

令和4年度 修士論文

高輝度 LHC ATLAS 実験で用いる
シリコンピクセル検出器モジュールの
閾値調整における目標閾値からの乖離

大阪大学
大学院理学研究科物理学専攻
山中 卓 研究室
博士前期課程2年
荒久田 周作

2023年1月

概要

ATLAS 実験は陽子・陽子衝突型加速器 (LHC) を用い、ヒッグス粒子の性質の研究や標準理論の枠組みを超える物理の探索をしている。研究の更なる発展のため、LHC ではビーム輝度の向上が計画されている (HL-LHC 計画)。それに伴い ATLAS 実験では、最内層のシリコンピクセル検出器をアップグレードする。シリコンピクセル検出器は多数の検出器モジュールで構成される。1つの検出器モジュールはセンサー、フレキシブル基板、4つの専用の集積回路 (ASIC) を持つ。センサーと ASIC は同様に $50\ \mu\text{m}$ 角でピクセル化されている。1つの ASIC は約 15,000 個のピクセルを持ち、それぞれのピクセルが荷電粒子を検出する。ピクセルは、センサーからの信号、あるいは ASIC で生成されるテスト信号の入力に対し、閾値を超えるとヒットと判定して、その情報をデジタル信号として後段に送り出す。この閾値はピクセルごとに、ASIC 内部で保存されるレジスタ値で設定するが、そのレジスタ値で決まる電荷量の閾値と、レジスタ値の関係はピクセルごとに異なる。閾値は信号の電荷量に相当する閾値に設定したい。目標閾値に調整するには、対応する電荷量のテスト信号を入力する。この入力回数に対するヒット数の比 (ヒット率) の値を基準にしてレジスタ値を変更する。入力電荷量を変化させた際のヒット率の推移を用いて、閾値に対応する電荷量を測定する。実際に閾値を調整・測定したところ、目標閾値と測定された閾値の間に乖離があった。また、テスト信号を送る際、同時に動作させるピクセル数を指定することができる。そして、同時に測定するピクセル数を変化させると閾値分布も変化した。本研究の目的は、これらの閾値の乖離と変化の原因をつきとめることである。そのために、原因の候補を提案し、検証した。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	LHC ATLAS 実験	1
1.1.1	ATLAS 検出器	2
1.1.2	内部飛跡検出器	2
1.1.3	HL-LHC 計画	3
1.2	新型シリコンピクセル検出器	3
1.2.1	半導体ピクセル検出器	4
1.2.2	検出器モジュール	5
1.2.3	読み出し ASIC	6
1.3	検出器モジュールの閾値	7
1.3.1	閾値の調整と調整結果	8
1.3.2	ASIC 内で同時にテスト信号を入力するピクセル数を変化させた時の閾値測定	10
1.4	本研究の目的	11
第 2 章	検出器モジュールの閾値の調整と測定	12
2.1	検出器モジュールの動作セットアップ	12
2.2	テスト信号	14
2.3	電荷入力用のコンデンサの静電容量とテスト信号による入力電荷量	15
2.4	テスト信号を同時に入力するピクセル数	16
2.5	閾値の測定	17
2.5.1	閾値測定手法	17
2.5.2	ピクセルごとの絶対電荷の違いが閾値測定に与える影響	18
2.6	閾値の調整	19
2.6.1	閾値調整レジスタ	19
2.6.2	閾値調整手法	20
2.6.2.1	一括調整レジスタの調整手法	21
2.6.2.2	個別調整レジスタの調整手法	24
2.6.3	閾値調整の方法	26

2.6.4	二度目の一括調整レジスタ調整について	28
2.6.5	静電容量のばらつきによる絶対電荷の違いの閾値調整への影響	29
第 3 章	閾値調整の結果	31
3.1	閾値調整の方法の各段階	31
3.1.1	一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値が初期値である時の閾値分布	31
3.1.2	仮の目標閾値への閾値調整後の閾値分布	32
3.1.3	真の目標閾値への閾値調整後の閾値分布	33
3.2	複数の真の目標閾値への調整結果	34
3.3	同時入力ピクセル数の変化による閾値ピーク値の変化	36
3.4	挙動からの検討	38
3.4.1	真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の乖離	38
3.4.2	同時入力ピクセル数を変化させたときの閾値分布のピーク値の変化	38
第 4 章	同時入力ピクセル数依存の閾値分布のピーク値の変化の検証	40
4.1	同時入力ピクセル数とテスト信号	40
4.2	テスト信号による入力波形の波高推定法	42
4.3	閾値到達時刻測定	43
4.3.1	測定条件	43
4.4	1 ピクセルでのテスト信号の波形の再現	44
4.5	波高推定手法の各段階	45
4.6	波高変化の測定精度	46
4.6.1	検証方法とその際の測定条件	46
4.6.2	結果	47
4.7	nsteps を変化させた時の波高推定結果	48
4.8	コアカラムあたりの同時入力ピクセル数依存のテスト信号の波高の減少	49
4.9	考察	50
4.9.1	最適な nsteps について	50
4.9.2	テスト信号の波高推定法について	50
4.9.3	閾値到達時刻が早いイベント	52
4.9.4	テスト信号の推定された波高と目標としていた入力電荷量の違い	54
第 5 章	閾値測定時のフィット手法の検討	55
5.1	フィットの問題	55
5.2	二項分布の誤差でのフィット結果	57
5.3	フィット関数と誤差を変更した時に測定される閾値の結果	64
5.4	ノイズ量の増加に関する考察	64

5.4.1	YARR の関数に二項分布の誤差をつける	65
5.4.2	新しく定義した関数に固定した誤差 1 をつける	68
5.4.3	まとめ	68
第 6 章	結論	70
	謝辞	71
	参考文献	73

目次

1.1	LHC の簡略図 [1]	1
1.2	ATLAS 検出器 [2]	2
1.3	内部飛跡検出器 [3]	3
1.4	新型内部飛跡検出器の断面図 [4]	4
1.5	一般的なピクセル検出器の概念図	4
1.6	検出器モジュールの模式図 [5]	5
1.7	検出器モジュールを図 1.6 の上側から見たときのチップ配置とピクセル配置。ピクセルは縦 384× 横 400 ピクセルになっている。	6
1.8	ASIC がセンサーから入力される電荷を処理するときの概念図	6
1.9	複数種類の電荷量を複数回ずつ入力し、横軸を入力電荷量にして縦軸をヒット数を縦軸にしたグラフ。フィット関数においてヒット率が 50% になる電荷量が閾値となる。	7
1.10	チップ 3 における目標閾値 996e の時の閾値調整前後の比較。左が調整前。右が調整後である。右の図中の赤線は全体の閾値を求めるためのフィット関数（ガウス分布）、右上にフィットした時の結果が示されている。下の Mean が全体の閾値である。	9
1.11	チップ 1 の閾値分布。右上にピークに対してフィットした時の全体の閾値が示されている。996e よりも 10e 以上小さい。	9
1.12	1.3.1 節の閾値のレジスタ値と同じレジスタ値で、1.3.1 節では 480 ピクセルだった同時入力ピクセル数を 1200 ピクセルに増やして閾値を測定したときのチップ 1 の閾値分布。閾値分布のピーク値が 993.7e と測定され、約 20e 大きくなった。	10
1.13	1.3.1 節の閾値のレジスタ値と同じレジスタ値で、1.3.1 節では 480 ピクセルだった同時入力ピクセル数を 1200 ピクセルに増やして閾値を測定したときのチップ 3 の閾値分布。閾値分布のピーク値が 1014e と測定され、約 20e 大きくなった。元々の閾値分布では閾値分布のピーク値が 996e に近かったにも関わらず、10e 以上離れている。	11
2.1	本研究で用いたセットアップの概念図。	12

