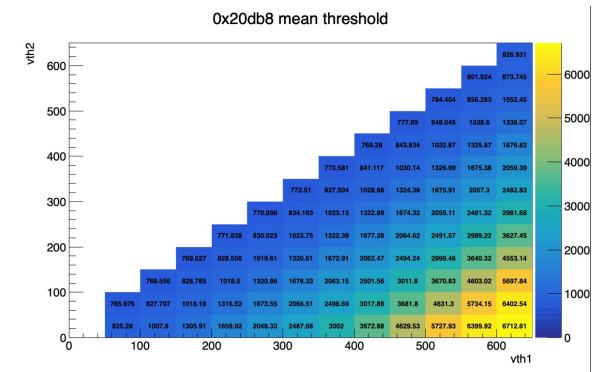
(a) 0x20f26



(b) 0x20dc8



(c) 0x20dd7



(d) 0x20db8

図 5.6: フロントエンドチップ別 グローバル閾値調整レジスタ Vth1, Vth2 を変化させたときの閾値の応答

5.2.2 ピクセル別閾値調整パラメータ (TDAC)

3章で説明したように、ピクセル別閾値調整パラメータ TDAC はピクセル別に閾値を調整し、ばらつきを小さくする役割を持つ。この TDAC を変化させたときに閾値がどう変化するかを調べた。調べ方としては、まず Vth2=50 に固定し、Vth1=(80,105,130,155,180,205,235,260) と変えた。そして、それぞれの Vth1 に対して TDAC を-15 から 15 まで 1 刻みで変え、その都度閾値を測定した。図 5.7 にその典型的な結果を示した。横軸が TDAC、縦軸が Threshold(TDAC) - Threshold(TDAC = 0) を示しており、複数の Vth1 に対して重ね書きした。TDAC が大きくなるほど閾値も大きくなっていることがわかる。Vth1 によっては、TDAC が正の領域と負の領域で傾きがやや異なっているようにも見える。図 5.7b の閾値が横ばいになっている測定点は、TDAC を下げすぎたことにより測定に失敗し、0.0 と記録されている点である。これは代表としてあるチップのあるピクセルの例を示したが、他のチップ、ピクセルにおいても同じような挙動を示す。

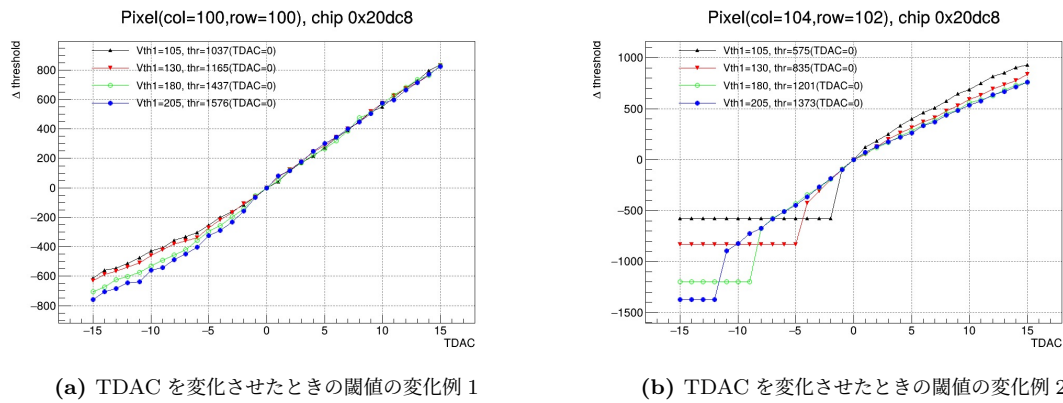


図 5.7: TDAC を変化させたときの閾値の変化

図 5.7 における、TDAC を変化させたときの閾値の変化の割合を、TDAC の傾きと呼ぶことにする。図から、Vth1 の値によって TDAC の傾きが違うことがわかる。TDAC の傾きはピクセル別閾値調整で動かせる最小単位である。よって、これが多くのピクセルに共通する性質なのかを調べるため、TDAC を 1 変化させたときの閾値変化の分布を作った。ここで、TDAC を 1 変化させたときの閾値変化とは、 $\Delta\text{Threshold} = \text{Threshold}(\text{TDAC} = N) - \text{Threshold}(\text{TDAC} = N - 1)$ である。

図 5.8 は、あるフロントエンドチップの TDAC を 5→6 に変化させたときの、ピクセル毎の TDAC の傾きの分布である。これをガウス関数でフィットすることで、TDAC の傾きの平均と標準偏差を求めた。

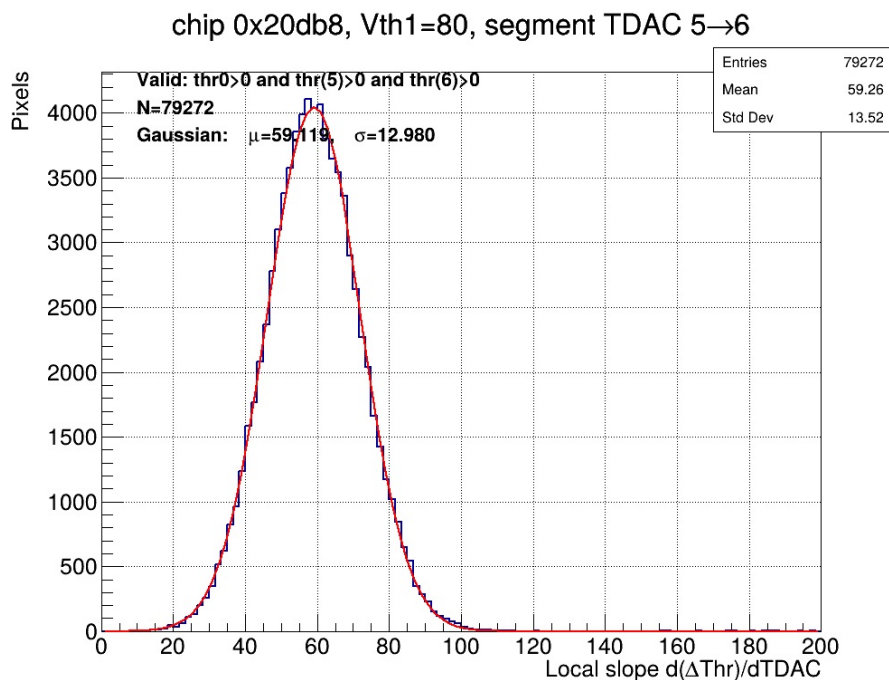


図 5.8: TDAC を 1 変化させたときの閾値の変化

この TDAC の傾きの平均と標準偏差を、TDAC の -15~15 の 1 変化全て (合計で 30 ステップ) で求めた。図 5.9 はそれらをまとめたグラフである。このグラフから次のことがわかる。

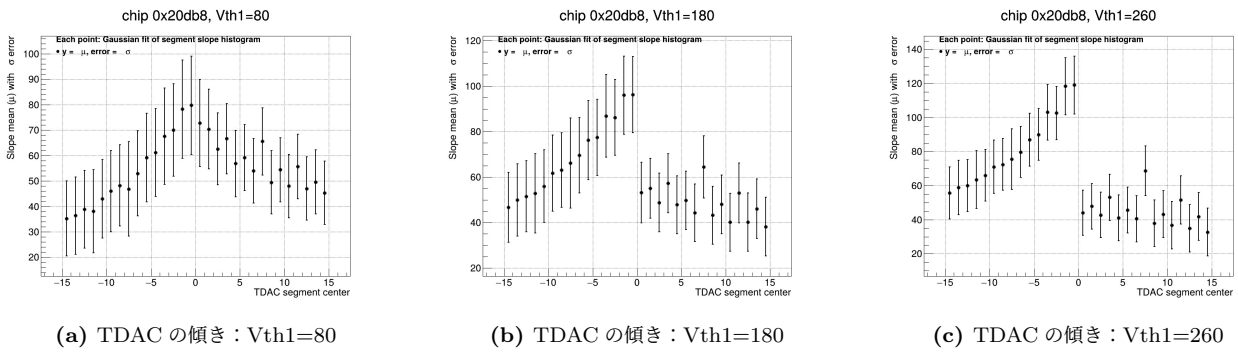


図 5.9: Vth1 別、TDAC の傾きの変化

1. TDAC が負の領域では、TDAC の絶対値が小さいほど TDAC の傾きの平均は大きい。
2. TDAC が負の領域では、Vth1 が大きくなるほど TDAC の傾きの平均は大きくなる。
3. TDAC が正の領域で、Vth1 が小さいとき、TDAC が小さいほど TDAC の傾きの平均は大きい。
4. TDAC が正の領域で、Vth1 が大きくなるにつれて、TDAC の傾きの平均は TDAC に依らなくなる。

さらに、TDAC 1 刻みでの閾値の変化は、Vth1 と TDAC の値に強く依存することがわかった。

また、このような性質からピクセル毎のばらつきはあるが、図 5.10 を用いて次のように TDAC の振る舞いが説明できる。TDAC < 0 のとき、Vth1 の大きさによらず、TDAC が大きくなるにつれて傾きは大きくなる。このとき、Vth1 が大きい方が傾きも大きい。TDAC > 0 のとき、Vth1 が大きい場合は傾きはほぼ一定である。Vth1 が小さいときは、TDAC が大きくなるにつれて傾きは小さくなる。これは図 5.7 の振る舞いと一致している。

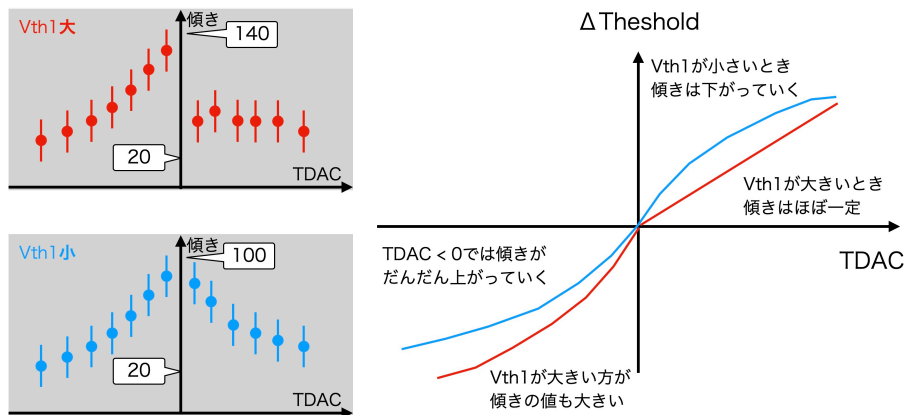


図 5.10: TDAC の振る舞いの説明

このような TDAC の振る舞いは、6 章の結果の解釈が必要になる。

5.2.3 ピクセル別閾値調整パラメータの応答を変化させるパラメータ (DiffPreComp)

3 章で説明したように、DiffPreComp は TDAC を変化させたときの閾値変化の幅を変化させる役割を持つ。DiffPreComp が大きいほど TDAC で調整できる閾値の範囲が広がるが、調整の幅は大きくなる。図 5.11 は複数の DiffPreComp の設定に対して、1500e を目標に閾値調整、その後測定された閾値の分布である。グラフ上の縦の点線は目標閾値 $\pm 120e$ を表している。DiffPreComp が大きいほど、良く調整された中央部分の標準偏差が大きくなるが、目標閾値 $\pm 120e$ に収まるピクセル数は多くなる傾向が確認できる。

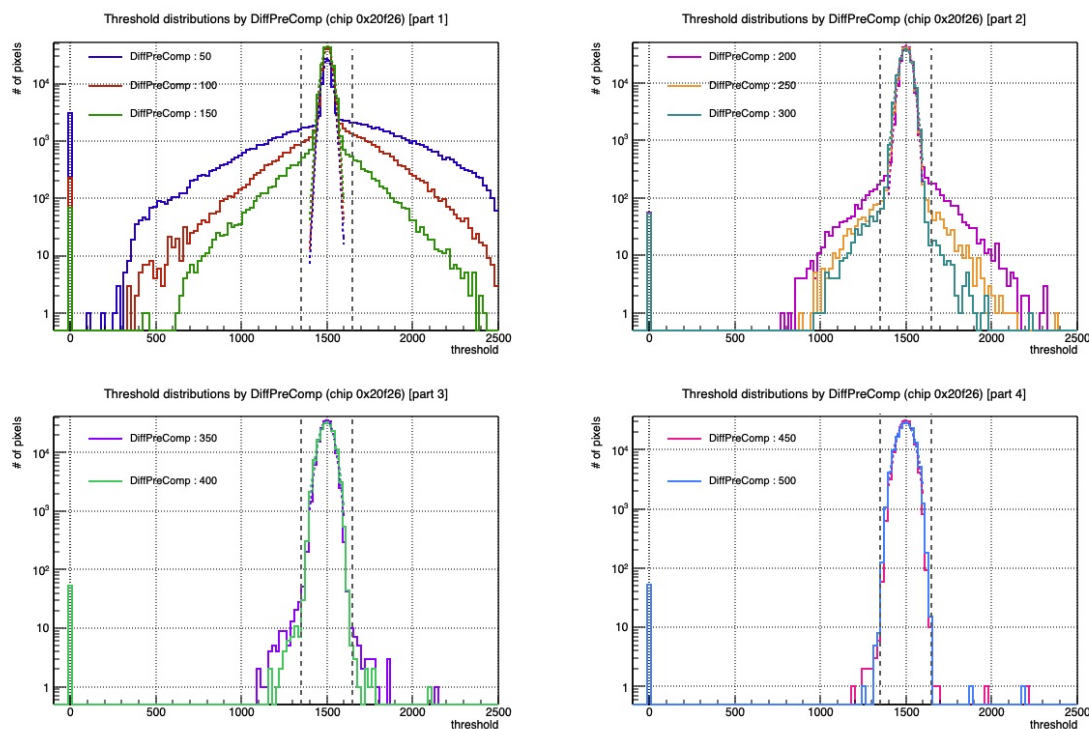
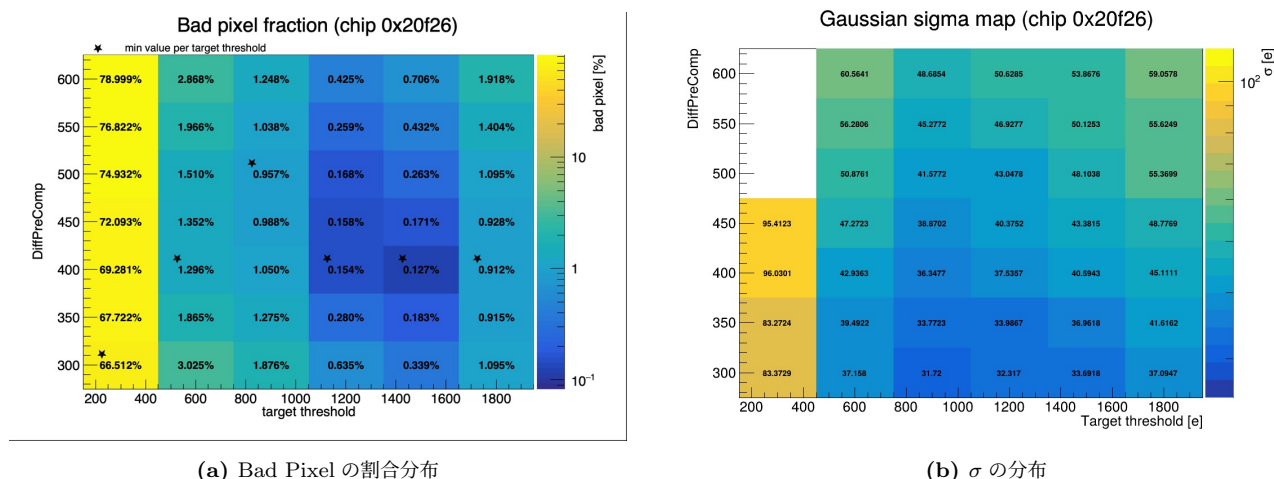


図 5.11: DiffPreComp を変化させたときの閾値分布の違い

また、図 5.11 では目標閾値は 1500e 一つであるが、複数の閾値に対しても、同様に複数の DiffPreComp に設定して閾値調整をした。図 5.12 に、その結果を示す。図 5.12a では x 軸を目標閾値、y 軸を DiffPreComp にとり、z 軸は Bad Pixel の割合である。1 章で述べたように、Bad Pixel とは、調整後に測定された閾値と目標閾値の差の絶対値が 120e 以上のピクセルである。各目標閾値で、最も Bad pixel の割合が低い DiffPreComp に星印をつけた。

図 5.12b は z 軸を、測定された閾値分布のバルク部分をガウス分布でフィッティングした際の σ の分布である。こちらは図 5.11 で見た通り、DiffPreComp が小さい方が σ が小さくなる。



(a) Bad Pixel の割合分布

(b) σ の分布

図 5.12: 目標閾値と DiffPreComp を変化させたときの閾値の応答

そのため、DiffPreComp を小さくして良く調整されたピクセルのばらつきを小さくするか、DiffPreComp を大きくして目標閾値から大きく外れたピクセルを少なくするか、のバランスで最適な DiffPreComp が決まる。DiffPreComp のデフォルト値は 350 である。量産されている検出器モジュールの閾値調整における評価をするためにも、本研究ではまず DiffPreComp を 350 に設定して進めた。

第 6 章

閾値調整結果と不良ピクセルの調査

ここでは、5章で決めたパラメータを用い、閾値を調整した結果を示す。閾値を 400e から 2000e までの範囲で 50e 刻みで調整し、測定した。しかし、閾値には下げられる限界があるため、下限が 400e でないものもある (6.1.3 で後述する)。

6.1 閾値分布の標準偏差の結果

1章で述べた通り、本研究の目的の1つは、閾値分布の中心部をガウス関数でフィットしたときの標準偏差が 40e 未満という基準を満たすかの検証である。本節ではその結果を述べる。最初に例として、1つのフロントエンドチップの 20°C における結果を示す。その後、20, -15°C における、2つの検出器モジュール (計 8 枚のフロントエンドチップ) の結果を示す。

6.1.1 結果の一例

ここでは、フロントエンドチップ 0x20f26 の 20°C における結果を示す。図 6.1 は、調整後の閾値分布の一例である。外れ値を除いた範囲で、この分布をガウス関数でフィットした。これは、1500e に調整したときの例であり、他の目標閾値の分布も同様にフィットした。