2.2	テスト信号を入力する回路の概念図。図 2.2a は ASIC のマニュアル [8] に描かれている、1つのピクセルのアナログ回路にテスト信号を入力する回路の概念図。図 2.2b は、複数のピクセルでのテスト信号とテスト信号によるヒット判定の概念図である。	14
2.3	nsteps が 2 の時に同時に信号を入力するコアカラムを示した図。25 コアカラムごとのテスト信号の入力を 2 回実施して終了する。	16
2.4	閾値測定 の概念図。横軸が入力電荷。縦軸が 1つのピクセルに 50 回テスト信号を入力したときのヒット数。ヒット数が入力回数のちょうど 50% になる電荷が閾値になる。	17
2.5	ピクセルごとに絶対電荷が異なる時の閾値測定がどうなるかを示した概念図。上の図は横軸を絶対電荷とした時のヒット数分布である。静電容量が 2 倍であるピクセル A は (上図中青線)、レジスタ値に対してピクセル B (上図中赤線) の 2 倍の幅で入力電荷が増える。下の図は横軸をレジスタ値としたヒット数分布である。ピクセル A はピクセル B に比べて 2 分の 1 のレジスタ値で閾値に達する。	18
2.6	一括調整レジスタを変更したときの閾値分布変化の概念図。一括調整レジスタを変更することで全ピクセルが目標閾値に近づく。	19
2.7	個別調整レジスタを変更したときの閾値分布変化の概念図。個別調整レジスタを変更することでピクセル個別で目標閾値に近づき、閾値分布のばらつきが小さくなる。	20
2.8	一括調整レジスタ調整手法の概念図	21
2.9	一括調整レジスタ調整過程での一括調整レジスタのレジスタ値の変化の様子。レジスタ値の変化幅の初期値は 16 である。平均ヒット率は入力回数に対する信号を入力した全ピクセルの平均ヒット数の比である。ヒット率が 0.51 以上か 0.49 以下かで一括調整レジスタのレジスタ値の増減を決定する。前回の試行時の増減と逆の増減になる場合、一括調整レジスタのレジスタ値の変化幅を半分にする。また、変化幅は 1 になったとき、平均ヒット率に関わらず調整は終了する。	22
2.10	一括調整レジスタの調整においてノイズがなくピクセルごとの個体差のみが存在するときの、閾値調整の概念図。	23
2.11	測定された閾値分布における、計算されたヒット率の許容範囲。	24
2.12	個別調整レジスタ調整手法の挙動	25
2.13	初期状態から直接低めの閾値に調整した時の概念図。ノイズでヒットし続けることになる領域ではヒットが得られずうまく閾値調整できない。	27
2.14	一度大きめの閾値に調整してから直接低めの閾値に調整した時の概念図。ノイズでヒットし続けることになる領域を避けて閾値調整できるため、正しくヒット判定できるピクセルが増える。	27

2.15	1503e に閾値調整した後に 996e に一括調整レジスタを変更したときのチップ 3 の閾値分布。全体の閾値は 1000e よりも大きく、低い閾値に向けて尾を引いている。	29
3.1	一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値が初期値である時の閾値分布比較。閾値分布のピーク値は Mean として図中に示されており、ASIC によって異なり 1500~1800e の範囲にある。	32
3.2	仮の目標閾値である 1503e へ一括調整レジスタと個別調整レジスタを調整した後の閾値分布。それぞれの閾値分布のばらつきは小さくなり、1503e から ±30e の範囲にピークがある。図中右上の箱の下部が、ピークをガウスフィットした結果である。	33
3.3	真の目標閾値である 996e へ一括調整レジスタと個別調整レジスタを調整した後の閾値分布。それぞれの閾値分布のばらつきは小さくなり、996e から ±30e の範囲にピークがある。図中右上の箱の下部が、ピークをガウスフィットした結果である。	34
3.4	複数の閾値に調整した時の調整結果。それぞれを直線でフィットした時の傾きと y 切片が図右側に書かれ、またフィット関数が青線で示されている。また、真の目標閾値の線が緑色で描かれている。	35
3.5	複数の閾値に調整したときの真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の差分の分布。チップ 3 は測定された閾値分布のピーク値が真の目標閾値を超えることがあるが、その他のチップでは全て、真の目標閾値よりも測定された閾値分布のピーク値が小さい。また、真の目標閾値が大きくなるとこの差分が負の方向に大きくなる傾向もあるが、本研究ではこの傾向については調査しない。	36
3.6	閾値のレジスタ値は 3.1.3 節のものを使用し、nsteps を 5 から 2 に変えて閾値測定した際の閾値分布。	37
3.7	nsteps を 1、2、5、15、25、50 と変化させたときの閾値分布のピーク値を測定した図。赤線は真の目標閾値である 996e を示す。nsteps が増えるごとに閾値分布のピーク値は小さくなる。	38
4.1	RC 回路の際のピクセルに入力されるテスト信号の概念図。図 4.1a では、単に 1 ピクセルにテスト信号を入力する場合でも、電荷入力用コンデンサの静電容量で RC 回路の時定数が変わる。図 4.1b では、同時入力ピクセル数だけ電荷入力用コンデンサが並列に繋がられるため、時定数 RC への影響が大きい。	41
4.2	閾値を超えた時間と閾値を下回った時間を複数の閾値で測定して、入力された信号の波形を再現する概念図。	42

4.3	閾値到達時刻と閾値超過時間の概念図。黄緑の線が閾値で、赤線の時間に信号が閾値を超え、その後閾値を下回る。この閾値を超えた時刻、下回った時刻が閾値到達時刻である。また、閾値到達時刻同士の差分である青線が閾値超過時間である。	43
4.4	チップ4のとある1ピクセルに入力されたテスト信号。横軸が時間であり、縦軸が閾値到達時刻の測定に用いた閾値である。誤差は測定された時刻の標準誤差である。	44
4.5	チップ1に入力電荷量1503eでnstepsが2のテスト信号を入力した。4.4節で作成したような1ピクセルの波形の測定点を、ひとつの二次元ヒストグラムに、誤差を無視して全ピクセル分つめる。この時得られた二次元ヒストグラム。横軸が時間であり、縦軸が閾値到達時刻が測定された閾値である。図中赤線が目標としていた閾値。	45
4.6	図4.5に対して、1.5625 ns ごとに閾値の平均とその自乗平均平方根を計算したグラフ。さらに頂点付近をガウス分布でフィットする。図中右上の箱の下部がフィット結果であり、波高は約1658eとなった。	46
4.7	4.6.1節の条件で波高を推定した結果。縦軸が測定された波高であり、横軸が入力したテスト信号の電荷量である。また、入力電荷量と波高推定値が同じ場合の線を赤線で示している。	47
4.8	図4.7の1400eから1597eの間を拡大した図。入力電荷量と波高推定値が同じ場合の線を赤線で示している。	48
4.9	4.3.1節の条件で推定した波高のnsteps依存。どのチップでもnstepsの1から25の変化に対し、少なくとも20e以上は変化している。	49
4.10	波形を測定するための閾値を約20eずつに変えて波高を推定した結果。縦軸が測定された波高であり、横軸が入力したテスト信号の電荷量である。また、入力電荷量と波高推定値が同じ場合の線を赤線で示している。	51
4.11	図4.10の1400eから1597eの間を拡大した図。また、入力電荷量と波高推定値が同じ場合の線を赤線で示している。	51
4.12	チップ1で閾値を1597eとした時に1503eの入力電荷をnsteps5で入力したときのデータで、横軸ヒット数で縦軸を信号が閾値を超える時刻とした二次元ヒストグラムにした図。オレンジの線が仮に決定した真の信号が閾値を超える時刻で、緑色、赤色、水色、黒色の線は、それぞれら信号が閾値を超える時刻が0になるイベントが1、2、3、4回発生した場合に計算される信号が閾値を超える時刻を示した線である。	53
5.1	YARRと同じ式で、ROOTを用いて全ての測定点の誤差を1としてフィットした時のピクセルごとの閾値の差分分布。	56

5.2	1 ピクセルのヒット数分布に対して、新しく定義した関数で二項分布の誤差をつけてフィットした結果と、YARR の式で固定した誤差をつけてフィットした結果の比較図。赤線が今回フィットされた結果の関数であり、黄緑色の線が 5.1 節で YARR の出力を再現した ROOT のフィット結果の関数である。右中央に 5.1 節でフィットした結果 (YARR) と今回のフィットの結果 (ROOT) を載せた。閾値にはほぼ差がなく、ノイズ量に大きな差がある。	57
5.3	5.1 節で計算した閾値の分布 (図中青線) と、式 5.2 で二項分布誤差をつけフィットした結果の閾値の分布 (図中赤線) の比較。	58
5.4	5.1 節の閾値と式 5.2 で二項分布誤差をつけフィットした結果の閾値のピクセルごとの差分。	59
5.5	5.1 節で計算したノイズ量の分布 (図中青線) と、式 5.2 で二項分布誤差をつけフィットした結果のノイズ量の分布 (図中赤線) の比較。	60
5.6	5.1 節のノイズ量と式 5.2 で二項分布誤差をつけフィットした結果のノイズ量のピクセルごとの差分。	61
5.7	チップ 1 における、二項分布の誤差をつけ式 5.2 を用いた、フィット時の自由度の分布。	62
5.8	式 5.2 に二項分布の誤差をつけた際の、各自由度ごとの χ^2 分布。図中赤線は、それぞれの自由度の際の χ^2 の理論曲線である。自由度が 6、7 の時は理論曲線にはほぼ一致しているが、自由度が 8、9 の時は分布のピークの χ^2 が理論曲線よりも小さい。	63
5.9	式 5.2 に二項分布の誤差をつけた際の χ^2/ndf 分布。	64
5.10	YARR の関数を用いて誤差を変更した。その際の、 σ_{Fix}^{YARR} と σ_{Bin}^{YARR} の分布。赤が σ_{Bin}^{YARR} 。青が σ_{Fix}^{YARR} である。	66
5.11	YARR の関数を用いて誤差を変更した。その際の、 $\sigma_{Bin}^{YARR} - \sigma_{Fix}^{YARR}$ の差分分布。	66
5.12	式 2.2 の injections と offset の二次元ヒストグラム。左が固定誤差でのヒストグラムで右が二項分布誤差のヒストグラムである。	67
5.13	σ_{Fix}^{New} と σ_{Bin}^{New} それぞれのノイズ量分布。赤が σ_{Bin}^{New} 。青が σ_{Fix}^{New} である。	68
5.14	ら $\sigma_{Bin}^{New} - \sigma_{Fix}^{New}$ の差分分布。	68