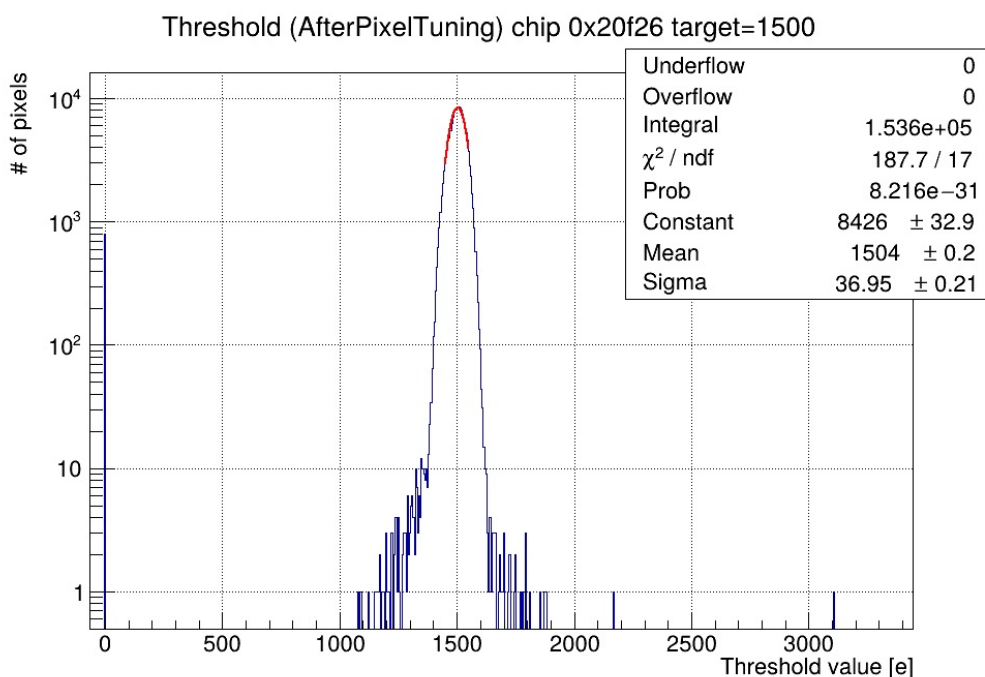


図 6.1: 閾値調整の結果の一例

図 6.2 は、各目標閾値における、ガウス関数フィットで得られた平均値と標準偏差の一例である。左図 6.2a は平均値と目標閾値の関係である。赤線は目標閾値を示す。この例では、目標閾値 400e を除く点で誤差の範囲内で調整できた。右図 6.2 は標準偏差と目標閾値の関係である。ATLAS 実験グループはフロントエンドチップに対して、標準偏差が 40 未満であることを要求する。この例では、400e と 600e から 1700e の範囲では ATLAS 実験グループの要求を満たした。

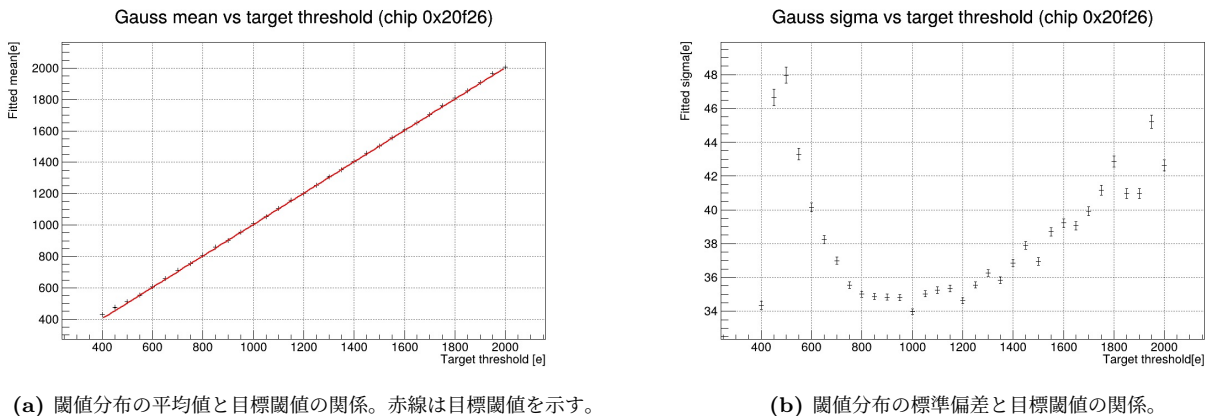


図 6.2: 各目標閾値における、ガウス関数フィットで得られた平均値と標準偏差

6.1.2 20,-15 度における 2 つの検出器モジュールの結果

ここでは、本研究の調査対象である 2 つの検出器モジュールの結果をまとめて示す。それぞれのグラフは、6.1.1 と同様の解析で得られた。ここでは結果を示すだけで、次の小節で結果をまとめて解釈する。

検出器モジュール：20UPGM23603060

20°C における結果

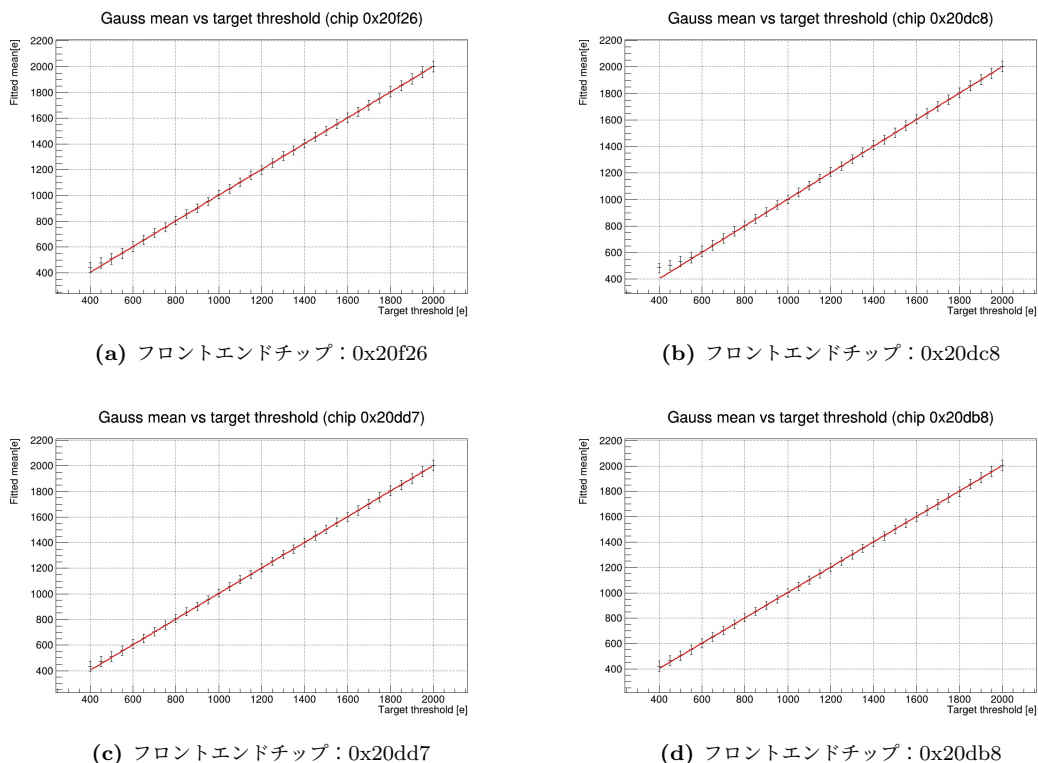
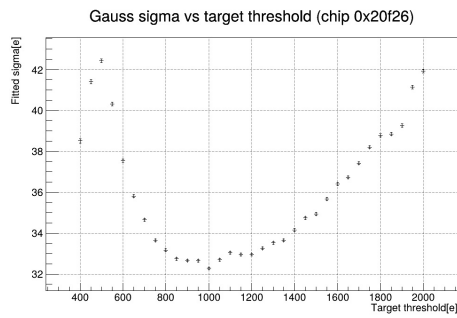
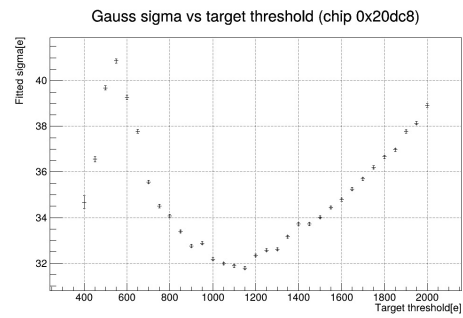


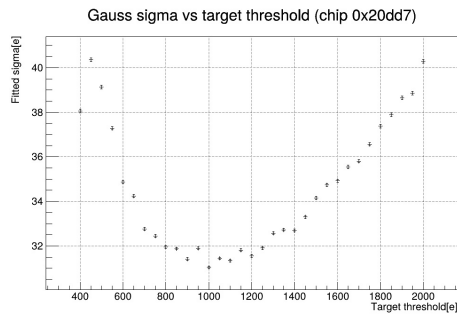
図 6.3: 調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの平均値。赤線は目標閾値を示す。



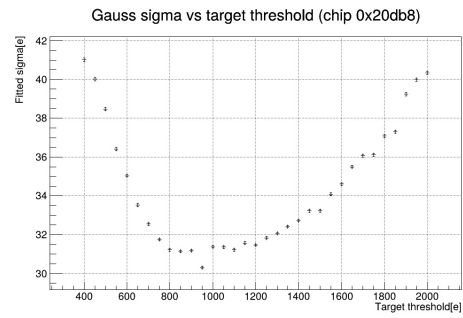
(a) フロントエンドチップ : 0x20f26



(b) フロントエンドチップ : 0x20dc8



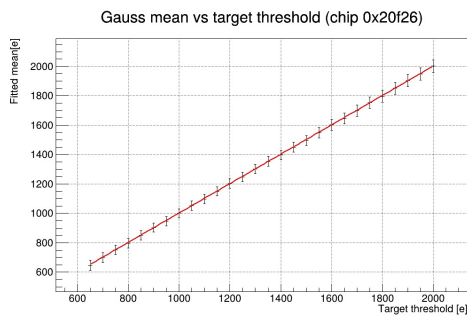
(c) フロントエンドチップ : 0x20dd7



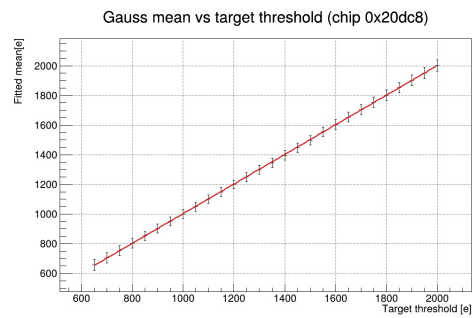
(d) フロントエンドチップ : 0x20db8

図 6.4: 調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの標準偏差。

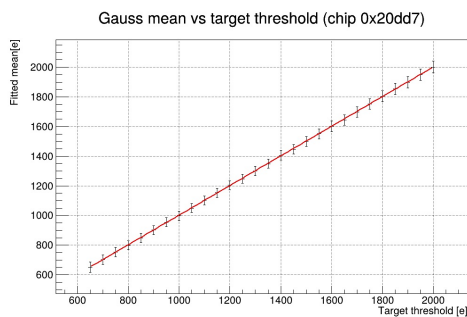
-15°C における結果



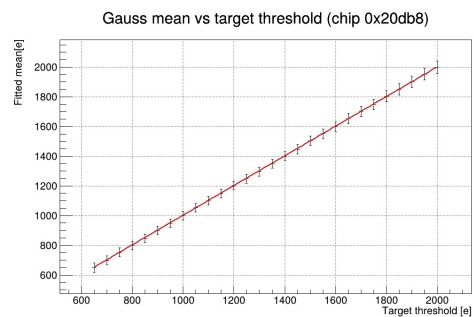
(a) フロントエンドチップ : 0x20f26



(b) フロントエンドチップ : 0x20dc8

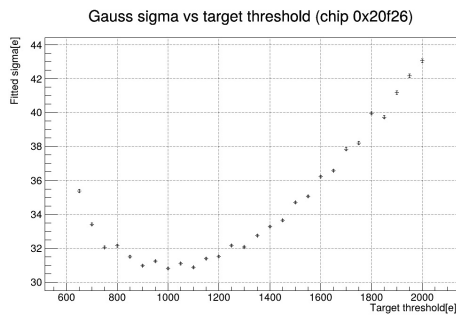


(c) フロントエンドチップ : 0x20dd7

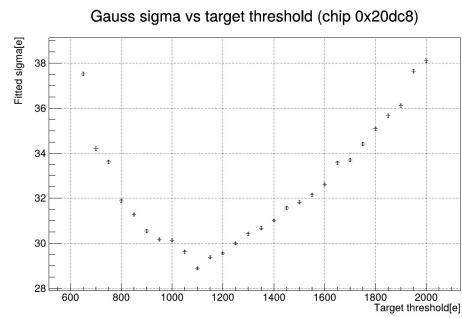


(d) フロントエンドチップ : 0x20db8

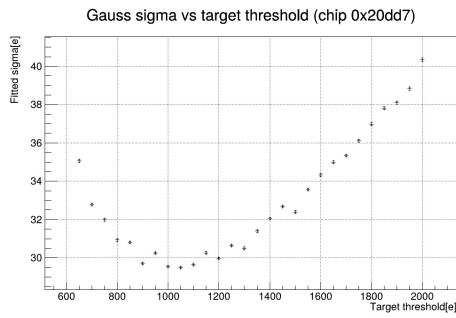
図 6.5: 調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの平均値。赤線は目標閾値を示す。



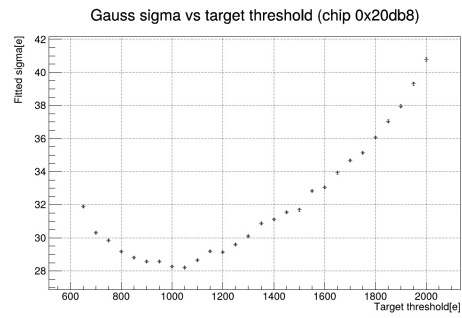
(a) フロントエンドチップ : 0x20f26



(b) フロントエンドチップ : 0x20dc8



(c) フロントエンドチップ : 0x20dd7

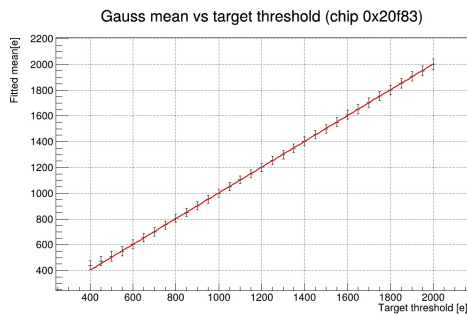


(d) フロントエンドチップ : 0x20db8

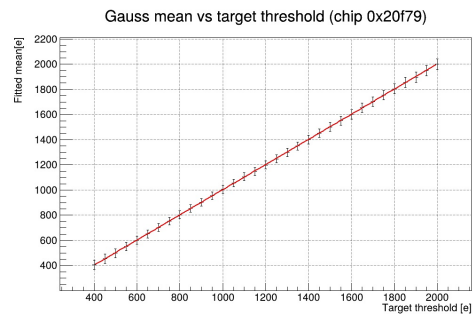
図 6.6: 調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの標準偏差。

検出器モジュール : 20UPGM23603020

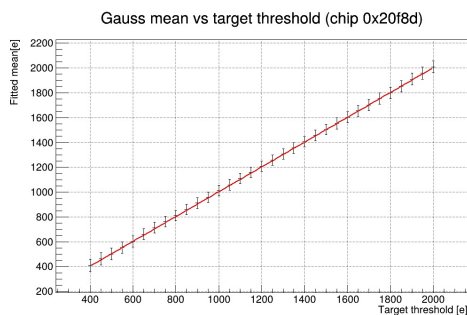
20°C における結果



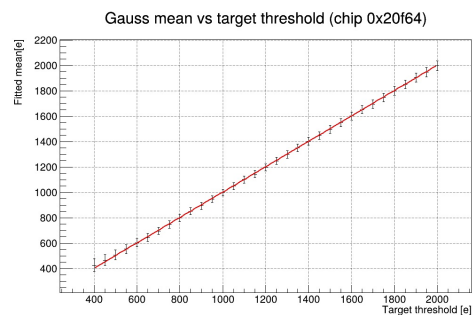
(a) フロントエンドチップ : 0x20f83



(b) フロントエンドチップ : 0x20f79

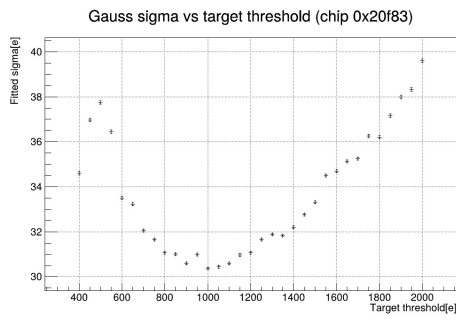


(c) フロントエンドチップ : 0x20f8d

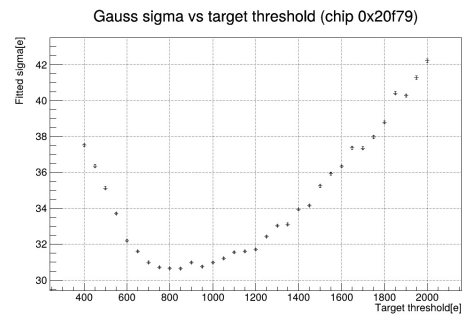


(d) フロントエンドチップ : 0x20f64

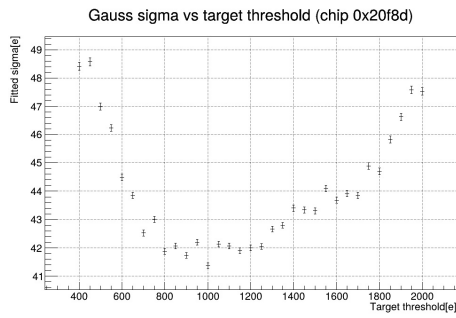
図 6.7: 調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの平均値。赤線は目標閾値を示す。