第 1 章

序論

1.1 LHC ATLAS 実験

Large Hadron Collider (LHC) は、欧州原子核研究機構 (CERN) の、陽子・陽子衝突型加速器である。スイス・ジュネーブ近郊の地下 100 m、周長 27 km のトンネル内に建設された。現在は陽子ビームの重心系衝突エネルギーが 13.6 TeV に達している。LHC には図 1.1 のように 4 つの陽子・陽子衝突点があり、そのうちのひとつに ATLAS 実験の ATLAS 検出器が設置されている。ATLAS 実験の目的は、ヒッグス粒子の性質の研究や、素粒子標準理論の枠組みを超えた新物理の発見などである。

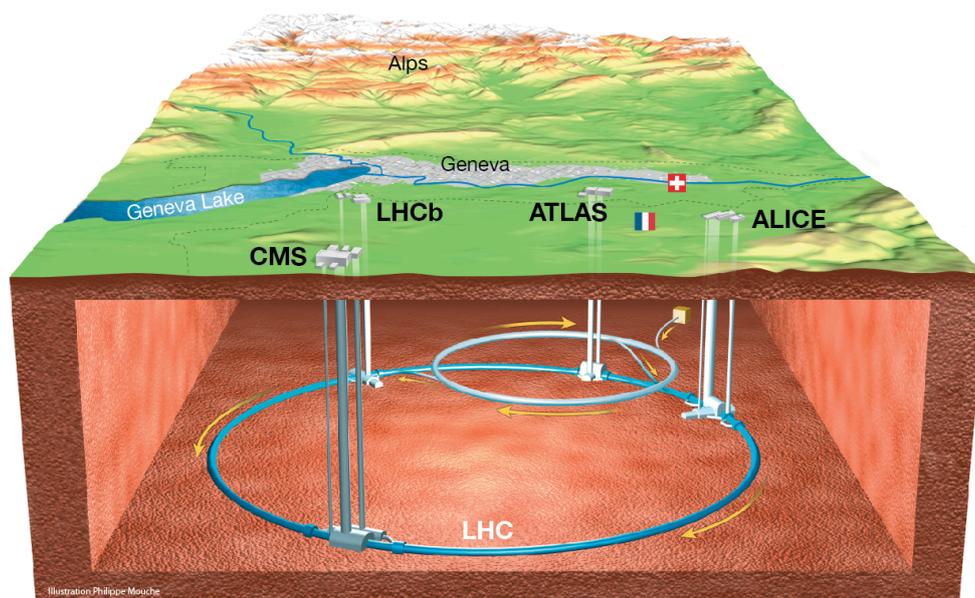


図 1.1: LHC の簡略図 [1]

1.1.1 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は図 1.2 のような長さ 44 m、直径 25 m の円筒型の検出器である。検出器の中心に衝突点があり、それを全方位に渡って覆うように複数の検出器が並べられている。これらの検出器から得られる情報を組み合わせ、陽子・陽子衝突によって生じた粒子の飛跡、運動量、エネルギーなどを再構成する。

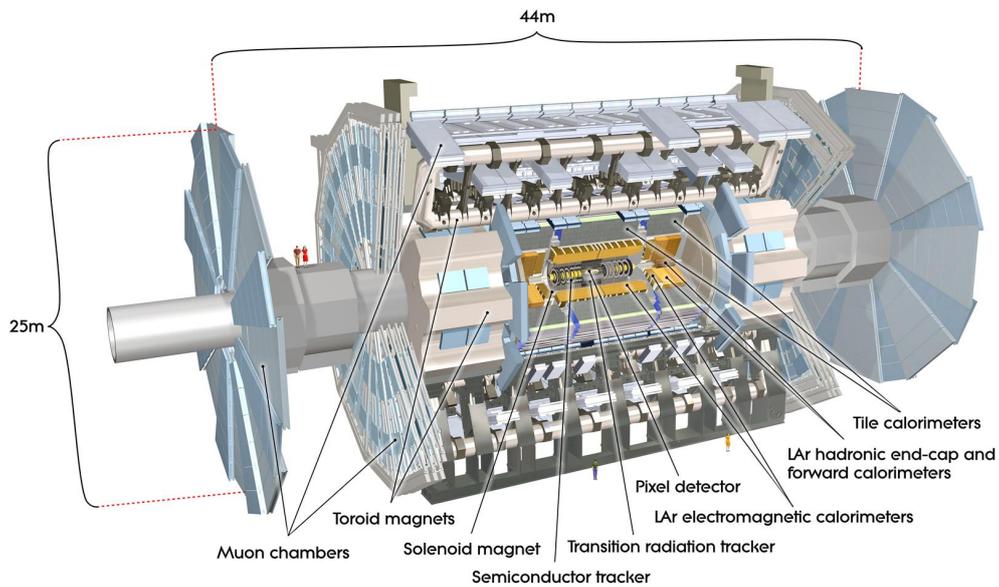


図 1.2: ATLAS 検出器 [2]

1.1.2 内部飛跡検出器

本研究に関係がある内部飛跡検出器について述べる。内部飛跡検出器は図 1.2 に示す ATLAS 検出器の最内層にある。内部飛跡検出器の全体図を図 1.3 に示す。内側からシリコンピクセル検出器 (Pixel detector)、シリコンストリップ検出器 (Semiconductor tracker)、遷移放射検出器 (Transition radiation tracker) の順に配置されている。内部飛跡検出器外側にあるソレノイド磁石 (Solenoid magnet) の作る 2 テスラの磁場によりそこを通る荷電粒子の飛跡は曲がる。内部飛跡検出器ではこの飛跡を再構成し、運動量を測定する。

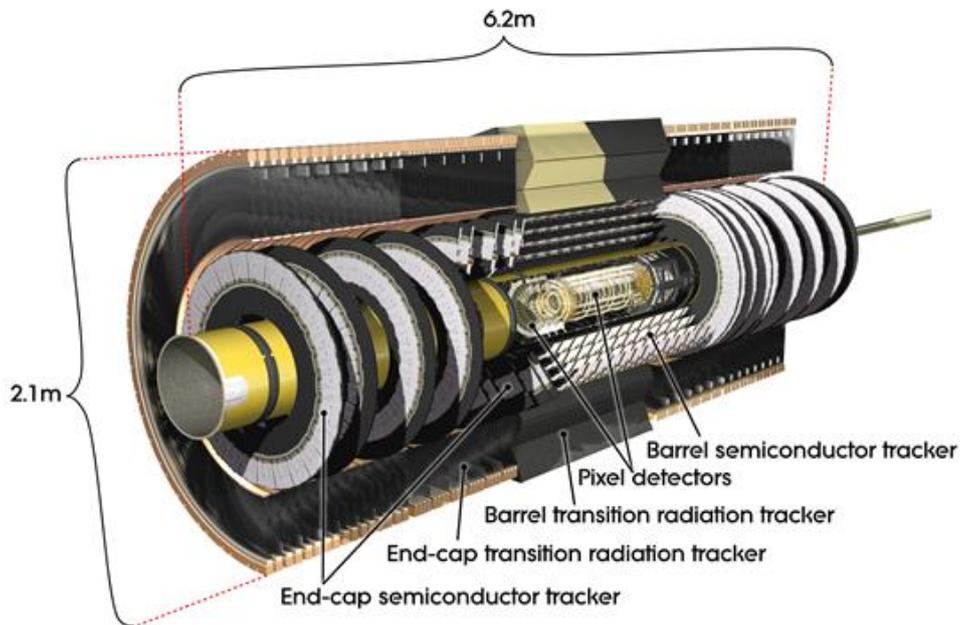


図 1.3: 内部飛跡検出器 [3]

1.1.3 HL-LHC 計画

2026 年以降、陽子・陽子衝突事象数の増加を目的として、LHC が高輝度化される（High Luminosity LHC、HL-LHC）。事象数の増加によって、より高統計量のデータを用いた解析が可能になり、ヒッグス粒子の性質のより精密な測定や、素粒子標準理論の枠組みを超えた新物理のより詳細な探索が可能になる。その一方で、放射線損傷が大きくなり現行の検出器を使うことができない。また、事象レートの増加にデータ収集システムも対応できない。そのため、ATLAS 検出器も 2029 年以降の運転に向けてアップグレードされる。