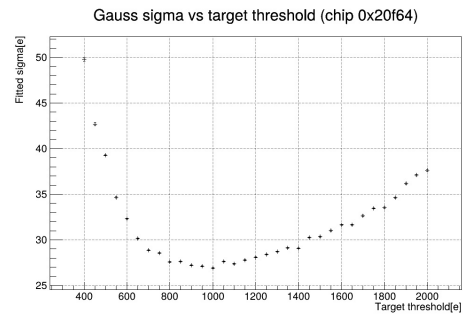
(a) フロントエンドチップ : 0x20f83



(b) フロントエンドチップ : 0x20f79



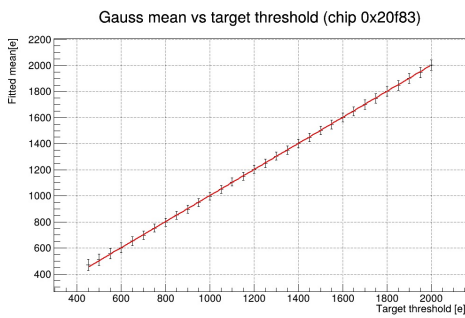
(c) フロントエンドチップ : 0x20f8d



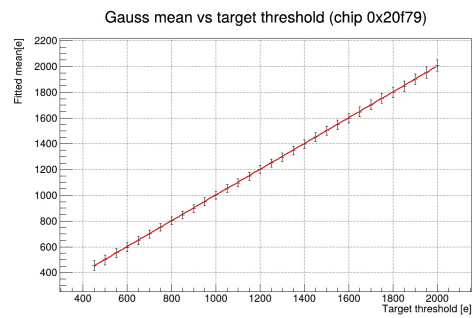
(d) フロントエンドチップ : 0x20f64

図 6.8: 調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの標準偏差と目標閾値

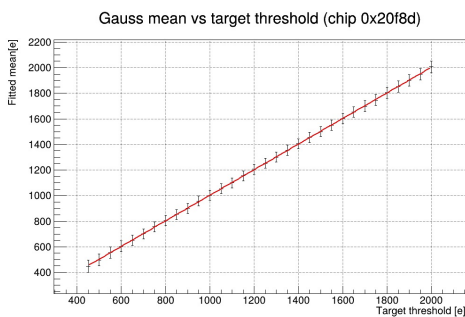
-15°C における結果



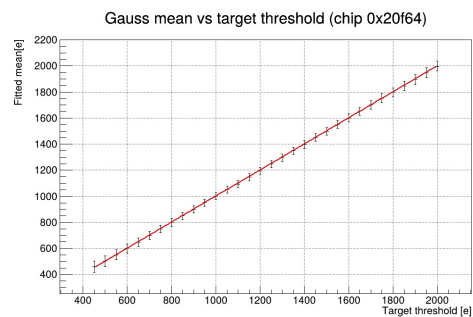
(a) フロントエンドチップ : 0x20f83



(b) フロントエンドチップ : 0x20f79



(c) フロントエンドチップ : 0x20f8d



(d) フロントエンドチップ : 0x20f64

図 6.9: 調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの平均値。赤線は目標閾値を示す。

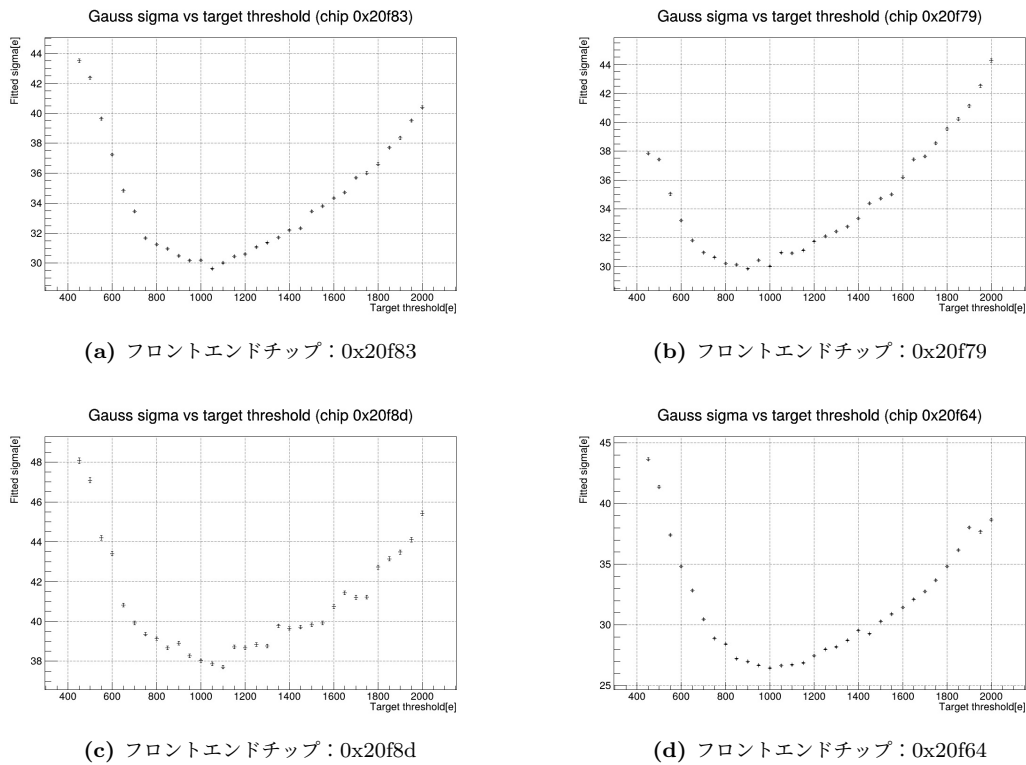


図 6.10: 調整後の閾値分布をガウス関数でフィットしたときの標準偏差と目標閾値

6.1.3 結果の解釈

平均値と目標閾値の関係について、図 6.3b は 400e ~ 500e で目標閾値から外れた。しかし、それを除く他の測定では、誤差の範囲内で目標閾値とフィットで得られた閾値分布の平均が一致している。1 章で述べた通り、高輝度 LHC ATLAS 実験で設定される最低の閾値は 600e であるため [11]、図 6.3b の 400e ~ 500e で目標閾値から外れていることも運用上大きな問題ではない。しかし、問題点として、検出器モジュール 20UPGM23603060 は、 -15°C の温度において、アルゴリズムが正常に機能せず、600e に調整できなかった。これは、閾値調整の際に、テスト電荷の注入に対してヒット情報が返ってこないことにより調整が完了しないからである。これが起こる原因は今のところ解明できておらず、調査中である。

標準偏差と目標閾値の関係について、結果から ATLAS 実験グループが定める基準の 40e を満たす範囲がわかる。フロントエンドチップ毎に値のばらつきがあるが、目標閾値がおよそ 600e 以下と 1800e 以上の領域では基準から外れやすい傾向が見える。このように、低閾値と高閾値の領域において標準偏差が大きくなる原因は次のように考えられる。図 6.11 は、目標閾値と測定された閾値の差と、TDAC の関係である。横軸は測定された閾値が目標閾値からどれだけずれているかを表し、縦軸はそのときの TDAC の値である。

目標閾値が小さいとき、閾値と TDAC の関係は図 6.11a のようになる。閾値が目標よりも高めでピークをもち、高い閾値側にテイルを引く。これは次のように理解できる。5 章で見たように、 V_{th1} が小さく、かつ TDAC の絶対値が小さいとき、TDAC を 1 だけ変化させたときの閾値変化の傾きは大きい。TDAC を 1 変化させただけでピクセル別閾値調整で TDAC を更新するか決める範囲を超えてしまうピクセルが増える。そのため TDAC=0 付近で目標閾値まで近づけきれないピクセル数が増える。よって図 6.11a のように TDAC=0 付近で調整された閾値の幅が広くなる。目標閾値が大きいとき、閾値と TDAC の関係は図 6.11b のようになる。このように、TDAC が負のときのピクセルごとのばらつきが大きいことが標準偏差を大きくする要因となっている。そしてこれは次のように理解できる。グローバル閾値調整では目標閾値 +200e で調整しているため、多くのピクセルは TDAC を負の方向に変化させる。ここで、5 章の TDAC の応答で見た通り、 V_{th1} が大きいときの負の領域での TDAC の傾きは大きくなる。そのため、目標閾値まで近づけきれないピクセル数が増え、標準偏差は大きくなる。

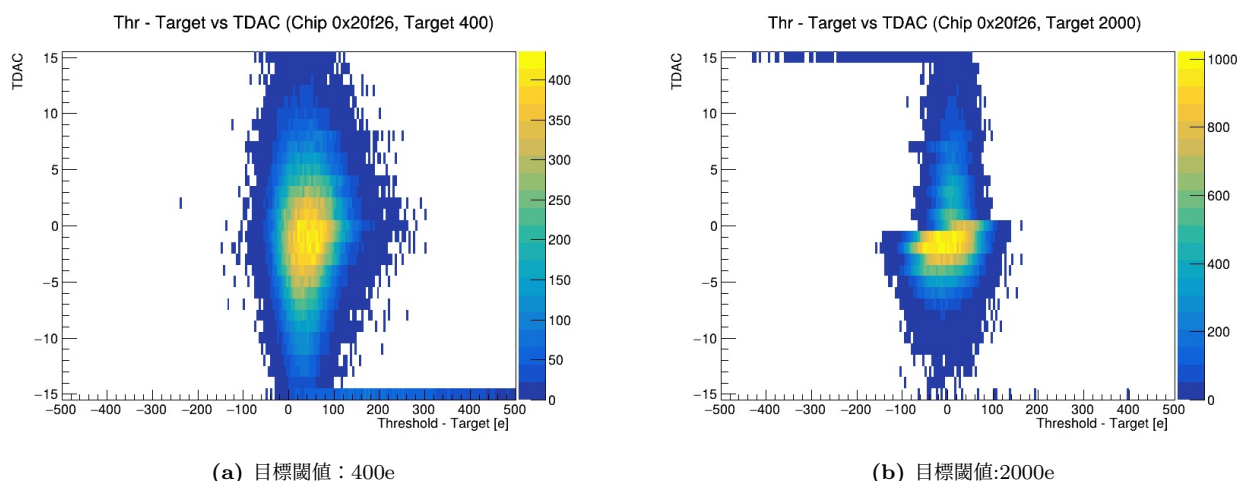


図 6.11: 目標閾値と測定された閾値の差と、TDAC の関係

時間の都合上、今回は 2 つの検出器モジュールしか、広範な目標閾値に調整する調査ができなかった。そのため、現在量産されている検出器モジュールのどれくらいの割合が 600e まで調整でき、標準偏差が 40e を下回るかは分からない。しかし、量産時の品質保証試験では 1500e にしか調整しておらず、実機仕様の検出器モジュールに対して調整できる閾値の下限は、これまで調査されていない。そのため、運用時の 600e まで調整できる検出器モジュールがあると確認できたことに意義がある。

6.2 外れ値をとるピクセルの調査

図 6.1 の通り、調整後の閾値分布では外れ値をとるピクセルがある。この章ではその原因の調査結果を示す。今回、1 章で述べたように、外れ値を目標閾値 $\pm 120e$ の範囲外と定義した。ここでは、外れ値をとるピクセルのことを Bad Pixel と呼ぶ。本研究では、原因調査のため Bad Pixel を 5 つに分類をした。

6.2.1 分類

ここで、Bad Pixel の 5 つの分類を説明する。4 章で説明したように、閾値測定は失敗することがあり、このとき閾値は 0.0 と記録される。そのため、閾値測定に失敗したピクセルも Bad Pixel に含まれる。本研究での Bad Pixel の分類は以下の通りである。

1. 動作異常 (abnormal) : 閾値測定に失敗したピクセルのうち、直前に行なった Analog scan でヒット率が 100% でないもの。
2. フィット失敗 (Fit Fail) : 直前に行なった Analog scan でヒット率が 100% であるが、閾値測定に失敗したピクセル。
3. TDAC = -15 : 測定に成功したが外れ値の不良ピクセル。そのうち TDAC=-15 のもの。
4. TDAC = +15 : 測定に成功したが外れ値の不良ピクセル。そのうち TDAC=+15 のもの。
5. TDAC = Others : 測定に成功したが外れ値の不良ピクセル。そのうち TDAC が ± 15 でないもの。

1 の動作異常は、4 章で説明したテスト電荷を 100 回入力する Analog scan を用いた分類である。これに分類されるピクセルでは、テスト電荷を注入した回数と測定されたヒット回数が一致しない。図 6.12 は、1 の動作異常に分類されたピクセルの、ヒット数分布の一例である。x 軸がヒット数で、y 軸がピクセル数である。これを見ると、ヒット数が 100 回を超えるものがある。Analog scan では、全ピクセル同時にテスト電荷を注入するわけではなく、あるタイミングで一部のピクセルにのみテスト電荷が注入される。本研究の場合に具体的には、あるタイミングで毎回 2400 個のピクセルに同時にテスト電荷を注入している。それを 64 回繰り返すことで、 $2400 \times 64 = 153600$ 個の全ピクセルにテスト電荷が注入される。しかし、この 64 回の繰り返しでは全ピクセルに対してトリガーが発行される。よっ

て、テスト電荷を注入していないピクセルに対して、閾値を超えるような大きなノイズが入ると、ヒット数がテスト電荷注入回数を上回ることになる。ヒット数が 100 回を超えるものは、これが原因であると考えた。また、ヒット数が 0 回のピクセルもある。これには 2 つの原因が考えられる。1 つは、内部回路の故障である。もう 1 つは、非常に高いレートのノイズにより、コンパレータが常に High を出力することである。コンパレータが Low から High に切り替わる時にヒットを検出するため、この場合ヒット数は 0 になる。

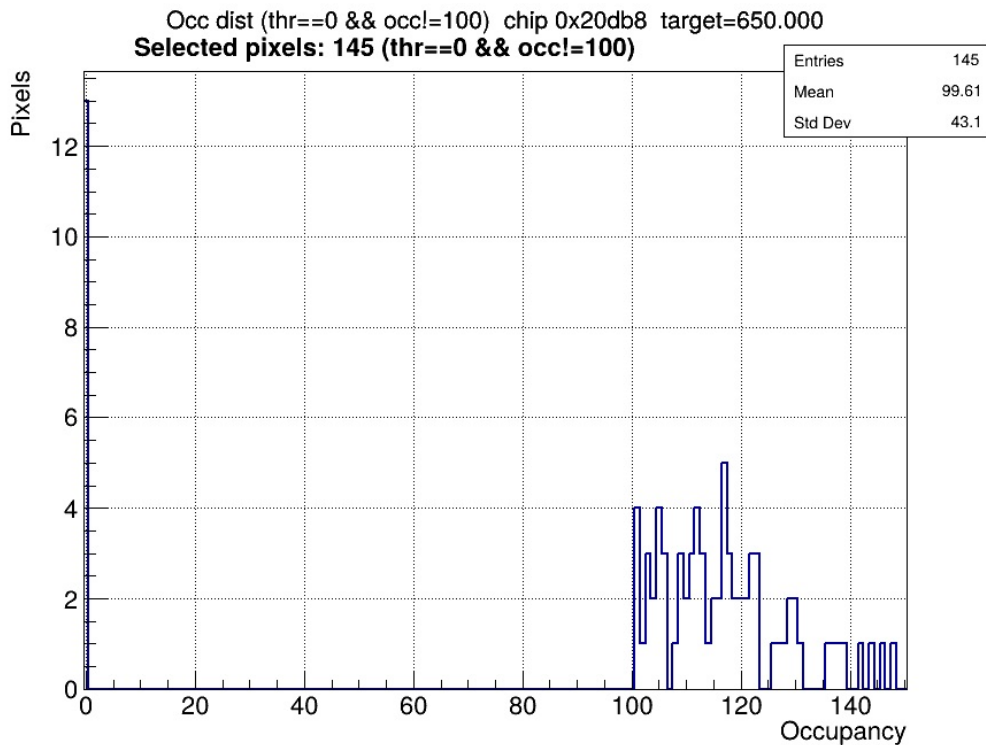


図 6.12: 閾値測定に失敗し、ヒット率が 100% でなかったピクセルのヒット数分布

2 のフィット失敗は、内部回路の動作が正常であるが測定に失敗したものである。これは、4 章で説明したような、プログラムによってフィットに失敗したと判定されたものである。3,4 の $TDAC = \pm 15$ は、 $TDAC$ で調整できる限界だが、目標閾値から大きく外れたピクセルである。これは、閾値調整のアルゴリズムは正常に働いているが、ピクセルの性質として調整に限界があるものである。5 の $TDAC = others$ は、 $TDAC$ の調整レンジ以内であるものの、目標閾値まで十分に近づけられなかったものである。

6.2.2 分類結果

最初に分類結果の一例を説明し、その後 6.1 節同様、本研究の調査対象である 2 つの検出器モジュールの結果をまとめて示す。そこでまとめて結果を解析する。

■**分類結果の一例** 図 6.13 は今回の測定結果の一例である。横軸が目標閾値で、縦軸が Bad Pixel の割合である。先述した 5 つの分類で色分けした。ATLAS 実験グループの定める、閾値分布の標準偏差に対する要求は $40e$ 未満であった。今回、外れ値の定義は目標閾値 $\pm 120e$ の範囲外であり、 $40e$ の 3 倍の範囲である。よって、 3σ の外側に対応する 0.3% に基準として点線を引いた。Bad Pixel の割合がこれを下回る場合、ATLAS 実験グループの定める要求をより広範囲で満たしていることとなる。6.1 で求めた標準偏差が、 $40e$ 未満で且つ外れ値をとるピクセルが少ないときにしか満たされない厳しい条件であるが、Bad Pixel の割合の良し悪しを判断する 1 つの指標として取り入れた。

Bad Pixel Fraction vs Target Threshold(chip 0x20f26)

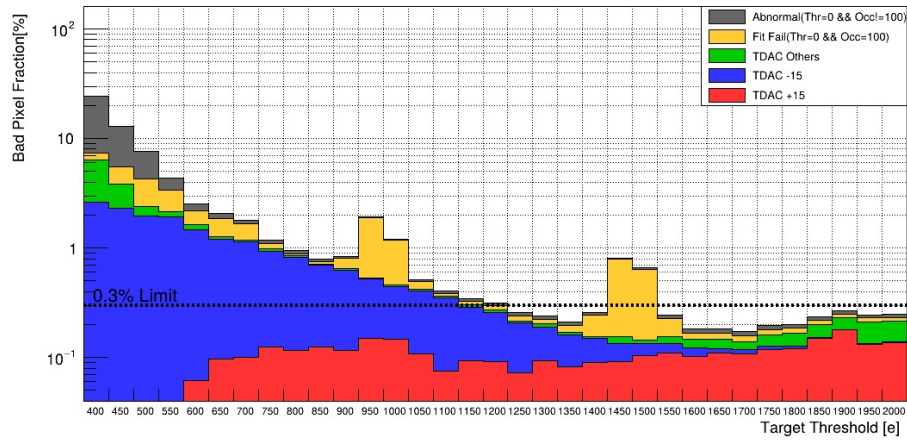
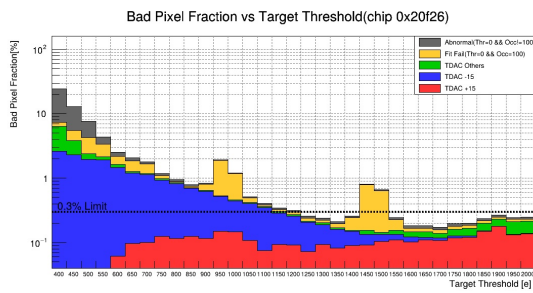


図 6.13: 結果の一例

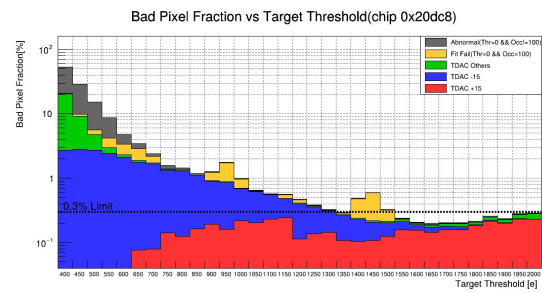
■20,-15 度における 2 つの検出器モジュールの結果 ここでは、本研究の調査対象である 2 つの検出器モジュールの結果をまとめて示す。

検出器モジュール : 20UPGM23603060

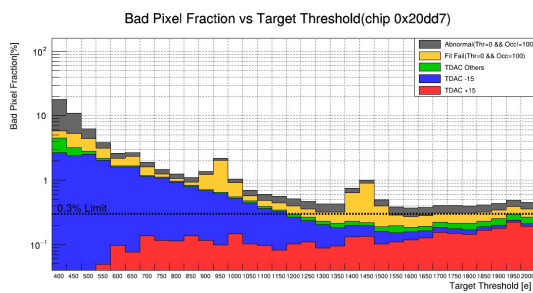
20°C における結果



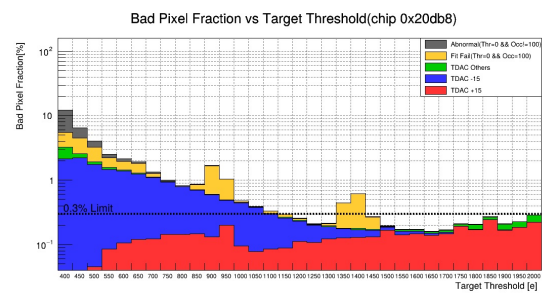
(a) 0x20f26



(b) 0x20dc8

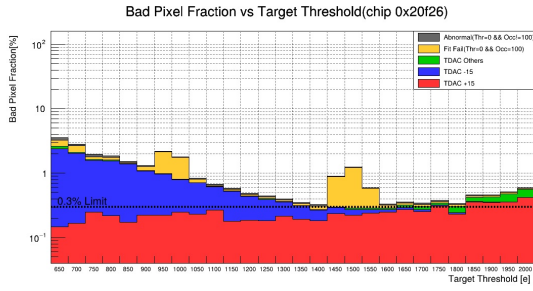


(c) 0x20dd7

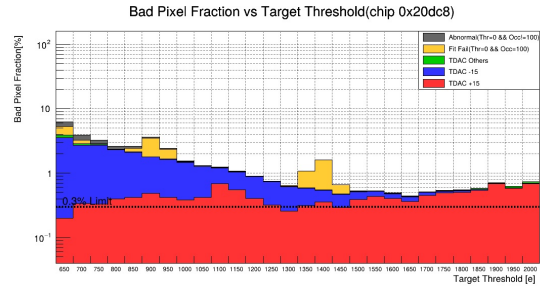


(d) 0x20db8

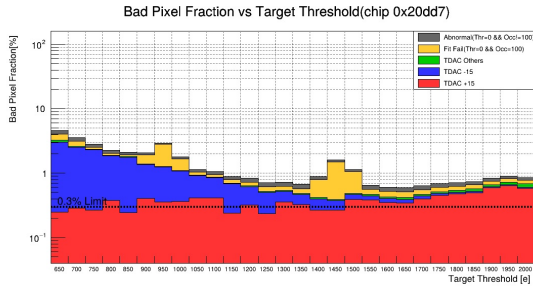
-15°Cにおける結果



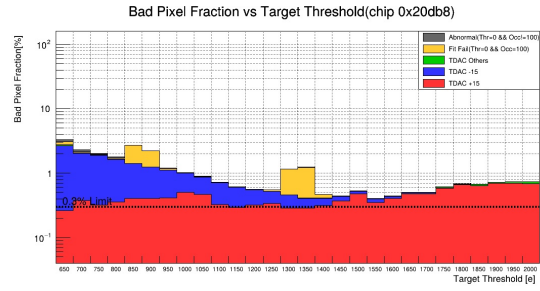
(a) 0x20f26



(b) 0x20dc8



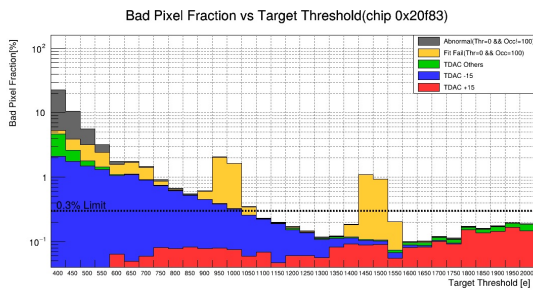
(c) 0x20dd7



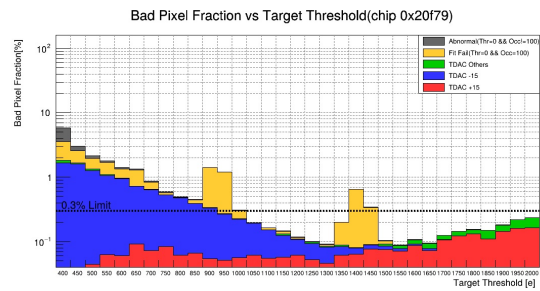
(d) 0x20db8

検出器モジュール：20UPGM23603020

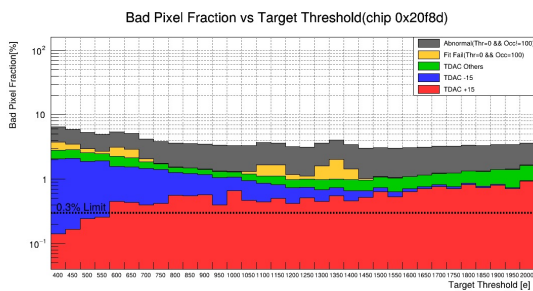
20°Cにおける結果



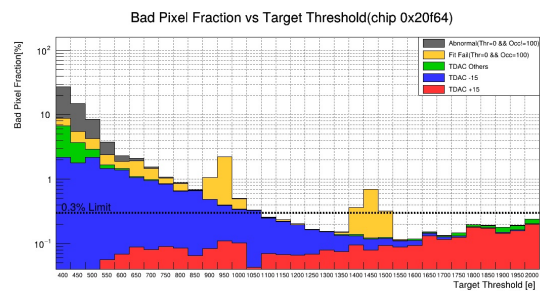
(a) 0x20f83



(b) 0x20f79

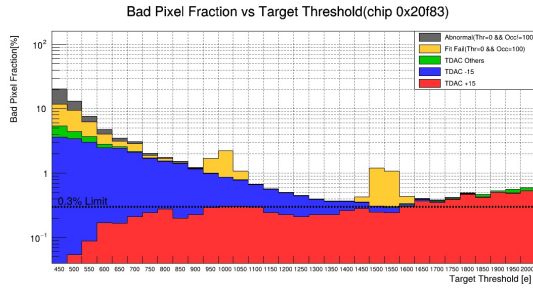


(c) 0x20dd7

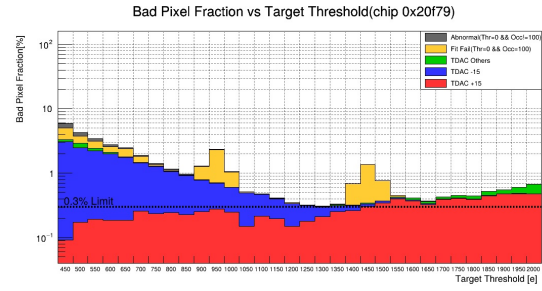


(d) 0x20f64

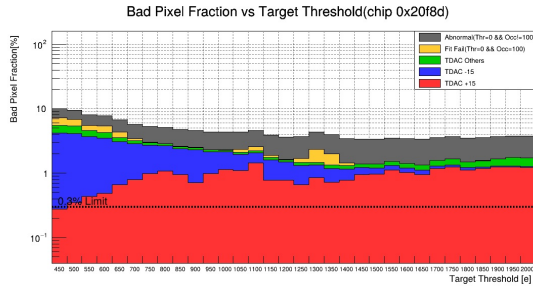
-15°Cにおける結果



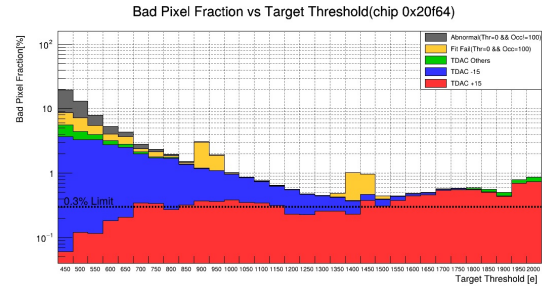
(a) 0x20f83



(b) 0x20f79



(c) 0x20dd7



(d) 0x20f64

6.2.3 共通する特徴

ここでは、多くのフロントエンドチップに共通する特徴をまとめる。共通する特徴として以下が挙げられる。

1. 目標閾値が小さくなるにつれて、TDAC = -15 をとるピクセルが増え、TDAC = +15 をとるピクセルが減る。
2. 目標閾値が小さくなるにつれて、動作異常ピクセルが増える。これは特に -15°C のときよりも 20°C のときに目立つ。
3. 目標閾値が低い領域と高い領域において、TDAC が Others となるピクセル数が増える。
4. フィット失敗のピクセルが、特定の目標閾値においてピークを持つ。
5. -15°C において、20°C のときよりも TDAC = +15 をとるピクセルが増える。

これらの特徴の原因の調査結果を、それぞれ以下で説明する。

目標閾値が小さくなるにつれて、TDAC = -15 をとるピクセルが増え、TDAC = 15 をとるピクセルが減る原因

図 6.18 は、グローバル閾値調整後、ピクセル別閾値調整前の閾値分布である。目標閾値が 400e, 950e, 1500e のものを代表として示した。グローバル閾値調整では、目標閾値 +200e に向けて調整するため、それぞれ理想的には 600e, 1150e, 1700e にピークを持つはずである。目標閾値が 1500e の分布は左右対称のガウス分布に見えるが、400e, 950e の分布は左側が欠けている。このように見えるのは、閾値が低いピクセルはノイズの影響から閾値測定に失敗しやすく、測定されたピクセル数が実際に存在するピクセル数よりも少ないためである。これらの閾値分布の平均と標準偏差を求めるため、ガウス関数でフィットをした。このとき欠けた範囲を選択しないよう注意した。

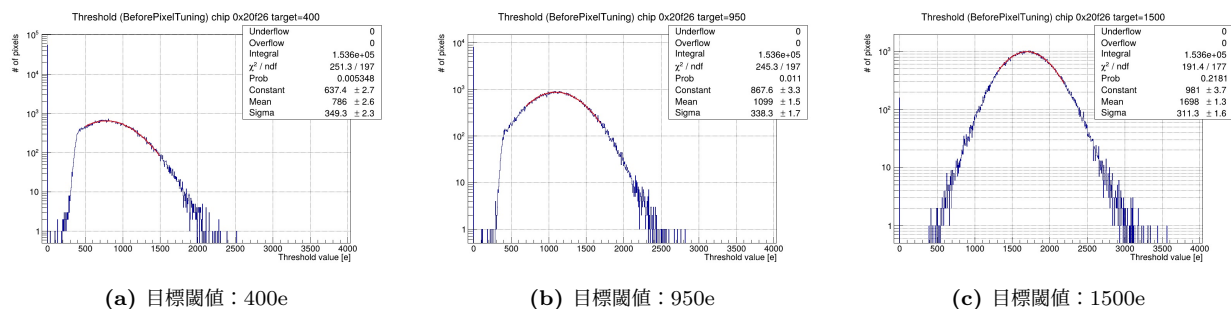
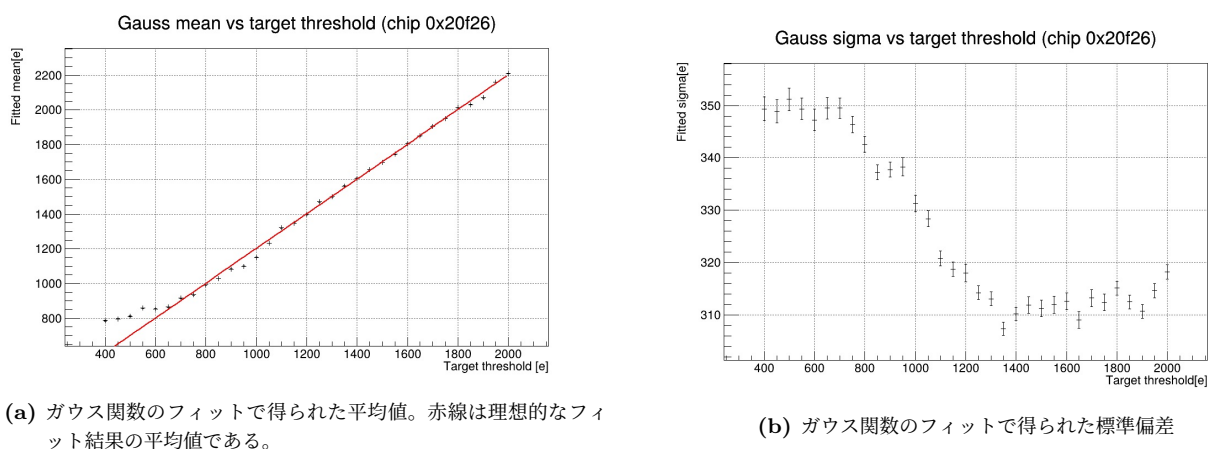


図 6.18: グローバル閾値調整後、ピクセル別閾値調整前の閾値分布

図 6.19 は、ガウス関数のフィットで得られた平均値、標準偏差の目標閾値との関係である。(a) の平均値のグラフの赤線は、目標閾値 + 200e であり、グローバル閾値調整後の理想的な平均値を表している。ここからわかる通り、平均値は目標閾値が低い領域で、理想値から外れる。また、標準偏差も目標閾値が低くなるほど、大きくなる。



(a) ガウス関数のフィットで得られた平均値。赤線は理想的なフィット結果の平均値である。

(b) ガウス関数のフィットで得られた標準偏差

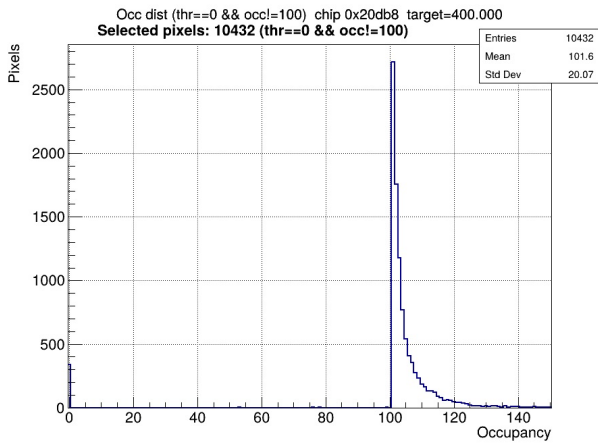
図 6.19: グローバル閾値調整後、ピクセル別閾値調整前の閾値分布の平均と標準偏差

ここから、目標閾値が小さくなるにつれて、グローバル調整後の閾値と目標閾値の差が、TDAC を限界の-15 まで下げたときの変化幅よりも大きいピクセルが増える。よって、目標閾値が小さくなるにつれて、TDAC = -15 をとるピクセルが増える。同じ理由から、目標閾値が小さくなるにつれて、TDAC = +15 をとるピクセルが減る。

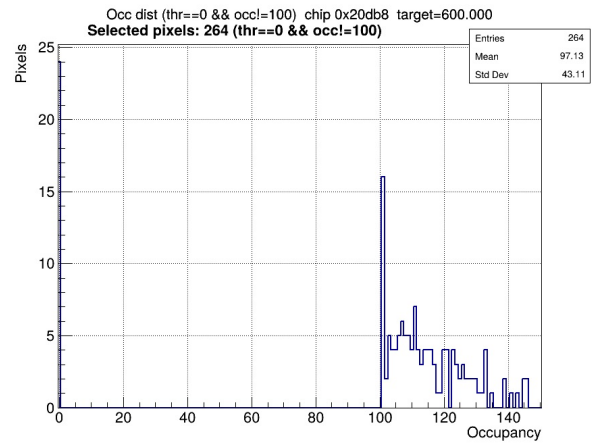
目標閾値が小さくなるにつれて、動作異常ピクセルが増える原因

図 6.20 は、動作異常ピクセルのヒット数分布と目標閾値の関係である。横軸が Analog scan におけるヒット数で、縦軸がピクセル数である。目標閾値が小さくなるにつれて、ヒット数が 0 回と 100 回以上のピクセルが増えている。

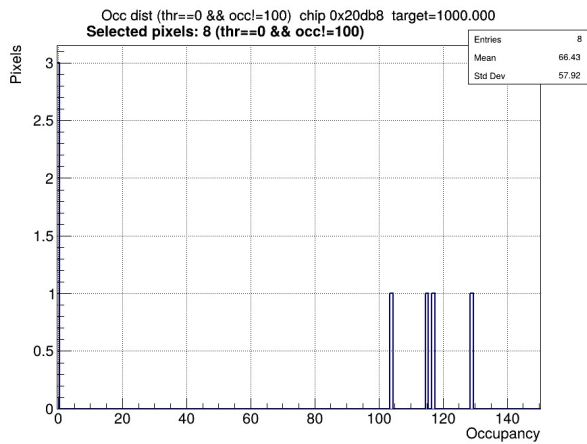
ヒット数が 0 回のもものと 100 回以上のものに分けて説明する。ヒット数が 0 回のもものは、内部回路の故障とコンパレータが常に High を出すものに分けられる。内部回路に欠陥があるピクセルの数は目標閾値に依らないはずである。実際、閾値が高くノイズの影響を受けづらい、目標閾値が 1000e, 1500e のグラフを見るとヒット数が 0 回のピクセル数は変わっていない。よって、これらは内部回路に欠陥のあるピクセルだと考えた。また、低い閾値で増える、ヒット回数が 0 回のもものは、高レートノイズによりコンパレータが常に High を出力するものであると考えた。これは、閾値を下げるほど小さな電荷量のノイズも拾ってしまうためである。ヒット数が 100 回以上のものも、ノイズが原因であると考えた。これは、6.2.1 の Analog scan の説明にあったように、テスト電荷を注入していないがトリガーが発行されたタイミングでノイズによるヒットがあったものである。