1.2 新型シリコンピクセル検出器

ATLAS 検出器のアップグレードでは、内部飛跡検出器を現行のものから新型のものに一新する。図 1.4 に新型の内部飛跡検出器の断面図を示す。内部飛跡検出器は、内層のシリコンピクセル検出器（以下「ピクセル検出器」と呼ぶ）と外層のシリコンストリップ検出器から構成される。この節では、本研究に関係があるピクセル検出器について述べる。

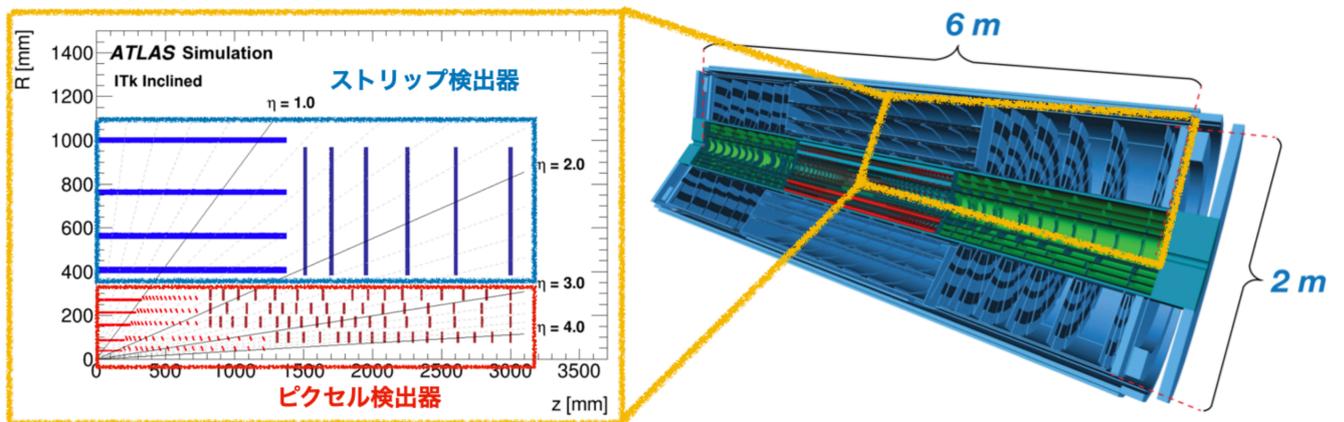


図 1.4: 新型内部飛跡検出器の断面図 [4]

1.2.1 半導体ピクセル検出器

まず、一般的な半導体ピクセル検出器について説明する。半導体ピクセル検出器は、半導体をセンサーとして用いた検出器である。この検出器の構造と検出の原理を図 1.5 に示す。センサー部分を荷電粒子が通過すると、空乏層内で電子・正孔対が生成される。電子・正孔がそれぞれ検出器にかけられた電圧によって移動することにより誘起される電荷を、読み出し用集積回路（ASIC）で信号として読み出す。センサーは、二次元の細かく格子状に区切られた領域ごとに、信号を読み出す電極を持つ。ひとつひとつの格子をピクセルと呼ぶ。1 ピクセルごとに、それぞれの信号を処理する信号処理回路が ASIC にある。この ASIC とセンサーのそれぞれのピクセルの間を小さなんだ球（バンプ）で電氣的に接合している。

現行の ATLAS ピクセル検出器のピクセルの大きさは $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ であり、新型の検出器では $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ となる。

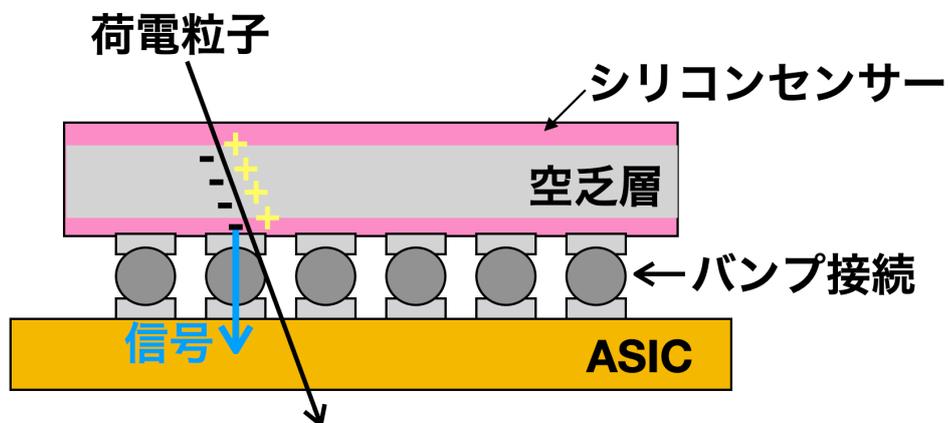


図 1.5: 一般的なピクセル検出器の概念図

1.2.2 検出器モジュール

ピクセル検出器を構成する検出器モジュールについて説明する。外部とのデータ送受信のためのフレキシブル回路基板 (Flexible PCB)、荷電粒子を検出する厚さ $150\ \mu\text{m}$ のシリコンセンサー、4枚のデータ読み出し ASIC (以下単に「ASIC」と呼ぶ) を、合わせて1組にして一つの検出器モジュールとする。検出器モジュールは図 1.6 のような構造になっている。1枚の ASIC は約 2cm 角の大きさを持ち、縦 384×横 400 ピクセルで信号を処理する。信号は、荷電粒子の信号を読み出し回路で処理され、デジタル信号として情報をデータ読み出しシステムに送られる。また、それぞれの ASIC は図 1.7 のようにチップ 1,2,3,4 と番号を付けられて呼ばれる。

この検出器モジュールを約 10000 個製造し、新型ピクセル検出器を構成する。10000 個製造するにあたって、プロトタイプ of 検出器モジュール^{*1}の試験を経て、現在は量産前に製造された実機モジュール^{*2}の特性を調べている。本研究ではこのうちのひとつについて、私がデータ読み出しのセットアップを作り、モジュールの特性を調べている。

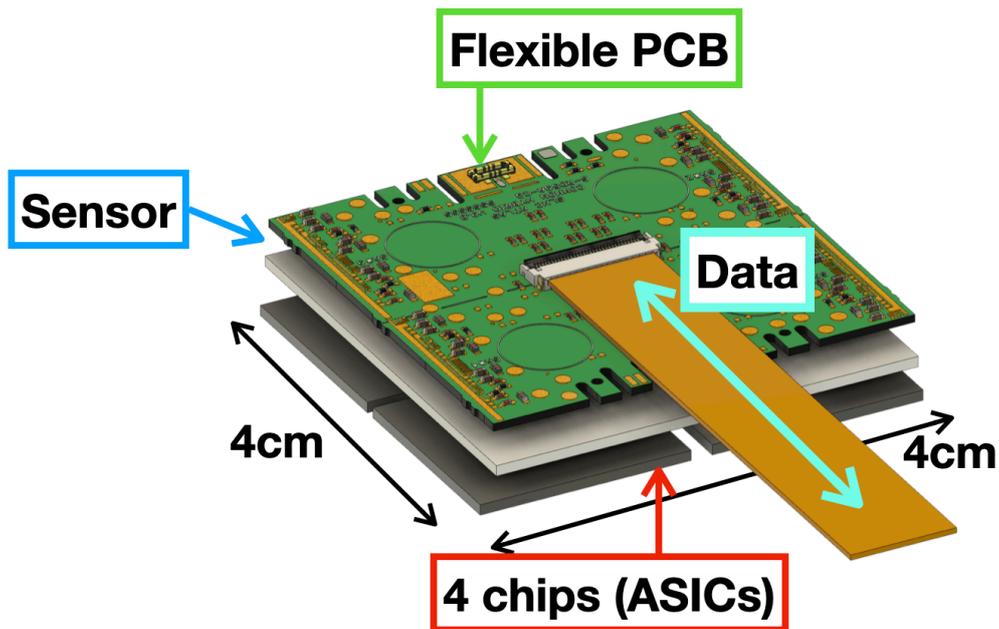


図 1.6: 検出器モジュールの模式図 [5]