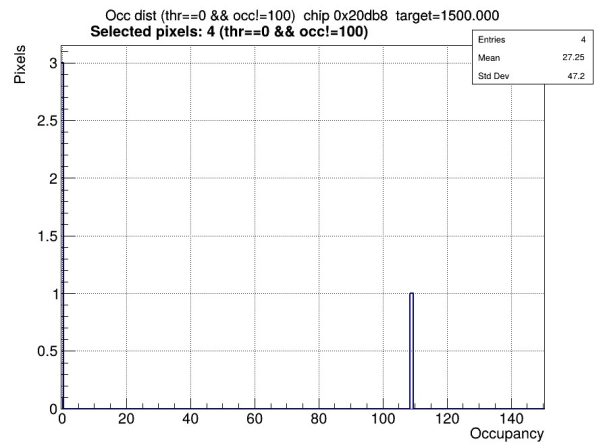
(a) 目標閾値：400e



(b) 目標閾値：600e



(c) 目標閾値：1000e



(d) 目標閾値：1500e

図 6.20: 動作異常ピクセルのヒット数分布と目標閾値の関係

目標閾値が低い領域と高い領域において TDAC が Others となるピクセル数が増える原因

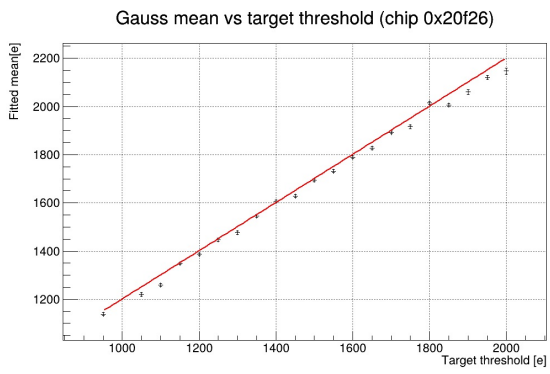
目標閾値 $\pm 120e$ の範囲外という外れ値の定義は、標準偏差 $40e$ の 3σ からきている。そのため、閾値分布の中心部の裾の 0.3% が外れ値をとる。このため、 0.3% を Bad Pixel の割合の良し悪しを判断する 1 つの指標として取り入れていた。しかし、6.1 で求めた閾値分布の標準偏差は、低い閾値領域では $40e$ よりも大きかった。よって、より多くの閾値分布の中心部の裾の要素が、外れ値の範囲内に入ることとなる。よって、目標閾値が低い領域と高い領域において TDAC が Others となるピクセル数が増える原因は、6.1.3 で議論した、目標閾値が低い領域と高い領域で標準偏差が大きくなる原因と同じであると考えた。

フィット失敗のピクセルが特定の目標閾値においてピークを持つ原因

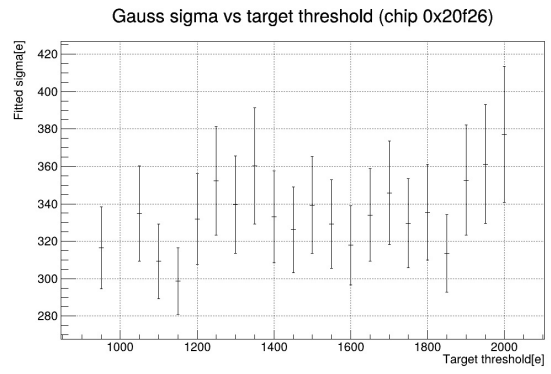
この問題の原因は解明できていない。そのため、7 章の考察で議論する。

-15°C において、 20°C のときよりも TDAC = +15 をとるピクセルが増える原因

図 6.21 は、 -15°C における、ピクセル別閾値調整前の閾値分布の平均と標準偏差である。 20°C のときの結果 (図 6.19) と比べると、閾値の平均が全体的に低めになっていることがわかる。また、標準偏差も 20°C のときに比べて大きい。これにより、ピクセル別閾値調整で限界まで閾値を上げようとしても届かないピクセルが増えたと考えた。



(a) ガウス関数のフィットで得られた平均値。赤線は理想的なフィット結果の平均値である。



(b) ガウス関数のフィットで得られた標準偏差

図 6.21: -15 度のときの、グローバル閾値調整後、ピクセル別閾値調整前の閾値分布の平均と標準偏差

第7章

考察

この章では、前章の結果を考察する。

7.1 フィット失敗のピクセルが特定の目標閾値においてピークを持つ原因

6章の外れ値をとるピクセルの分類において、フィット失敗のピクセルが950eや1500e付近の特定の閾値にピークを持つ原因をここで考察する。この原因は現在調査中で解決はしていないが、現状わかっていることを以下に示す。YARRの閾値測定アルゴリズムでは、4章で説明したような基準でフィットが成功したか判断する。今回、フィットに失敗したピクセルを、その判断基準から次のように分類した。

表 7.1: フィットに失敗したピクセルの分類定義

フィット失敗の分類	分類の説明
フィット未実施 (NotPerformed)	テスト電荷が最大のときにヒット回数が0でそもそもフィットされないもの
閾値範囲外 (MeanOut)	閾値が $Q_{inj_{min}} < \mu < Q_{inj_{max}}$ の範囲外のもの
ノイズ範囲外 (SigmaOut)	ノイズ σ が $\sigma < Q_{inj_{max}} - Q_{inj_{min}}$ を満たさないもの
ノイズゼロ (SigmaZero)	ノイズが0だったもの
χ^2 範囲外 (Chi2Out)	誤差を1に固定したフィットでの χ^2/ndf で、 $10^{-6} < \chi^2/ndf < 2.5$ を満たさないもの
ベースライン異常 (BaseDiff)	$ \frac{N_1 - N_0}{N_{inj}} - 1 < 0.1$ を満たさないもの

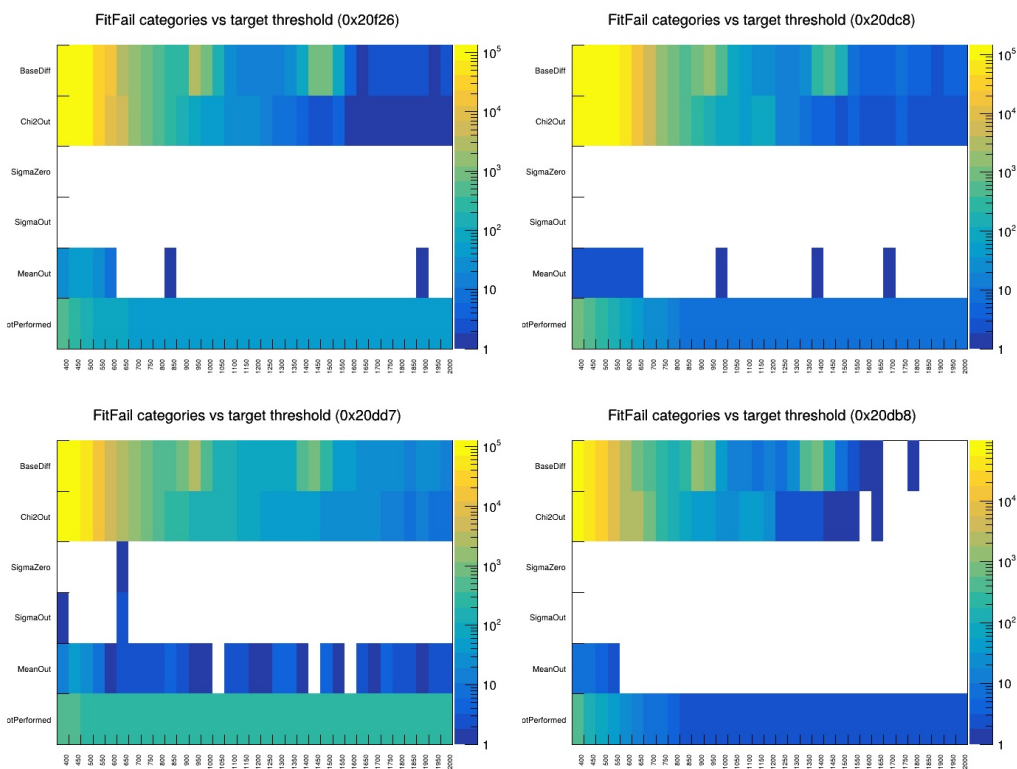


図 7.1: フィット失敗ピクセルの分類。20°C における検出器モジュール 20UPGM23603060 のデータ。

図 7.1 は、フィットに失敗したピクセルを分類した結果である。x 軸は目標閾値で、y 軸が失敗の分類、z 軸がピクセル数である。失敗の分類は上記の表の通りである。これを見ると、ベースライン異常のピクセルの数が、特定の目標閾値において多いことがわかる。よって、特定の目標閾値で測定に失敗するピクセル数が多い原因は、ベースライン異常にあることがわかった。

さらに、BaselineDiff を $|\frac{N_1 - N_0}{N_{inj}} - 1|$ と定義した。図 7.2 は、BaselineDiff と目標閾値との関係である。x 軸が目標閾値、y 軸が BaselineDiff、z 軸がピクセル数である。YARR のアルゴリズムは、BaselineDiff が 0.1 以上のとき失敗と見なす。図 7.2 を見ると、ベースライン異常の多い目標閾値については、BaselineDiff についても特定の値を取りがちである。

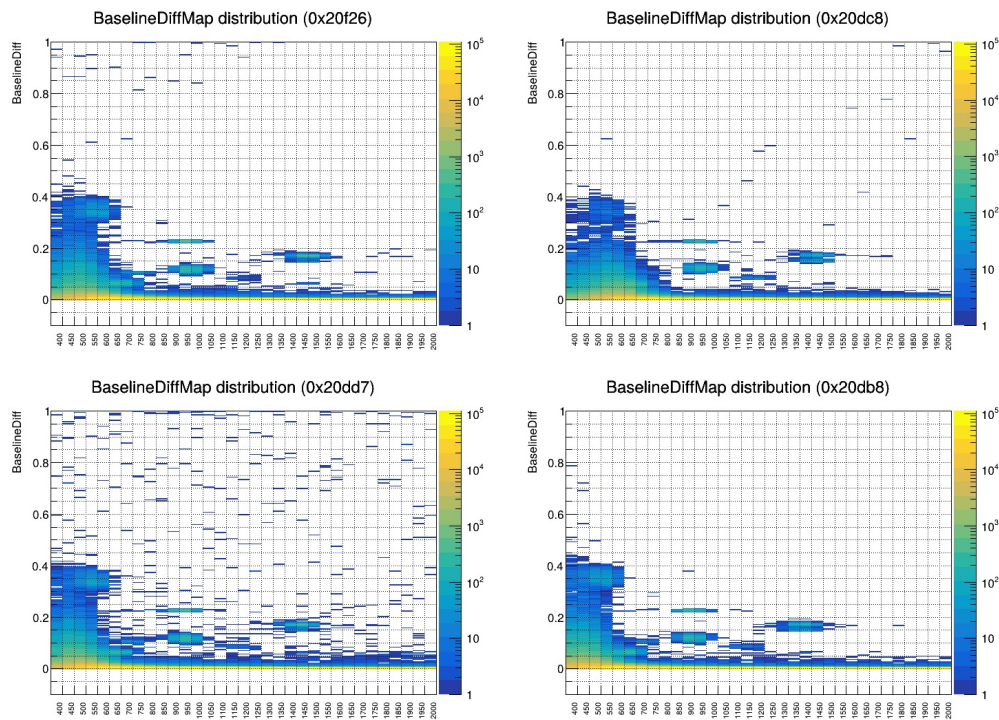


図 7.2: S-curve におけるベースラインの差のずれの分布

よって、この 2 つのパラメータでピークを持つ領域を調べた。この領域を島と呼ぶことにし、図 7.3 に示す範囲で定義した。

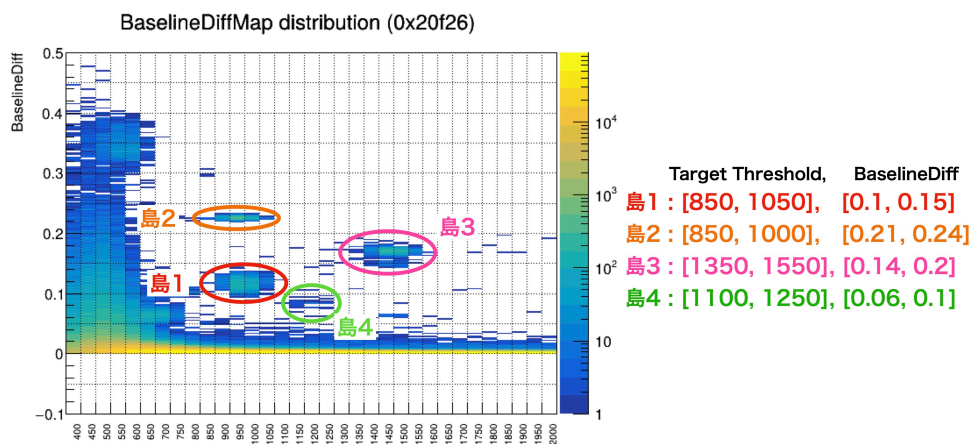


図 7.3: 調査する領域 (島) の定義

それぞれの島は、複数の目標閾値からなる。そのため、フィットの失敗について特定のピクセルに原因があるのなら、島の中のどの目標閾値でも同じ特定のピクセルがフィットに失敗するはずである。これを調べた結果の例が図 7.4 である。このグラフの x、y 軸は同一であり、目標閾値を表す。軸ラベルは、I(Island)_T(Target) で、Island は島番号、Target が目標閾値を表す。例えば、I1_T850 は、島 1 のうち目標閾値が 850 の領域を示す。z 軸には、x、y 軸で指定される 2 つの目標閾値で、同じ特定のピクセルがフィットに失敗した数を表す。例えば、x= I1_T1000、y= I1_T950 において z= 3 であるが、これは、目標閾値が 950、1000 の両方でフィットに失敗したピクセル数が 3 であることを示す。x= I1_T950、y= I1_T950 のように x=y のマスは、目標閾値が 950 のときにフィットに失敗したピクセル数を表す。よって今回の調査ではあまり意味がない。つまり、非対角のマスにおいて z 軸の値が大きい場合、同じ特定のピクセルがフィットに失敗したと言える。図 7.4 では、同じ特定のピクセルがフィットに失敗しているわけではないとわかる。

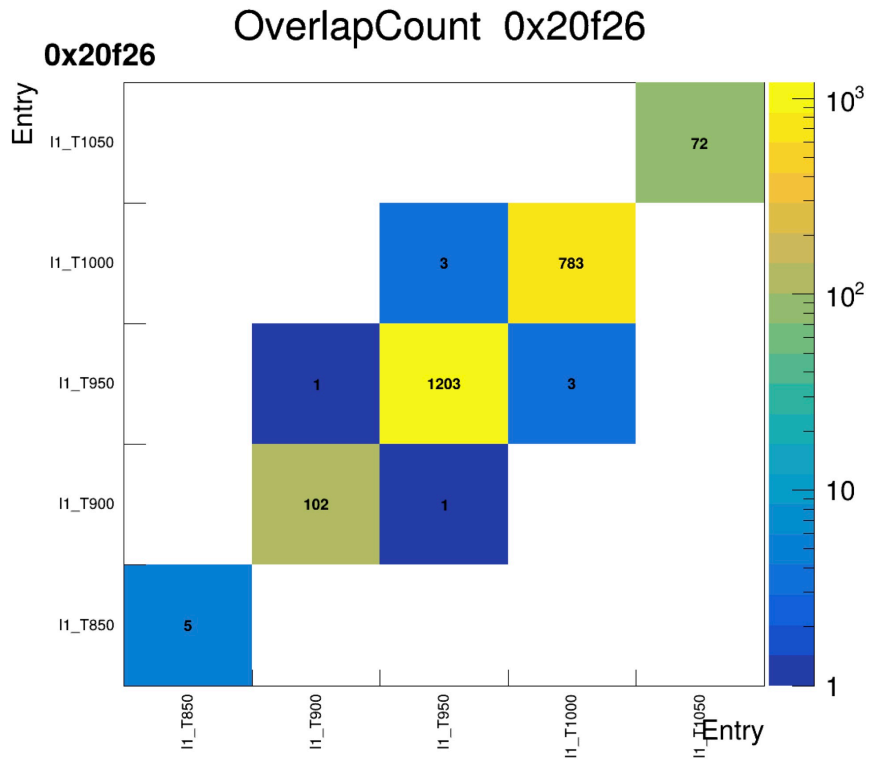


図 7.4: 島 1 におけるあるフロントエンドチップの調査結果の例

複数の島に対して同様の調査をしたのが図 7.5 である。先ほど同様、非対角のマスにおける z 軸の値が大きいとき特定のピクセルに原因があると言える。しかし、非対角のマスにおける z 軸の値が大きくないため、フィットの失敗について特定のピクセルに原因があるわけではないと分かった。