*1 RD53A と呼ばれる ASIC を用いたモジュール。

*2 ITkPix v1.1 と呼ばれる ASIC を用いたモジュール。

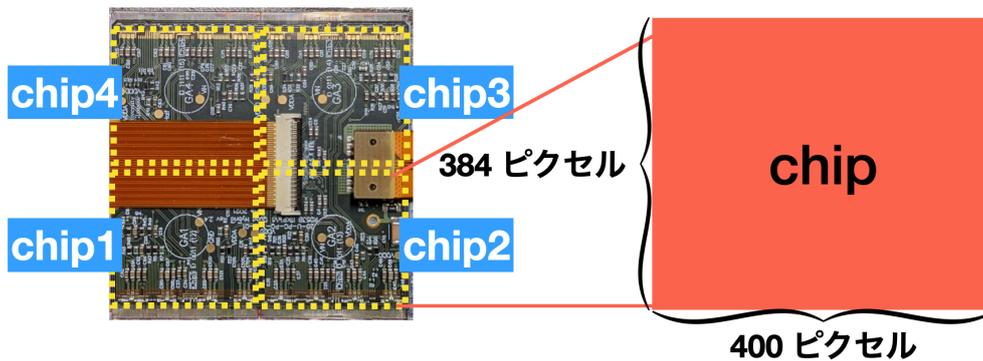


図 1.7: 検出器モジュールを図 1.6 の上側から見たときのチップ配置とピクセル配置。ピクセルは縦 384× 横 400 ピクセルになっている。

1.2.3 読み出し ASIC

ピクセル検出器の ASIC について説明する。

ASIC がセンサーから入力される電荷を処理するときの概念図を図 1.8 に示す。

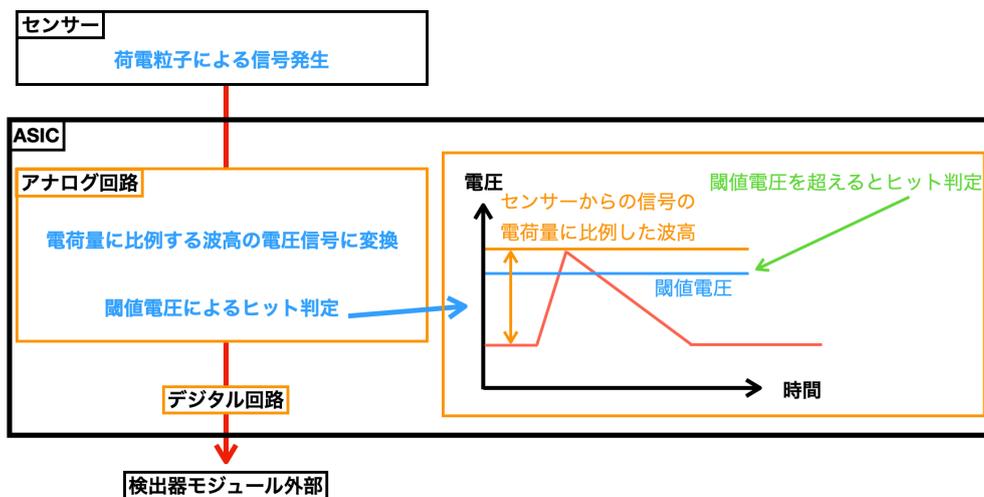


図 1.8: ASIC がセンサーから入力される電荷を処理するときの概念図

ASIC がセンサーから入力される電荷を処理する際、はじめに各ピクセルごとに存在するアナログ回路で入力電荷に比例する波高の電圧信号に変換・増幅し、その電圧の波高が設定した電圧（閾値電圧）を超える場合、そのピクセルにヒットがあると判定する。次に、アナログ回路で検出されたヒット信号は、複数のピクセル間で共有されたデジタル回路を通して、デジタル信号として情報をデータ読み出しシステムに送る。また、センサーの信号に対するアナログ回路の動作を確かめるために、テスト信号をピクセルのアナログ回路に入力する機能が、ASIC にある。

ヒットの判定に用いられる閾値の電圧は、ASIC の閾値のレジスタ値を変更することで変更でき

る。レジスタ値は閾値の電圧だけでなく、外部への情報送信の形式など、ASIC 内の様々な要素を設定できる。これらのレジスタ値は、外部からのデジタル信号で、設定したい値に書き換えることができる。

1.3 検出器モジュールの閾値

ピクセル検出器を運用するにあたって ASIC のピクセルごとの閾値を設定したい。しかし、閾値のレジスタ値を同じ値にしても、閾値電圧はピクセルごとにばらつく。このばらつきを小さくして、ASIC のピクセルの閾値を目標とする閾値になるように閾値のレジスタ値を調整する（閾値調整）。また、レジスタ値によって設定した閾値に相当する入力電荷量を測定して求める（閾値測定）。

この閾値調整と閾値測定については、新型ピクセル検出器のグループに共通の手法がある。閾値調整と閾値測定の手法はどちらも、テスト信号に対するピクセルの応答を利用する。閾値調整では、まず目標とする閾値に相当する電荷量のテスト信号を、ピクセルのアナログ回路に複数回入力する。そして、テスト信号の入力回数に対するヒットの回数の比（ヒット率と呼ぶ）が 50% になるレジスタ値を目指して閾値のレジスタ値を調整する。閾値測定では、まず複数種類の電荷量のテスト信号を、ピクセルのアナログ回路に複数回ずつ入力する。そして、図 1.9 のように横軸が電荷量で縦軸がヒット数の分布を作成する。この分布に、図 1.9 のフィット関数のような関数でフィットして、ヒット率が 50% の電荷量を閾値とする。

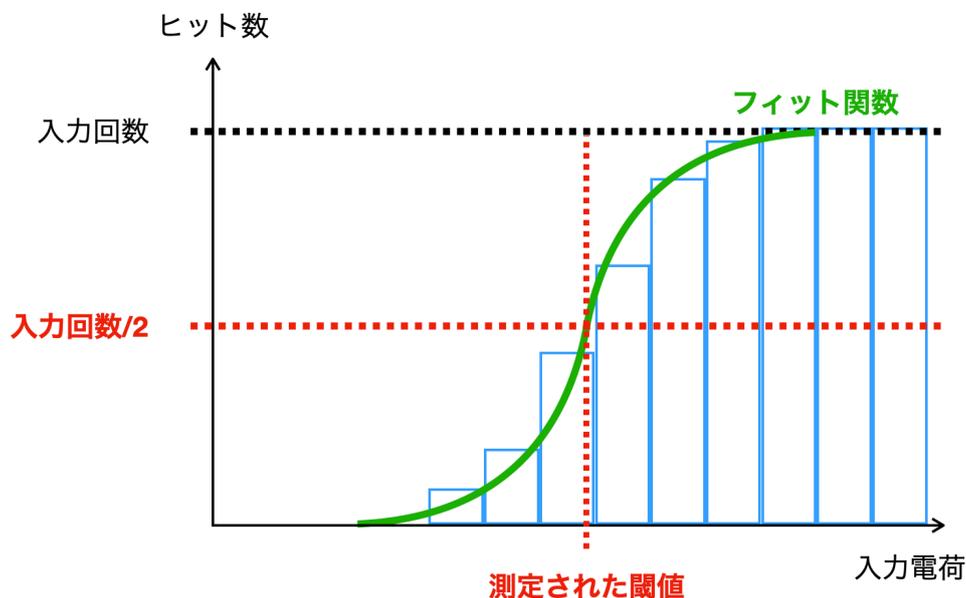


図 1.9: 複数種類の電荷量を複数回ずつ入力し、横軸を入力電荷量にして縦軸をヒット数を縦軸にしたグラフ。フィット関数においてヒット率が 50% になる電荷量が閾値となる。

また、この手法は検出器モジュールの特性を調べるときだけでなく、実際にピクセル検出器として運用する際も同じ手法を使用する予定のため、確実に正しく閾値調整・閾値測定できる必要が

ある。

閾値調整と閾値測定で用いられるテスト信号による入力電荷量は、専用のレジスタ値（テスト信号のレジスタ値と呼ぶ）によって設定できる。このテスト信号の入力電荷をアナログ回路で変換・増幅した後の電圧信号の波高の大きさは、入力した電荷量に対応し、電荷量の単位 [e] で表される。ここで典型的な Minimum Ionizing Particle (MIP) が検出器モジュールを通過した場合の、ASIC への入力電荷量について考える。厚み 150 μm のセンサーに、MIP が垂直に貫通すると、センサーに最頻値約 34 keV[6] のエネルギーを落とす。その際、シリコンの電子正孔対の生成エネルギー 3.66 eV を仮定して電荷量に変換すると、約 10 000 e の信号が発生する。この信号を検出するための閾値は、この信号の電荷量よりも十分小さい必要がある。例えば、ちょうど縦 2×横 2 ピクセルのピクセル領域のちょうど中心を荷電粒子が通過したとすると、1 ピクセルあたり $10\,000\text{e} \div 4 = 2500\text{e}$ 程度の電荷量が期待される。ATLAS グループは約 1000 e 程度の閾値に設定して運用する予定である。このように運用時のことを考えると電荷量での議論が必要であるため、以後の閾値の単位も [e] で示す。

1.3.1 閾値の調整と調整結果

閾値の調整では、目標とする閾値（目標閾値）に対し閾値を決めるレジスタ値を書き換え、ピクセルごとに閾値が目標閾値に近くなるように調整する。この手法については 2 章で説明する。新型ピクセル検出器グループが用いる手法で、閾値を調整した前後のチップ 3 のピクセル毎の閾値の分布（以後、単に閾値分布と呼ぶ）を図 1.10 に示す。なお、閾値を調整する前の閾値のレジスタ値は、全ピクセルで同じ値の初期値になっている。また、この閾値分布を作成したときの目標閾値は 996 e である。図 1.10 の左右を比べると、閾値調整前の分布（図 1.10 左）は各ピクセルの閾値が広くばらついて分布していることがわかる。このピクセルごとの閾値の違いは、各ピクセルの個体差によって閾値のレジスタ値の初期値に相当する電荷量が異なることから起こる。閾値調整後の分布（図 1.10 右）は目標閾値付近にピクセルごとの閾値が揃っている。つまり、調整によって閾値のばらつきを小さくすることができる。閾値分布をガウス分布でフィットして閾値分布のピーク値を得る。このガウス分布のピーク値を閾値分布のピーク値と呼ぶ。閾値分布のピーク値は、ほぼ 996 e である。

ここで、チップ 3 と同時に閾値の調整と測定を行った、チップ 1 の閾値調整後の閾値分布を図 1.11 に示す。

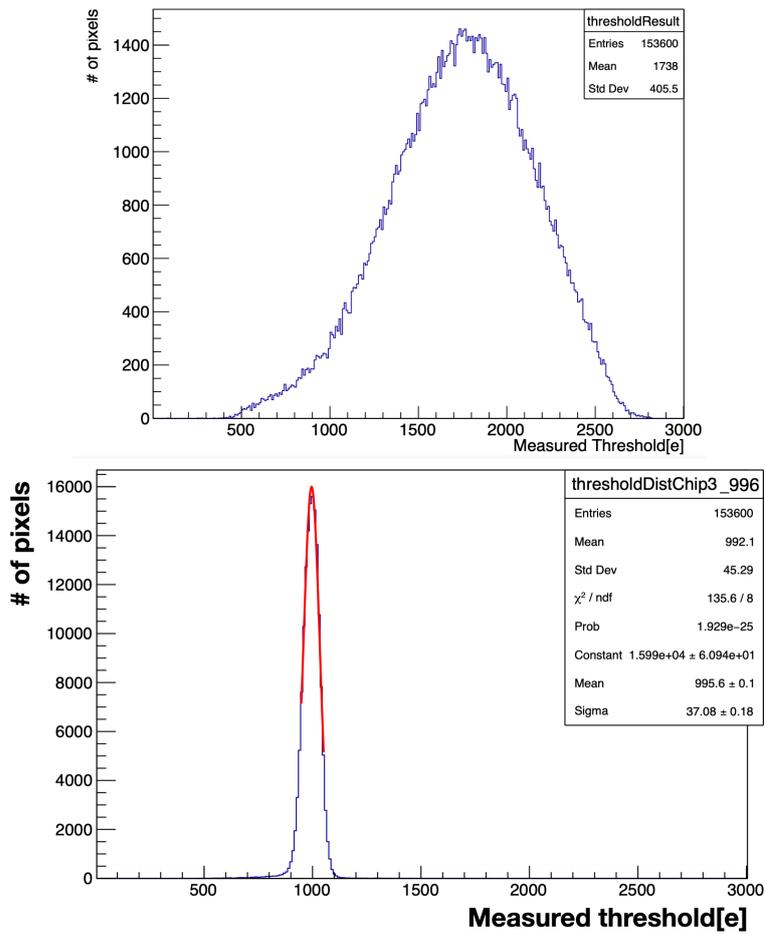


図 1.10: チップ 3 における目標閾値 996 e の時の閾値調整前後の比較。左が調整前。右が調整後である。右の図中の赤線は全体の閾値を求めるためのフィット関数 (ガウス分布)、右上にフィットした時の結果が示されている。下の Mean が全体の閾値である。

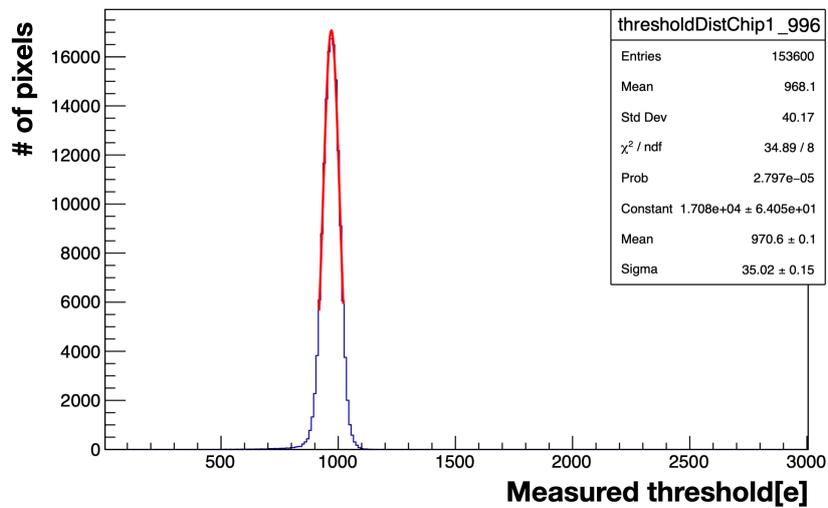


図 1.11: チップ 1 の閾値分布。右上にピークに対してフィットした時の結果が示されている。下の Mean が全体の閾値であり、996 e よりも 15 e 以上小さい。

閾値分布のピーク値は 996e 付近ではばらつきは小さいものの、996e よりも約 20e ずれている。チップ 1 の閾値調整後の閾値分布のピーク値が目標閾値よりも約 20e ずれている傾向は、996e 以外の複数の目標閾値に対し調整・測定しても同様であった (3.2 節にて詳述)。つまり、目標としていた閾値と、閾値調整された後測定される閾値の間の差は、チップごとに違う。

1.3.2 ASIC 内で同時にテスト信号を入力するピクセル数を変化させた時の閾値測定

ASIC でテスト信号をピクセルに入力する際、1 ピクセルごとにテスト信号を送るのではなく、複数のピクセルに同時にテスト信号を入力する。この ASIC 内で同時にテスト信号を入力するピクセル数 (同時入力ピクセル数と呼ぶ) は、変更することができる。そこで、1.3.1 節の閾値のレジスタ値を用いて、1.3.1 節では 480 ピクセルだった同時入力ピクセル数を 1200 ピクセルに増やして閾値を測定した時のチップ 1 の結果を図 1.12 に示す。閾値のレジスタ値が同じであるにも関わらず、測定された閾値分布のピーク値が 993.7e と測定され、約 20e 大きくなった。

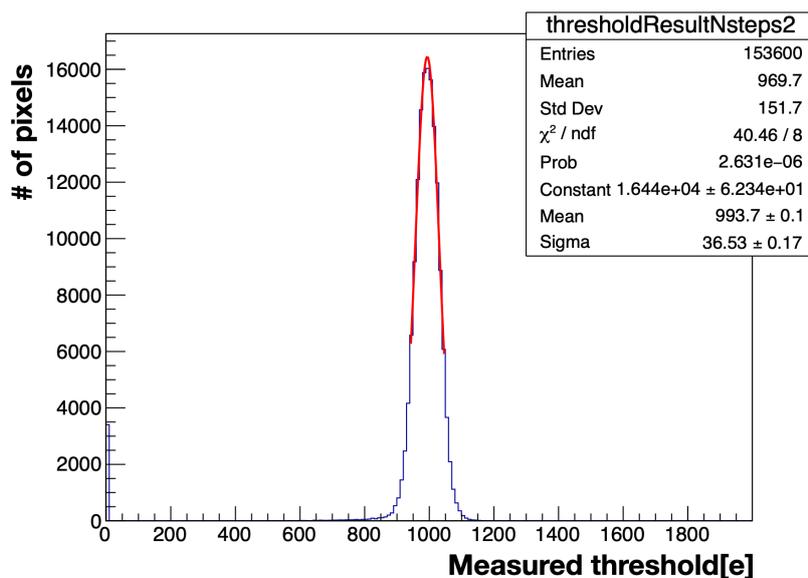


図 1.12: 1.3.1 節の閾値のレジスタ値と同じレジスタ値で、1.3.1 節では 480 ピクセルだった同時入力ピクセル数を 1200 ピクセルに増やして閾値を測定したときのチップ 1 の閾値分布。閾値分布のピーク値が 993.7e と測定され、約 20e 大きくなった。

また、チップ 3 で同様に 480 ピクセルだった同時入力ピクセル数を 1200 ピクセルに増やして閾値を測定した結果を図 1.13 に示す。こちらも閾値分布のピーク値が 1014e と測定され、約 20e 大きくなった。