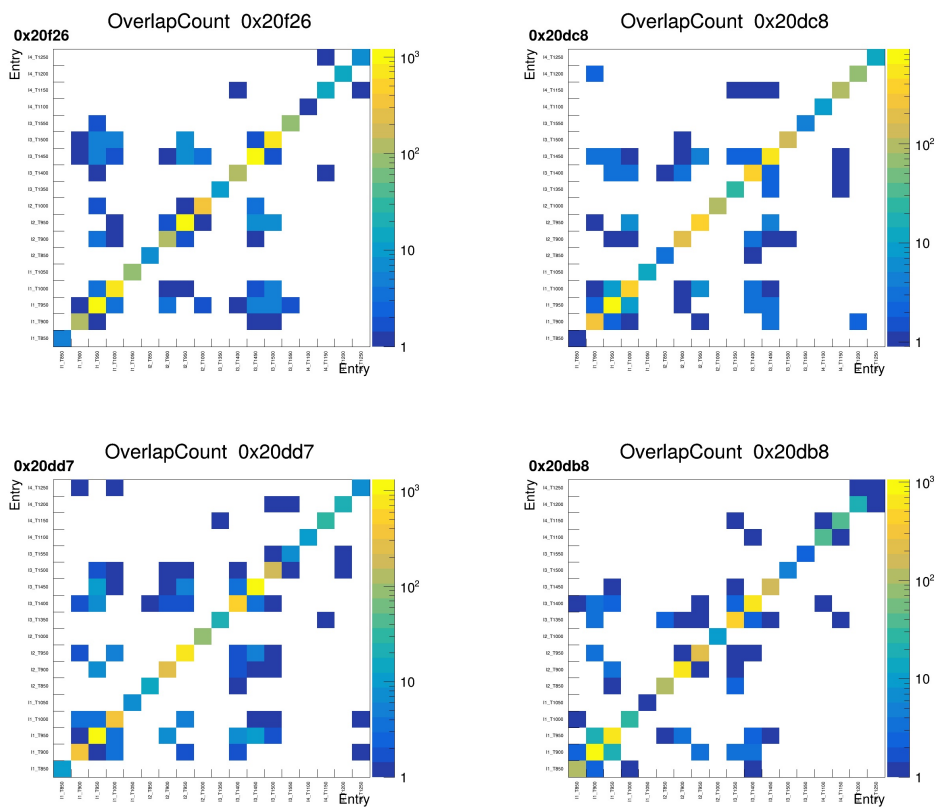


図 7.5: 島の内部、島の間で同じピクセルがフィットに失敗しているのか調査した結果

7.2 展望

6章の結果で外れ値をとるピクセルの分類と原因がわかったことで、より良い閾値調整手法のアイデアが浮かんだ。時間の都合上、検証はできなかったが、ここで新たな調整手法を提案する。

7.2.1 提案 1：20°C における閾値調整手法

6章の結果より、目標閾値が小さくなるにつれて、 $TDAC = -15$ をとるピクセルが増え、 $TDAC=15$ をとるピクセルが減る。またその原因は、目標閾値が小さいとき、グローバル閾値調整が目標まで下げきれないことと、ピクセル毎のばらつきが大きくなることである。これより、目標閾値が小さいときは $TDAC$ の初期値を 0 ではなく、あらかじめ高めに設定しておくことでより多くのピクセルを目標閾値に近づけられるのではないかと考えた。しかし、 -15°C においては、 $TDAC=15$ の値をとるものの目標閾値まで十分に近づけられないピクセルが増える。よって、 20°C の改善手法として提案する。

7.2.2 提案 2： -15°C における閾値調整手法

6章の結果より、 -15°C においては、目標閾値によらず、 $TDAC=15$ の値をとるものの目標閾値まで十分に近づけられないピクセルが増える。この原因は、 -15°C だと、グローバル閾値調整が目標よりも低めに調整されてしまうからである。現在の閾値調整手法は、グローバル閾値調整で目標閾値 $+200e$ に向けて調整しているが、これをもう少し高めに設定することで改善できるのではないかと考えた。

第8章

結論

高輝度 LHC ATLAS 実験で用いる新型シリコンピクセル検出器について、調整後の閾値の一様性を調べた。本研究に用いた検出器は、シリコンセンサーが取り付けられた実機仕様のモジュールである。実機仕様のモジュールで、さらに運用時と同じ -15°C での調査は初である。用いた実機仕様のモジュールは、2つである。一様性は次の2つの観点で評価した。

1. 閾値分布の中心部をガウス分布でフィットしたときの標準偏差が 40e 未満であるか
2. 目標閾値 $\pm 120\text{e}$ の範囲に収まらないピクセルの割合とその原因

ガウス分布でフィットしたときの標準偏差は、900~1000e を極小に、低閾値領域、高閾値領域になるにつれて大きくなる挙動が見られた。合計 8 つのフロントエンドチップについて、 20°C では、7 つのチップが運用時の最低閾値である 600e から 1700e にて 40e 未満を達成、 -15°C では、3 つのチップが 600e から 1700e にて 40e 未満を達成した。 -15°C で減ったのは、片方のモジュールが 650e までしか閾値調整アルゴリズムが完了しなかったからである。650e まで基準を緩めれば 7 つのチップが 40e 未満を達成した。

目標閾値 $\pm 120\text{e}$ をとるピクセルの割合として 0.3% を基準に設けた。 20°C では、6 つのチップが 1600e 付近に不良ピクセル数が 0.3% を下回る閾値範囲を持つ。一方で -15°C では不良ピクセル数が 0.3% のを下回る範囲はなかった。目標閾値 $\pm 120\text{e}$ に収まらない不良ピクセルの挙動を以下の 5 つに分類し、考察した。

1. 目標閾値が小さくなるにつれて、TDAC = -15 をとるピクセルが増え、TDAC = +15 をとるピクセルが減る。
2. 目標閾値が小さくなるにつれて、動作異常ピクセルが増える。
3. 目標閾値が低い領域と高い領域において、TDAC が Others となるピクセル数が増える。
4. フィット失敗のピクセルが、特定の目標閾値においてピークを持つ。
5. -15°C において、 20°C のときよりも TDAC = +15 をとるピクセルが増える。

いずれも定量的な考察までには及ばなかったが、5 つの分類のうち 4 つの挙動については定性的な理解、考察ができた。残る 1 つはまだ説明できておらず、さらなる調査が必要である。また、将来の展望として、不良ピクセルの分類の調査から得た知見をもとに、より良い調整手法を提案した。

付録 A

Appendix 1

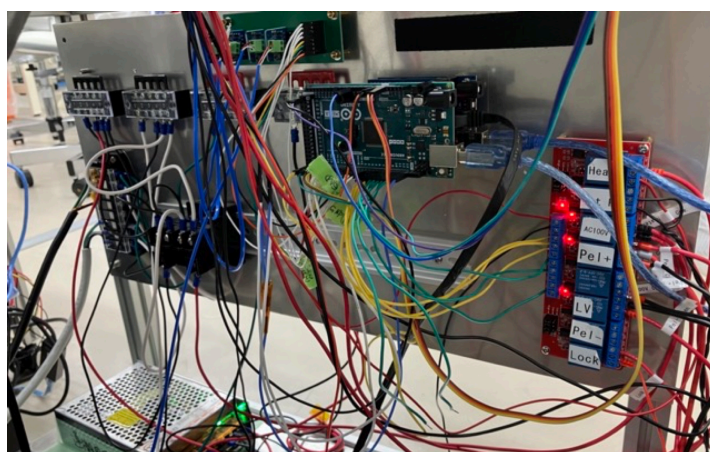
A.1 動作試験セットアップの改良

この章では、私が修士 1 年の頃に取り組んだ、動作試験セットアップの改良について説明する。最初に改良前の問題点を説明する。その後、2 章で説明した温度制御、検出器モジュールの安全確保に用いる部品についてより詳しく説明する。その上で、どのように改善したのか説明する。

A.1.1 改良前の課題



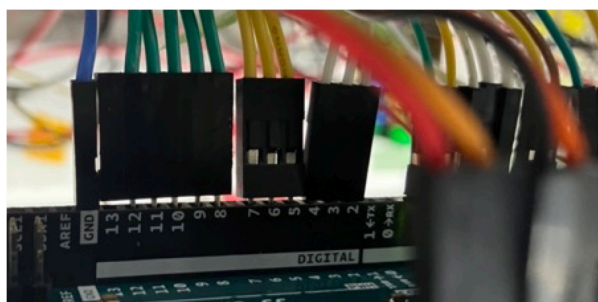
(a) 改良前の動作試験セットアップの全体図



(b) 改良前の配線状態



(c) 改良前に使われていたリレー (故障)



(d) 改良前に使われていたコネクタ

図 A.1: 改良前の課題

図 A.1a は動作試験セットアップの全体図である。写真上側の発泡スチロールの箱が、2 章で説明した cooling box である。その下のアルミフレームとアルミ板で作られた箱状の空間内に、温度制御やデータ取得に必要な部品がある。改良前の状態には 2 つの課題があった。1 つ目が保守のしづらさである。図 A.1a の正面のアルミ板の裏には配線がある。その配線の状態が、図 A.1b である。このような煩雑な配線により、次に説明する壊れた部品の交換や、何か問

題が起きたときの対処に時間がかかるという問題があった。図 A.1c は、改良前に使われていたリレーが壊れたものである。このリレーはメカニカルリレーと呼ばれ、物理的に接点を開閉させるため寿命が短い。実際、動作試験セットアップ7台において、1年で10回程度の頻度で故障していた。さらに、交換には半田づけが必要で1時間程度かかっていた。このように、配線の煩雑さや最適でない部品を用いていたことにより、保守しづらい状態となっていた。2つ目が接触不良である。図 A.1d は、改良前に使われていたコネクタである。このように、固定機構のないコネクタであったため、経年劣化で接触が悪くなることや、意図せず配線が抜けることがあった。

これら2つの原因から起こる動作不良は、品質保証検査をスムーズに進めることの妨げとなっていた。品質保証検査のスケジュールとして、1日あたり1台の動作試験セットアップにおいて、3回の電気的試験を実施しなければならない。電気的試験1回にかかる時間は2~3時間程度である。1日に動作試験セットアップを使うことができる時間は8時間であるため、動作不良が起こるとスケジュールに遅れをとる。よって、これらの問題を解決するために、動作試験セットアップを改良した。

A.1.2 改良前の配線と機能

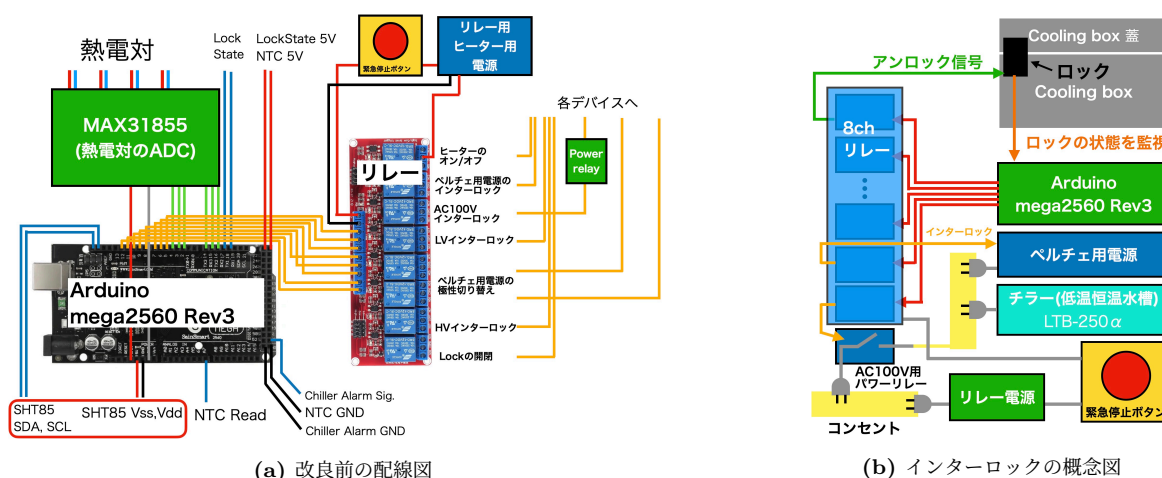


図 A.2: 改良前の配線と機能

図 A.2a は、改良前の配線図である。2章で説明した通り、センサーからの情報をマイクロコントローラ (Arduino Mega2560 Rev3) が集め、それを基にリレーを制御する。まずマイクロコントローラへの入力信号を説明する。温湿度情報は、2章で述べた通り、熱電対、NTC サーミスタ、SHT85 から得る。熱電対は4つあり、それぞれ MAX31855 (Analog Devices 製 [18]) でアナログ信号をデジタル信号に変えてからマイクロコントローラに入力する。NTC サーミスタ、SHT85 はの信号は直接マイクロコントローラに入力する。cooling box には、検出器モジュールが危険に晒される状況で開けられないように、ロックがある。また、チラーは異常時にアラート信号を出す。そのため、温湿度情報のほかに、ロックの開閉情報とチラーのアラート信号もマイクロコントローラに入力する。このような情報をもとに、マイクロコントローラはリレーに制御信号を送る。リレーは8つあり、それぞれ、ヒータのオン/オフ、ペルチェ用電源のインターロック、AC100V インターロック、LV インターロック、ペルチェ用電源の極性切り替え (2つ)、HV インターロック、Lock の開閉を制御する。ここで、インターロックについて少し詳しく説明しておく。ペルチェ用電源のインターロック、LV のインターロック、HV のインターロックは、各電源装置の外部入力ピンを用いたインターロックである。これら電源装置は、指定された2つの外部入力ピンが短絡したときに、強制的に電源出力を0にする。この機能を用いたインターロックである。図 A.2b でペルチェ用電源に向かってインターロックの矢印がこれであり、各電源装置を直接切る。一方で、AC100V インターロックは、図 A.2b で、AC100V 用パワーリレーが対応している。これは、ペルチェ用電源とチラーの電源をとるためのコンセントのオン/オフを切り替えるリレーである。AC100V インターロックの制御信号が出ると、コンセントに電流が流れなくなるためペルチェ用電源とチラーをオフにすることができる。ペルチェ用電源とチラーは検出器モジュールの温度を制御する上で重要な装置であるため、このように2重のインターロックを用意している。また、緊急停止ボタンを押すと、8つのリレー

が集まったモジュールを駆動する電源が切れる。これにより、ヒーター、ペルチェ用電源、チラー、HV、LV が全て切れる。このように、緊急停止ボタンにより、PC の制御によらない人間の判断でもインターロックがかけられる。このような機能も残したまま改良した。

A.1.3 改良のためにしたこと

改良のため、回路基板の設計および製作、使用する部品の再選定、部品の取り付け位置の変更を加えた。この節で、それぞれに分けて説明する。図 A.3 は、改良を加えた箇所を示す図である。青く塗られた範囲内のものうち、マイクログントローラを除くものを回路基板に載せた (改良①、②)。改良②は部品の再選定だが、回路基板に載る部品であるため、回路基板の設計と合わせて説明する。改良③、④は再選定した部品である。これらを説明した後、それぞれの部品の取り付け位置を説明する。

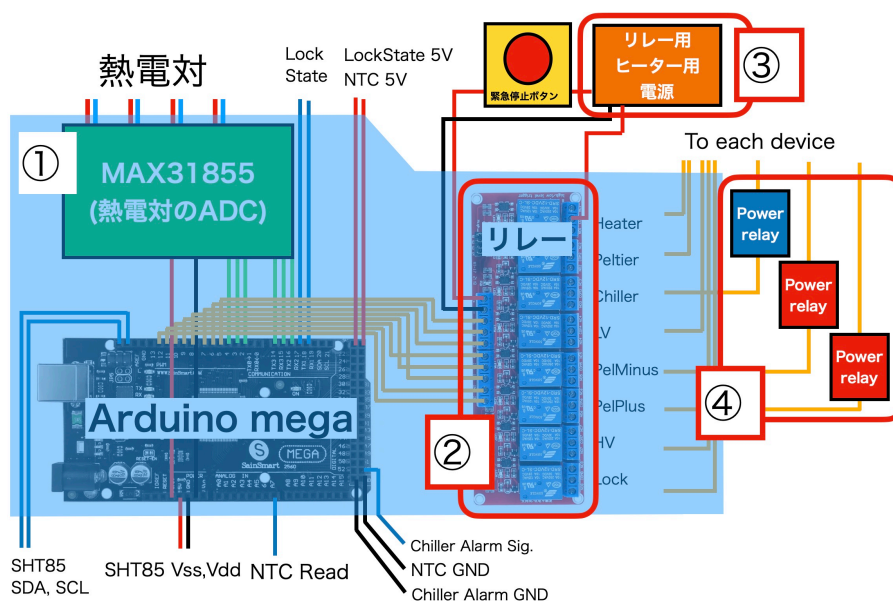


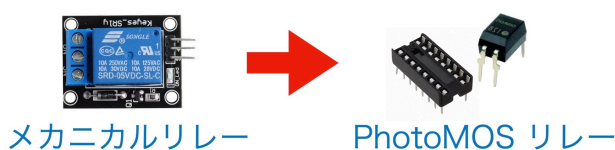
図 A.3: 改良を加えた箇所

回路基板の設計および製作

先述した通り、MAX31855(Analog Devices 製 [18]) は、熱電対のアナログデジタルコンバーター (ADC) である。元々は図 A.4a のような、MAX31855 に加えてバイパスコンデンサーや電圧レギュレータを載せたモジュールを用いていた。今回、1つの回路基板にまとめて載せるため、不要な電圧レギュレータを除いたこと以外は同等の機能を持つ回路を設計した。また、②のリレーを回路基板に載せるため、図 A.4b のように新しく別のものを選んだ。この photo MOS リレーは無接点リレーであり、物理的に接点が動かない。よってメカニカルリレーに比べて寿命が長い。また、万が一故障した際にも素早く交換できるよう、ソケットに挿すだけで使える設計にした。



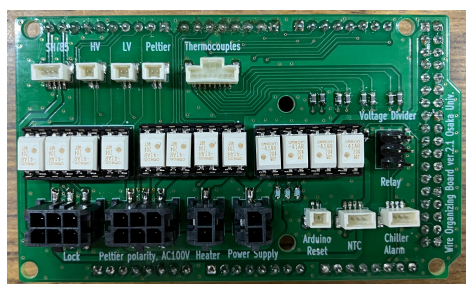
(a) MAX31855 のモジュール [19]



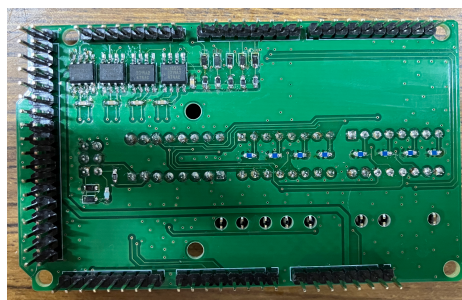
(b) 用いるリレーの変更

図 A.4: 回路基板に載るもの

こうして完成した回路基板が図 A.5 である。図 A.5a、図 A.5b がそれぞれ表面、裏面である。Arduino Mega2560 Rev3 のピン配置と同じ位置の裏面側にピンヘッダをつけた。これにより、回路基板と Arduino Mega2560 Rev3 を接続する。表面のコネクタには、固定機構のあるものを選び、接触不良が起こりづらくした。また、どの電線がどこに繋がれているのかが分かるように、各コネクタの近くの基板表面に接続先を記した。