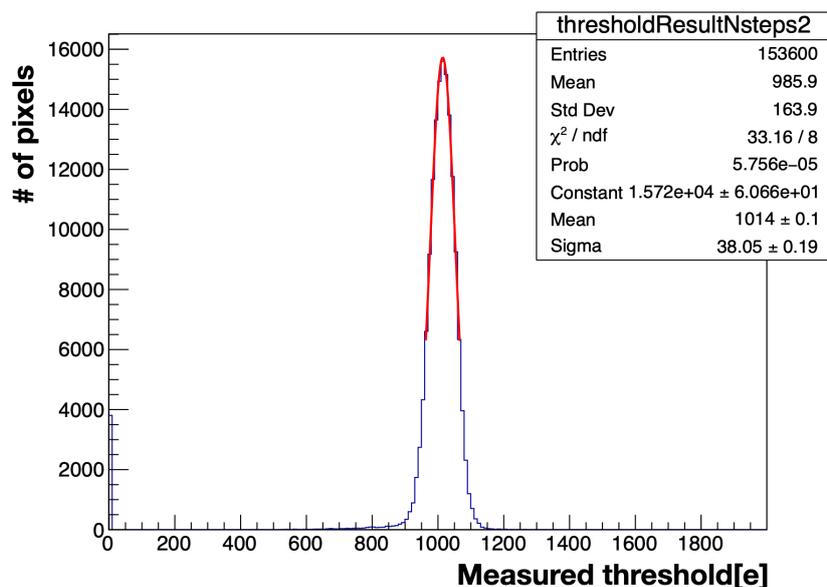


図 1.13: 1.3.1 節の閾値のレジスタ値と同じレジスタ値で、1.3.1 節では 480 ピクセルだった同時入力ピクセル数を 1200 ピクセルに増やして閾値を測定したときのチップ 3 の閾値分布。閾値分布のピーク値が 1014e と測定され、約 20e 大きくなった。元々の閾値分布では閾値分布のピーク値が 996e に近かったにも関わらず、10e 以上離れている。

この傾向は全てのチップで同様であり、同時入力ピクセル数が閾値分布のピーク値を変えることがわかった。

1.4 本研究の目的

本研究の目的は、閾値調整結果として得られた、目標閾値と閾値分布のピーク値の乖離と、同時入力ピクセル数の違いによる測定閾値の変化の原因をつきとめることである。

閾値分布のピーク値が目標閾値よりも小さい場合は、本来検出するつもりのない信号を検出することになり、運用時のデータが増加して、データを保存するストレージの圧迫につながる。また、もし閾値分布のピーク値が目標閾値よりも大きい場合は、検出しなかった信号を失ってしまうことになる。このような現象を抑制したい。この乖離の原因には、閾値の調整手法に問題がある場合と、閾値の測定手法で正しく閾値を測定できていない場合というふたつの可能性がある。

同時入力ピクセル数の違いにより測定閾値が変化するので、現在は適切な同時入力ピクセル数の条件で閾値が測定できていない可能性がある。運用時も同様の閾値測定手法を用いることから、最終的には適切な同時入力ピクセル数を見つける必要がある。

本論文では、それぞれの現象について原因の候補を提案し、それぞれについて検証する。

第 2 章

検出器モジュールの閾値の調整と測定

この章では、まず、2.1 節で本研究で使用した検出器モジュールの動作セットアップについて説明する。そして、2.2 節で閾値調整・測定で用いるテスト信号について説明する。また、2.3 節でピクセルの持つコンデンサの静電容量とテスト信号による入力電荷量について、2.4 節で同時入力ピクセル数の計算方法について説明する。次に、2.5 節で閾値の測定手法について説明する。最後に、2.6 節で閾値の調整手法について説明する。

2.1 検出器モジュールの動作セットアップ

本節では、実際に新型ピクセル検出器の検出器モジュールを動作させたセットアップについて説明する。これまで、大阪大学にはプロトタイプの検出器モジュールを動作させるセットアップが存在した。しかし、今回動作させた実機の検出器モジュールは、消費電力が増加しコンピュータとの通信に用いるケーブルや回路基板等が変更された。これらの変更に対応したセットアップは大阪大学には存在せず、新しいセットアップを構築する必要があった。そのため、この大阪大学における検出器モジュール用のセットアップは私が初めて構築した。セットアップの概念図を図 2.1 に示す。

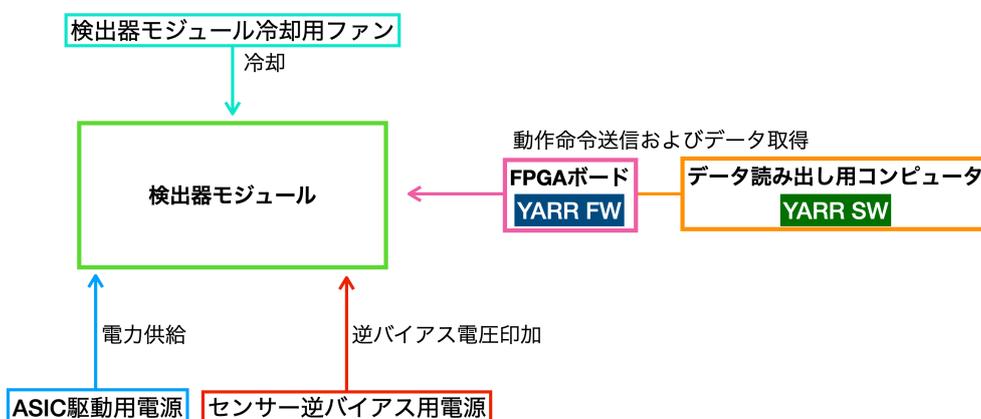
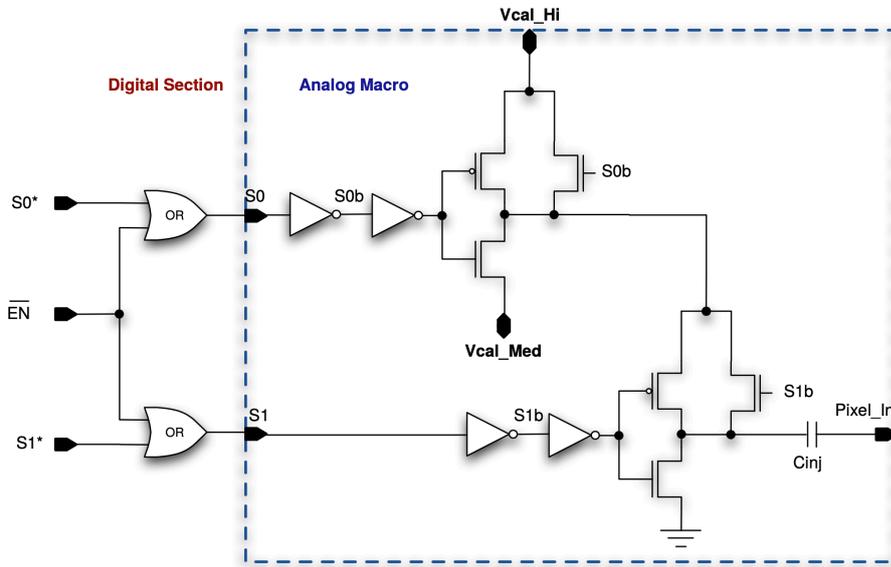


図 2.1: 本研究で用いたセットアップの概念図。

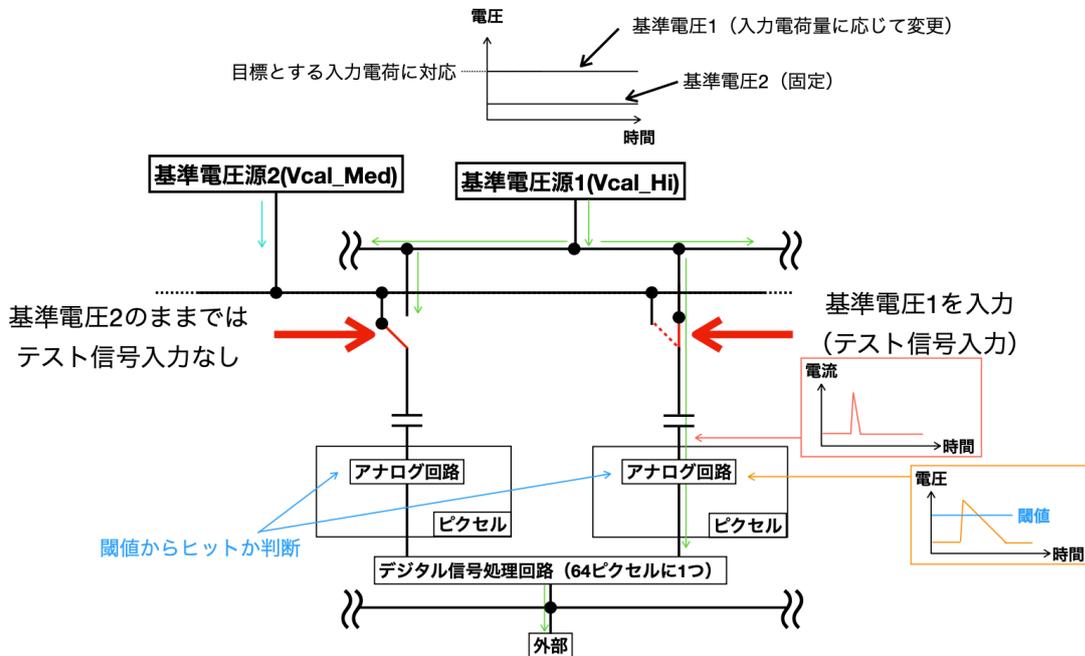
コンピュータから検出器モジュールへ動作命令を送信し、検出器モジュールからのデータを取得する際は、Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) の YARR [7] というプロジェクトで開発されているソフトウェアを用いる。コンピュータによる動作命令の送信とデータ取得は、内部回路をプログラムで書き換えることのできる FPGA という素子を介して行う。FPGA の内部回路を定めるプログラムをファームウェア (FW) と呼ぶ。このファームウェアも YARR で開発されているものを用いた。