(a) 完成した回路基板の表面



(b) 完成した回路基板の裏面

図 A.5: 完成した回路基板

こちらの回路基板だが、設計時に見落としていたミスがあった。そのため、図 A.6 に示すような変更を加えている。この図は基板表面の左下の Lock のコネクタがある箇所である。オレンジの線で描いたように、2 箇所のピンを短絡させる変更と、赤色の抵抗器記号で描いたように、2 つの $1\text{k}\Omega$ 抵抗を加えた。これらは、Lock の開閉状態を取得する際にプルダウン抵抗として働く。

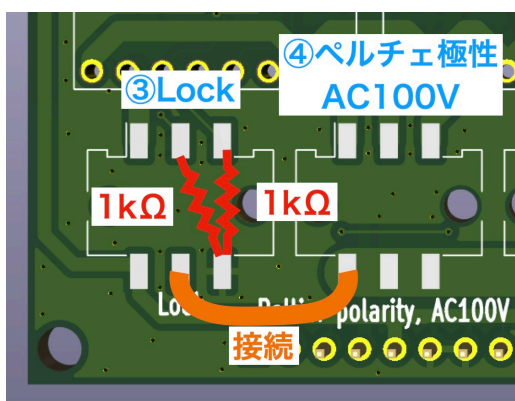


図 A.6: 変更点

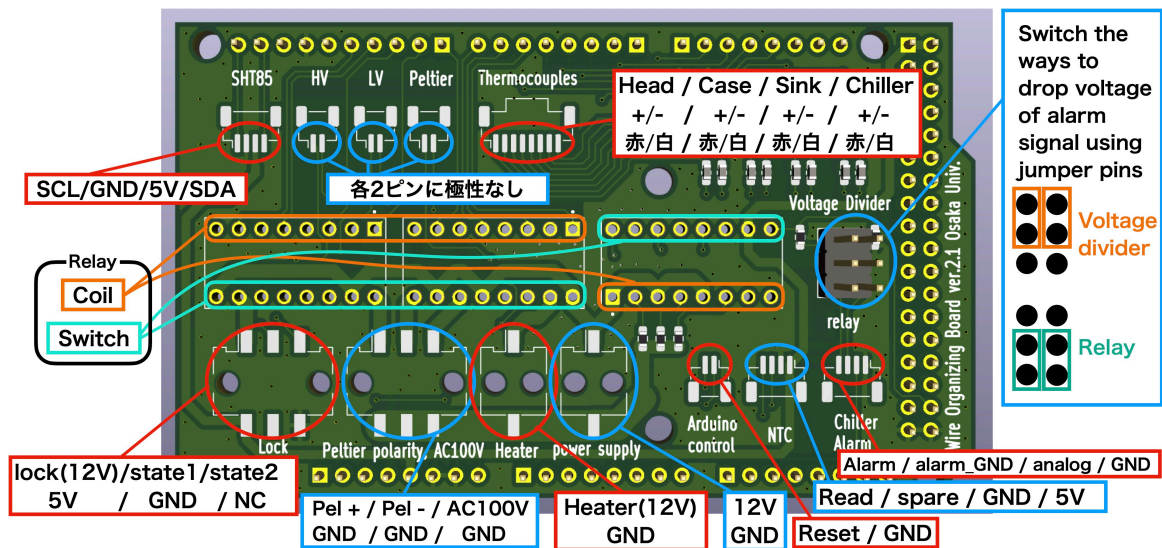


図 A.7: 回路基板のピン配置

以降は、さらに詳細に踏み込み、各コネクタのピン配置や電線の設計を示す。電線の太さは、米国ワイヤーゲージ規格 (American Wire Gauge : AWG) で表す。図 A.7 に、回路基板のピン配置を記した。順に各ピン配置、電線の設計を説明する。

■SHT85 図 A.7 の左上に位置する。4 ピンで、左から順に、SCL、GND、5V、SDA である。Molex[20] 製のコネクタで AWG28 の 4 本の電線をまとめる。基板側のコネクタは、Molex Pico-clasp コネクタの圧着端子メスをつける。SHT85 側のコネクタは、Molex mini-fit コネクタの圧着端子オスをつける。電線の長さは 75 cm 程度に設計した。

■HV, LV, Peltier 図 A.7 で SHT85 の右に並ぶ。いずれも、先述した各電源装置の外部入力ピンを用いたインターロック用の電線である。平常時 2 ピンは絶縁状態にあり、インターロック発動時に 2 ピンが短絡するだけなので、極性はない。いずれも、2 本の AWG28 の電線を Molex のコネクタでまとめる。基板側は、Molex Pico-clasp コネクタの圧着端子メスをつける。電源側は、外部入力ピンの形状に合うコネクタであれば良い。今回は、QI(2550) コネクタを用いた。現在は、Peltier(ペルチェ用電源のインターロック) のみ使っている。電線の長さは電源の位置によるが、今回は 80 cm に設計した。

■Thermocouples(熱電対) 4 箇所の温度を測るため、合計 8 本の熱電対線をコネクタでまとめる。図 A.7 の通り、左から冷却用ヘッド、ケース、シンク、チラーの順に並ぶ。本研究には、K 熱電対を用いるが、それぞれ左側が赤い被覆の線、右側が白い被覆の線である。これも、Molex Pico-clasp コネクタの圧着端子メスをつける。

■リレー 基板中央に、図 A.4b のようなリレーが載る。先述した通り、ソケットに挿して使う。図 A.7 の通り、コイル側がオレンジ色、スイッチ側が水色となるように挿し込む。

■降圧回路 図 A.7 においてリレーの右にある、2×3 のピンヘッダは降圧回路の切り替え用にある。チラーのアラーム信号は、マイクロコントローラに入力するために降圧しなければならない。降圧の手法として、リレーを用いた方法と抵抗分割を用いた方法の 2 つを用意した。このピンヘッダでどちらの方法を使うか選ぶことができる。

■Lock 図 A.7 において左下にある。5 本の AWG28 の電線をコネクタでまとめる。5 本の内訳は、12V、5V、GND、State1、State2 である。State1、State2 は、2 つあるロックのそれぞれの開閉情報を示す。NC(No Connection) と書かれているピンには何も繋げない。12V、5V、GND の電線は 2 つのロックに共通して必要であるため、電線を 2 股に分岐させる必要がある。そのため、この 3 種類の電線は、図 A.8 のように作った。これに合わせ、State1、State2 の電線はそれぞれ 85 cm、100 cm である。これら 5 本の電線を、Molex 製のコネクタでまとめる。基板側には、Molex micro-fit コネクタの圧着端子メスをつける。Lock 側には、Molex mini-fit コネクタの圧着端子オスをつける。

Lockの 分岐ケーブル

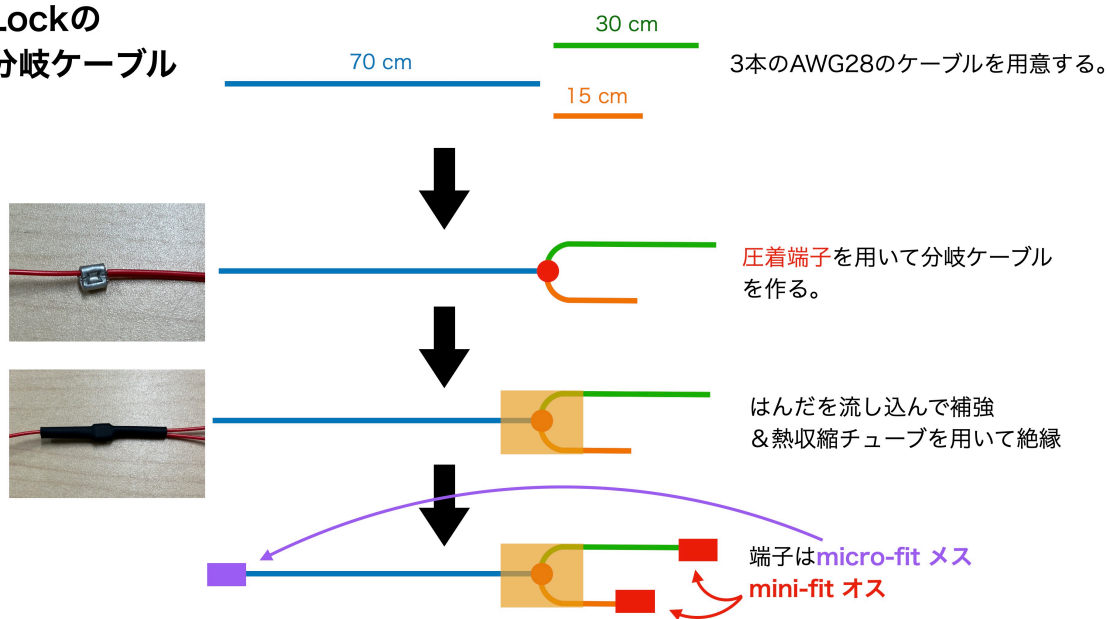


図 A.8: Lock の分岐電線の作り方

■Peltier Polarity, AC100V これは、後で説明するペルチェ極性切り替え用、AC100V インターロック用のパワーリレーに繋ぐ電線である。6本のAWG28の電線をコネクタでまとめる。コネクタ上側のピンのPel+, Pel-, AC100Vは接続先を示しているが、いずれも12Vが出力される。パワーリレーと回路基板の位置関係は、図A.9の通りである。このような位置関係から、ペルチェ極性切り替え用に使う4本の電線は15cmにした。AC100Vインターロック用に使う2本の電線は、25cmと10cmにした。AC100Vインターロック用のパワーリレーに極性はないため、この2本は12VとGNDでどちらが長くても良い。6本とも、基板側はMolex micro-fit コネクタの圧着端子メスをつける。パワーリレー側は、ネジ穴のサイズに合った圧着端子をつける。図A.9では施されていないが、圧着の上に熱収縮チューブなどを被せると良い。

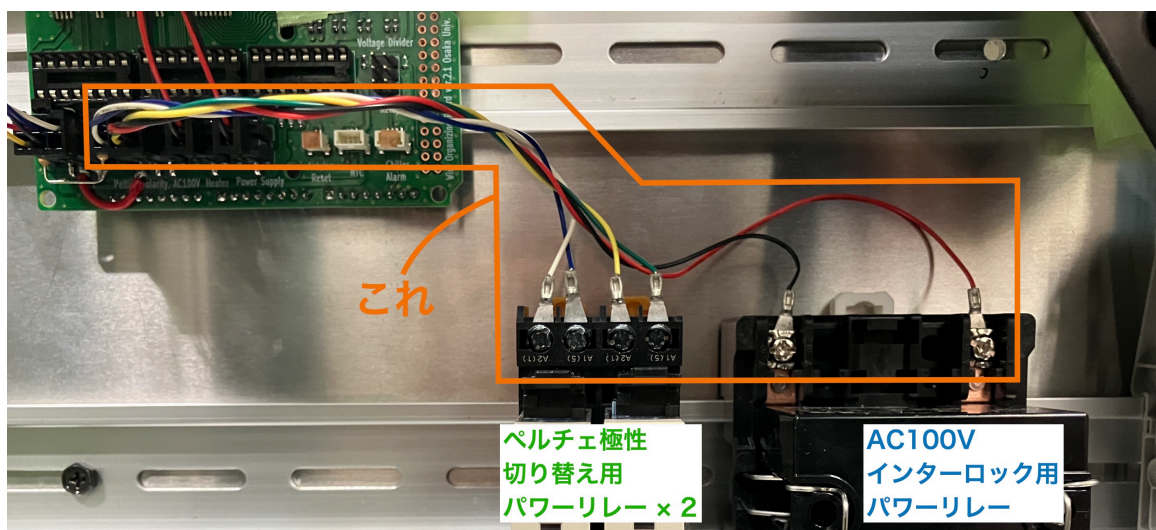


図 A.9: パワーリレーと回路基板を繋ぐ電線の写真

■ヒーター ヒーターを駆動するための12V電圧を送る。電線は、ヒーターについたものを用いた。基板側には、Molex micro-fit コネクタの圧着端子メスをつける。

■Power Supply これは、外部電源装置から基板に 12V 電圧を取り入れるためである。図 A.2b で説明した、インターロック機能を取り入れるため、緊急停止ボタンを介して基板と 12V 電源を繋げた。接続方法は、図 A.10 の通りである。緊急停止ボタンを押すと、赤色の線で繋がれた部分が断線するため、回路基板に 12V が供給されなくなる。それぞれ、電線は AWG28 のものを用いた。電線の長さ、つける端子は図の通りである。

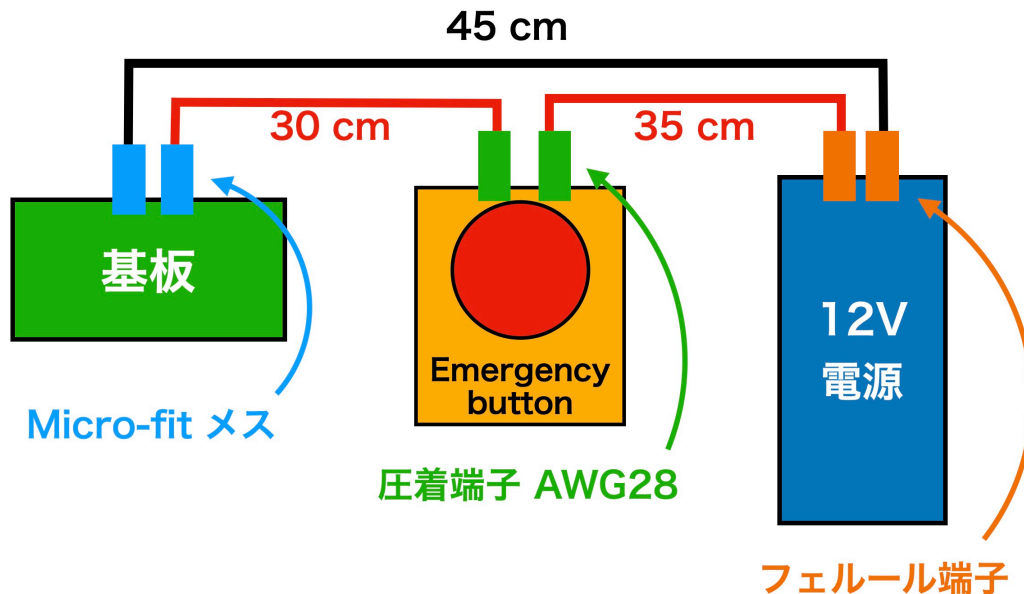


図 A.10: 12 V 電源と回路基板を繋ぐ電線の図

■Arduino Control これは、Arduino Mega2560 Rev3 に外部からリセット信号を送れるようにするためにつけた。現在は使われていないが、2つのピンを短絡させることでリセットすることができる。

■NTC 3本の AWG28 の電線をコネクタでまとめる。図 A.7 の通り、ピン配置は左から順に、Read(読み取り線)、スペア、GND、5V である。4ピンのコネクタを使ったため、1つはスペアとしてとっている。基板側は Molex pico-clasp コネクタの圧着端子メスをつける。NTC 側は、QI(2550) コネクタ端子のメスをつける。電線の長さは 85 cm にした。

■Chiller Alarm ここから、チラーのアラーム信号を入れる。ピン配置は、図 A.7 の通りである。チラーが異常状態となるとアラーム信号が High になる。そのようなときに、インターロックを発動させる機能があるが、発動と同時にチラーの電源が切れてしまう。そのためチラーがどのような異常状態であったか確認ができず不便なので、現在は使われていない。そのため、アナログ入力ピンを作っておき、他の用途にも使えるようにした。

使用する部品の再選定

図 A.3 における③はヒーターと、後に説明するパワーリレーを駆動するための電源である。元々は 5V、12V の 2つの系統があったが、12V に統一することで、配線の煩雑さを少なくした。図 A.3 における④は先述した、ペルチェ極星切り替え用と AC100V インターロック用のパワーリレーである。ペルチェ極性切り替え用には、図 A.11a に示すようなオムロン製の G2R-1-SN-DC12[21] を用いた。AC100V インターロック用には、図 A.11b に示すようなパナソニック製の HE2AN-DC12V[22] を用いた。どちらも高い電圧に耐える必要があるため、メカニカルリレーである必要があった。その代わりに、ソケットに挿したら使えるものを選び、素早く交換ができるようにした。またソケットは、後述する金属製のレールに取り付けられるものを選んだ。

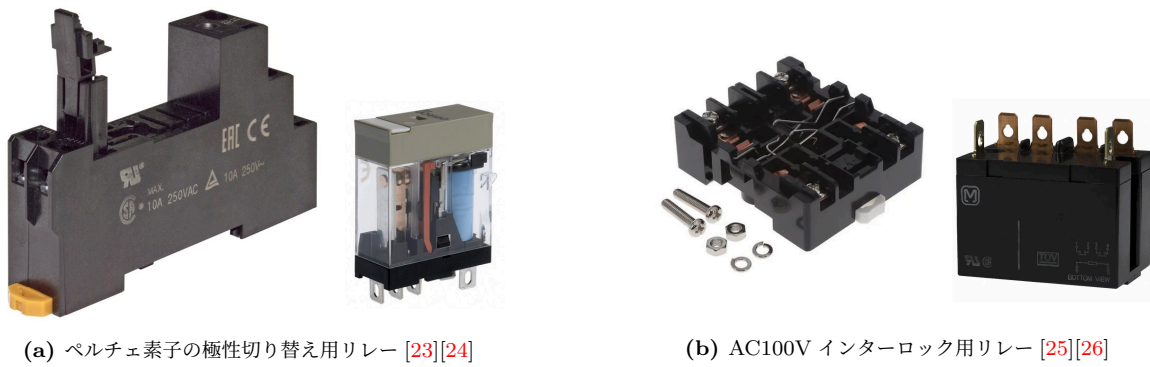


図 A.11: 今回選んだパワーリレー

部品取り付け位置の変更

図 A.1a で見たように、改良前の部品は全てアルミ板の裏側に取り付けられていた。これも保守しづらい理由の 1 つであったため、全ての部品を前面に取り付けるようにした。図 A.12 は、全体の配線概念図である。金属製のレールをアルミ板にネジ止めた。全ての部品は、金属製のレールに取り付けられるので、これによりアルミ版に全ての部品がつく。さらに、アルミ板にはダクトレールも取り付けした。A.1.3 で説明した電線は、図 A.12 でオレンジの線でまとめて表した。このように、各電線をダクトレールを通して cooling box 付近の各接続先に繋げることで、配線の煩雑さを減らした。ペルチェの電線は邪魔にならないよう、アルミ板の裏を通して cooling box まで繋げる。

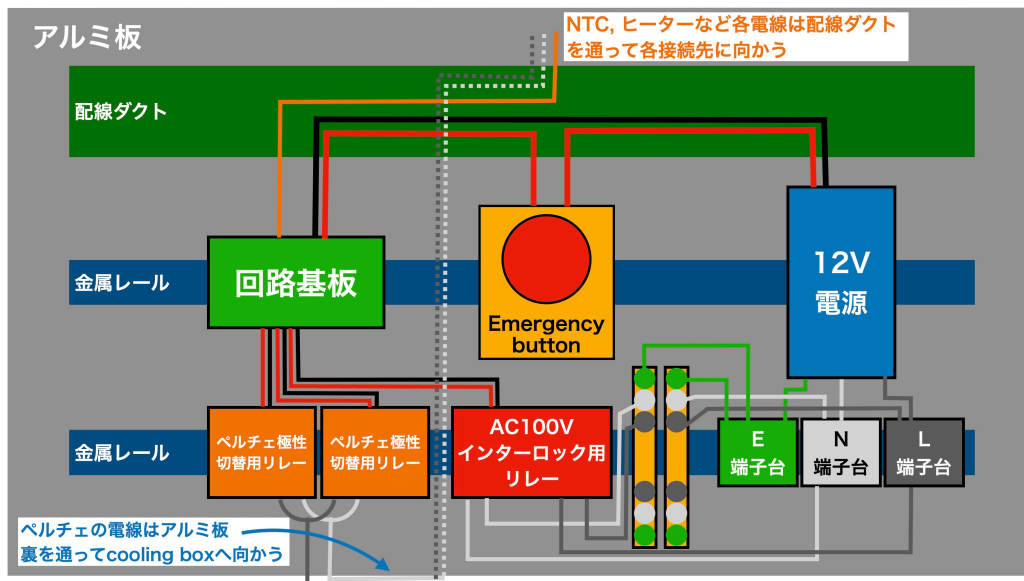


図 A.12: 全体の配線概念図

ここで、新たに出てきた端子台周りの配線と、ペルチェの電線の詳細を説明する。図 A.13 は、端子台周辺の配線図である。L、N、E はそれぞれ AC100V の Live 線、Neutral 線、Earth 線である。いずれも AWG16 の電線を使った。図に示した通り、AC100V インターロック用リレーには圧着端子を、それ以外にはフェルール端子をつける。それぞれの電線の長さは以下の通りである。① 緑：12 cm、13 cm、白：14 cm、黒：15 cm ② 白、黒：20 cm ③ 緑、白、黒：10 cm ④ 白：17 cm、黒：15 cm また、図 A.13 中央に 2 つの黄色の端子台がある。右には、外部コンセントを繋ぎ、AC100V 電源を供給する。左には、コンセントを繋ぎ、そこからチラーとペルチェ用電源装置の電源を得る。

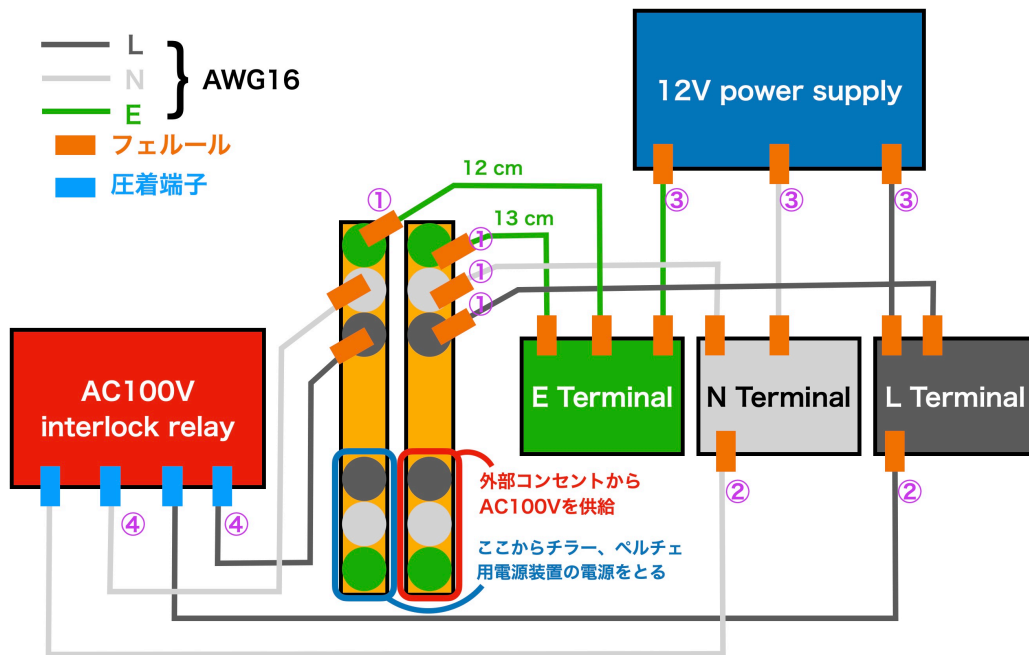


図 A.13: 端子台周辺の配線図

ペルチェ素子の極性切り替え用リレーの接続方法は図 A.14 の通りである。このリレーは C 接点方式である。コイル電圧がかかっていないときは、COM と NC(Normally Close) が導通しており、COM と NO(Normally Open) は絶縁している。コイル電圧がかかっているときは、COM と NC(Normally Close) が絶縁し、COM と NO(Normally Open) は導通する。ペルチェ +、ペルチェ - の COM にそれぞれ、ペルチェ用電源のプラス出力、マイナス出力を繋げる。図で青色の線で描いた、ペルチェ + の NC とペルチェ - の NO を、分岐させた電線で繋げ、ペルチェ素子のプラス側に接続する。図で緑色の線で描いた、ペルチェ + の NO とペルチェ - の NC も、分岐させた電線で繋げ、ペルチェ素子のマイナス側に接続する。

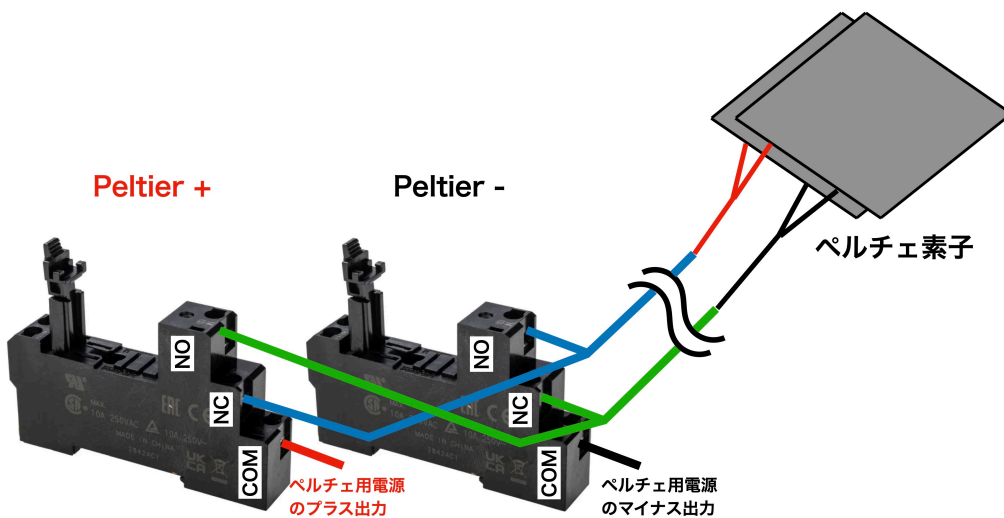


図 A.14: ペルチェの極性

このように、ペルチェの電線は分岐させた電線である必要がある。ペルチェ素子も 2 つ用いるため、ペルチェ素子側も分岐させる。このようなペルチェの電線は、図 A.15 のように作られる。

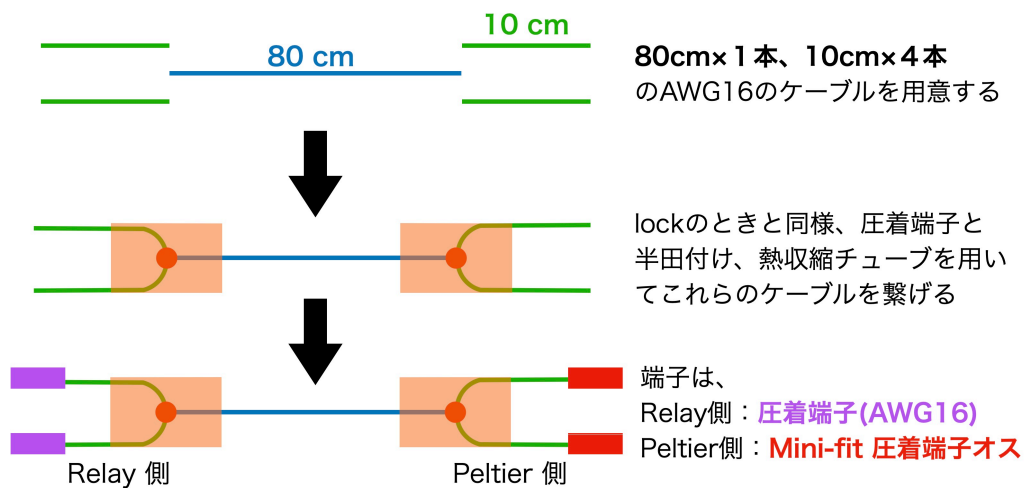


図 A.15: ペルチェの電線の作り方

A.1.4 改良後の状態

図 A.16 は、改良後の動作試験セットアップの状態である。A.1.3 で説明した改良を加えたことで、接触不良が起こりづらくなり、保守しやすくなった。量産の工程において、品質保証検査に用いる動作試験セットアップは7台である。それに加え、検出器モジュールの性質を詳しく調べるため、高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、東京科学大学、大阪大学、九州大学にも動作試験セットアップがある。今回、これらすべての動作試験セットアップに改良を加えた。改良を加えてから10ヶ月弱ほど経つが、今のところ大きな問題はなく動いている。

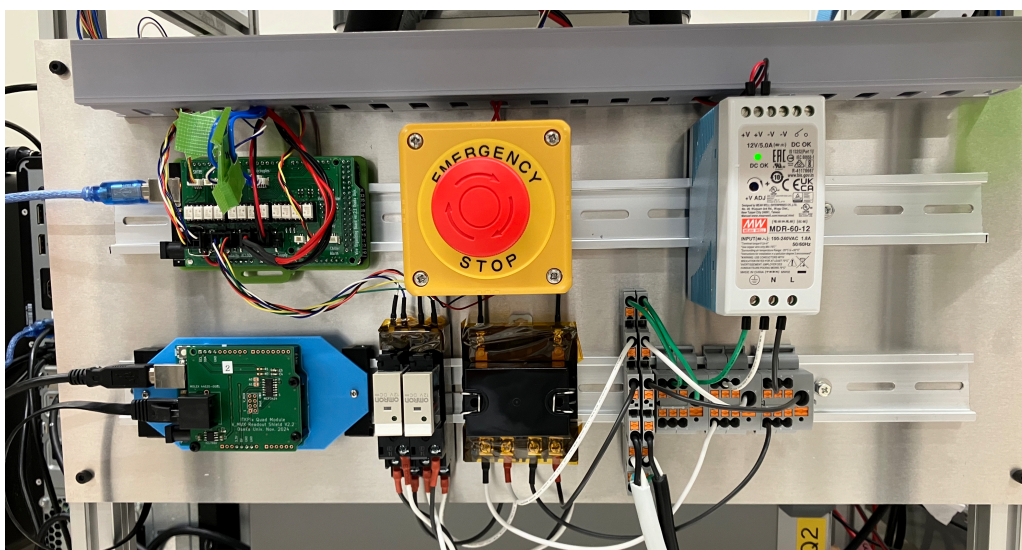


図 A.16: 改良後の状態

謝辞

本修士論文の執筆および研究を進めるにあたり、多くの方々より多大なるご指導とご支援を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

南條創教授には、研究の進め方や論理的思考の在り方について丁寧にご指導いただきました。特に、本修士論文をはじめとする研究報告書の作成において、自身の研究の意義を明確に捉え、効果的に伝えることの重要性、また研究内容を分かりやすく他者へ伝える方法を教えていただきました。今後アカデミアを離れて就職するにあたり、これらは研究に限らずあらゆる場面で重要となる学びであり、研究者としてのみならず人間としても成長する機会を与えていただいたと感じております。

増渕達也准教授には、研究の進捗や進め方について、頻繁に時間を設けて親身にご助言いただきました。とりわけ、期限間際になりがちな私の状況に対しても辛抱強く支えてくださったことに、心より感謝申し上げます。また、研究以外の話題についても気軽にお話しくださり、精神的にも大きく支えられました。

廣瀬穰助教には、広く深い知識に基づき、学部4年から修士2年に至るまでの多様な研究内容に対して鋭い視点からご助言をいただきました。特に、発表用スライド作成において、研究内容をいかに分かりやすく伝えるかという点を具体的にご指導いただき、大きな学びとなりました。

また、大阪大学 ATLAS 実験グループの皆様にも多くの支えをいただきました。先輩である Lakmin Wickremasinghe さんには、在籍期間が重なった修士1年次まで、当時取り組んでいた回路基板設計などに関して有益な助言をいただきました。荒木田陸斗さんには、ATLAS 実験グループに配属された当初、右も左も分からず困っていた私に対し、基礎から様々なことをご教示いただきました。久郷莉奈さんには、熱心に研究へ取り組まれる姿勢から多くの刺激を受けました。後輩の石井耀くん、寺田真都くんには、私自身が修士1年次の頃と比べても一層遅しく、熱心に研究に取り組む姿が印象的であり、私自身の励みとなりました。

同期の小川大樹くん、本間芽衣さんには、研究の合間に多くの会話を通じてリフレッシュする機会をいただきました。また、互いに研究へ向き合う姿から刺激を受け、努力を継続する原動力となりました。

さらに、同じ研究室の別実験グループに所属する小野啓太さん、鈴木琉将くん、廣瀬祐さん、松田英晃くんには、日々の交流を通じて充実した研究室生活を支えていただきました。学部4年生の尾前丈一郎くん、京極貴文くん、森敦也くんの熱心に研究へ取り組む姿勢からも多くの刺激を受けました。

事務面においては、秘書の前田純子さん、清川聖子さんに、各種手続き等で多大なご支援をいただきました。加えて研究以外の話題でも気にかけてくださり、研究生活を多方面から支えていただいたことに深く感謝申し上げます。

最後に、本研究に関わり、支えてくださったすべての皆様に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Philippe Mouche. “Overall view of the LHC” (2014). URL: <https://cds.cern.ch/record/1708847>.
- [2] The ATLAS Collaboration. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”. *Journal of Instrumentation* vol. 3.no. 08 (Aug. 2008), p. S08003. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003). URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003>.
- [3] ATLAS Collaboration. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider: A Description of the Detector Configuration for Run 3”. *JINST* vol. 19 (2024), p. P05063. DOI: [10.1088/1748-0221/19/05/P05063](https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/05/P05063). arXiv: [2305.16623](https://arxiv.org/abs/2305.16623) [physics.ins-det].
- [4] M Capeans et al. *ATLAS Insertable B-Layer Technical Design Report*. Tech. rep. 2010. URL: <https://cds.cern.ch/record/1291633>.
- [5] vol. 3.no. 08 (Aug. 2008), p. S08003. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003). URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003>.
- [6] *Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Pixel Detector*. Tech. rep. Geneva: CERN, 2017. DOI: [10.17181/CERN.FOZZ.ZP3Q](https://cds.cern.ch/record/2285585). URL: <https://cds.cern.ch/record/2285585>.
- [7] 岩田 和志. “HL-LHC ATLAS 実験ピクセル検出器量産時の X 線を用いたバンブ接続の https://cds.cern.ch/record/2920417 評価”. 修士論文. MA thesis. 大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻, Feb. 2022.
- [8] 荒木田 陸斗. “高輝度 LHC ATLAS 実験用シリコンピクセル検出器の X 線ヒット信号を用いた不良ピクセル判定の正確性”. MA thesis. 大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻, 2024.
- [9] 板橋 浩介. *ATLAS ITk モジュール量産における性能評価システムの開発*. 2023. URL: https://openit.kek.jp/workshop/2023/dsys/presentation/itabashi.pdf/@download/file/%E8%A8%88%E6%B8%AC%E3%82%B7%E3%82%B9%E3%83%86%E3%83%A0%E7%A0%94%E7%A9%B6%E4%BC%9A2023_%E6%9D%BF%E6%A9%8B%E3%82%B9%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%89.pdf.
- [10] Maurice Garcia-Sciveres. *RD53C Chip Manual*. Tech. rep. Geneva: CERN, 2024. URL: <https://cds.cern.ch/record/2890222>.
- [11] ATLAS Collaboration. *Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Pixel Detector*. Tech. rep. 2017. DOI: [10.17181/CERN.FOZZ.ZP3Q](https://cds.cern.ch/record/2285585).
- [12] 山家谷 昌平. “高輝度 LHC ATLAS シリコンピクセル検出器用読み出し ASIC の閾値調整機構の性能評価”. 修士論文. MA thesis. 大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻, Feb. 2020.
- [13] URL: <https://sensirion.com/jp/products/catalog/SHT85>.
- [14] URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560/>.
- [15] 久郷 莉奈. “大面積シリコンピクセル検出器を用いたビームテスト用飛跡検出器の開発”. MA thesis. 大阪大学大学院 理学研究科物理学専攻, 2024.
- [16] URL: <https://gitlab.cern.ch/YARR/YARR>.
- [17] Shohei Shirabe. *Studies for the Phase-2 ATLAS ITk pixel upgrade*. 2020. URL: https://lpsc-indico.in2p3.fr/event/2826/attachments/4416/6173/LPSC_PostdocSeminar_shirabe.20200217.pdf.
- [18] URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX31855.pdf>.
- [19] URL: <https://akizukidenshi.com/catalog/g/g108218/>.
- [20] URL: <https://www.molex.com/ja-jp/home>.

- [21] URL: https://www.fa.omron.co.jp/product/item/G2R-1-SN_DC12/.
- [22] URL: <https://industry.panasonic.com/jp/ja/products/control/relay/power/number/ahe2211>.
- [23] URL: <https://www.digikey.jp/ja/products/detail/omron-automation-and-safety/G2R-1-SN-DC12-S/710521>.
- [24] URL: <https://www.fa.omron.co.jp/product/item/P2RFZ-05-E/>.
- [25] URL: <https://www.digikey.jp/ja/products/detail/panasonic-electric-works/HE2AN-DC12V/570796>.
- [26] URL: <https://www.digikey.jp/ja/products/detail/panasonic-electric-works/JH1-SF/635214>.