検出器モジュールは ASIC の駆動電力用電源とセンサーに逆バイアス電圧を印加する電源に接続される。検出器モジュールの 4 つの ASIC の駆動では約 10 W 消費され、そのままにしておくと高温になり動作できなくなってしまう。ATLAS グループが定めた基準では、動作時に 40 °C を超えないことが求められている。排熱機構がない場合、ASIC の駆動後、数秒で 40 °C 以上に達する。そのため、検出器モジュールから十分排熱する機構が必要となる。本研究では、コンピュータの空冷 CPU クーラーで ASIC 側 (図 1.6 の下側) から排熱させた。検出器モジュールには PCB 上の温度を測定する Negative Temperature Coefficient サーミスタ (NTC サーミスタ) という、温度が上がるにつれて抵抗値が下がる素子を搭載しており、実際に抵抗値を確認して排熱が十分かを確かめた。その結果この排熱機構では、検出器モジュールの温度が 35 °C を超えないことがわかった。

2.2 テスト信号



(a) ASIC のマニュアル [8] に描かれている、テスト信号を入力する回路の概念図。



(b) テスト信号とそれによるヒット判定の概念図。

図 2.2: テスト信号を入力する回路の概念図。図 2.2a は ASIC のマニュアル [8] に描かれている、1つのピクセルのアナログ回路にテスト信号を入力する回路の概念図。図 2.2b は、複数のピクセルでのテスト信号とテスト信号によるヒット判定の概念図である。

閾値調整・測定で用いられるテスト信号について説明する。テスト信号は、ASIC の内部の回路の健全性を試験するために、電荷をアナログ回路に入力するものである。テスト信号は ASIC 内部で生成される。ASIC の説明書に描かれているテスト信号を入力する回路を図 2.2a に示す。テスト信号とそれによるヒット判定の概念図を図 2.2b に示す。ピクセルごとに電荷入力用のコンデンサ（図 2.2a の C_{inj} ）がある。電荷は、以下で説明するふたつの電圧の、コンデンサへの接続を切り替えることで生成され、パルス状の電荷としてピクセルのアナログ回路に入力される。ふたつの電圧（図 2.2a の V_{calHi} と V_{calMed} 、図 2.2b の基準電圧 1、2）は、ふたつの基準電圧源（図 2.2b の基準電圧源 1、2）から出力される。このとき、電荷入力用のコンデンサには、基準電圧同士の電圧差分の電荷量だけ充電される。この電荷量の大きさは、基準電圧同士の電圧差（ V ）と電荷入力用のコンデンサの静電容量（ C ）を用いた $Q = CV$ の式で計算できる。この電荷量が、テスト信号によってアナログ回路に入力される電荷量に相当する。テスト信号によるパルス状の電荷は、アナログ回路で変換・増幅された後、電圧信号として出力され、その信号の波高が閾値を超えていればヒットと判定される。

ピクセルへの入力電荷量は、基準電圧 1、2 の大きさを変えるレジスタ値を変更することで、設定できる。本研究では基準電圧 2 のレジスタ値は固定しており、基準電圧 1 のレジスタ値（1.3 節のテスト信号のレジスタ値に相当する）を変更することで目標の入力電荷量をピクセルのアナログ回路へ入力する。

2.3 電荷入力用のコンデンサの静電容量とテスト信号による入力電荷量

テスト信号で想定する入力電荷量は、「テスト信号のレジスタ値」から以下の $Q = CV$ で計算される（計算電荷量）。 C は、電荷入力用コンデンサの静電容量の典型的な値 7.5 fF^{*1} に固定する。 V はテスト信号のレジスタ値に対して $2.007 \times 10^{-4} [\text{V}/1 \text{ レジスタ値}]^{*2}$ の係数を使って換算する。今回仮定した電荷入力用コンデンサの静電容量は、「テスト信号のレジスタ値」が 1 変化するごとに、計算電荷量が約 $9.4e$ 変化することに相当する。 $Q = CV$ における V が離散的なため、テスト信号として再現できる入力電荷量は離散的である。

電荷入力用のコンデンサの静電容量はピクセルごとに個体差があるため、レジスタ値が同じでも実際にアナログ回路に入力される電荷量（絶対電荷量と呼ぶ）が計算電荷量相当であることを保証しない。この計算電荷量と絶対電荷量の違いによる閾値調整・測定への影響は、2.5.2 節と 2.6.5 節で議論する。

また、基準電圧 1、2 にも ASIC ごとに個体差があるはずだが、本研究では考慮しない。

*1 YARR のデフォルト値

*2 YARR のデフォルト値

2.4 テスト信号を同時に入力するピクセル数

本節では、ASIC あたりの同時入力ピクセル数の計算方法について述べる。

まず、ASIC の領域を縦 384× 横 8 ピクセルの縦長の帯 50 個に分割する。この帯のことをコアカラムと呼ぶ。

次に、この 50 個のコアカラムに対し、何回に分けて信号を入力するのか定める。この分割回数のことを nsteps と呼ぶ。たとえば nsteps が 2 であれば、25 個のコアカラムに信号を同時に入力することになる。

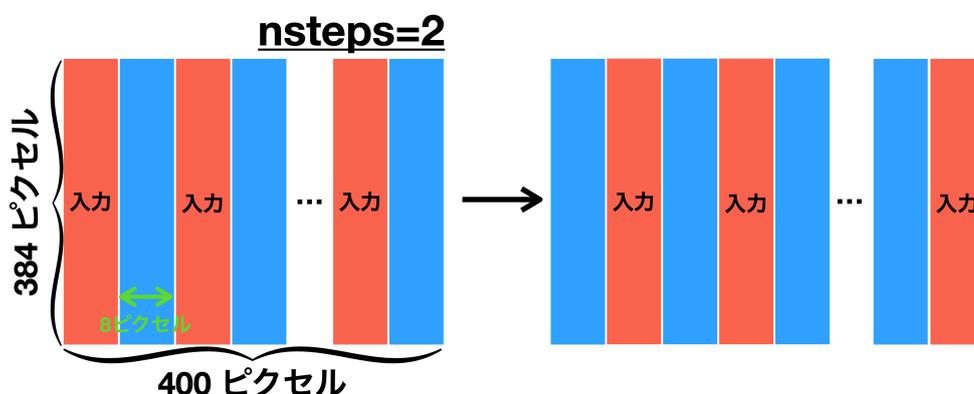


図 2.3: nsteps が 2 の時に同時に信号を入力するコアカラムを示した図。25 コアカラムごとのテスト信号の入力を 2 回実施して終了する。

図 2.3 に nsteps が 2 のときの概念図を示す。赤色の帯にはテスト信号を入力し、青の部分には入力しない。全てのピクセルにテスト信号を入力するには、nsteps が 2 であれば、ふたつにひとつのコアカラムに同時にテスト信号を入力し、次に残りのコアカラムに同時にテスト信号を入力する。

最後に、コアカラムあたりの同時入力ピクセル数を指定する。最小で 1 ピクセル、最大で 48 ピクセル（縦 8× 横 8 ピクセル領域^{*3}にひとつ）まで指定することができる。

ここまでで決められた数を用いて、ASIC あたりの同時入力ピクセル数は式 2.1 に従って計算できる。

$$\text{同時入力ピクセル数} = \frac{50}{\text{nsteps}} \times \text{コアカラムあたりの同時入力ピクセル数} \quad (2.1)$$

本研究では、特に断りを入れない場合、nsteps が 5 でコアカラムあたりの同時入力ピクセル数は 48^{*4}として、テスト信号を ASIC に入力する。つまり $50 \div 5 \times (48[\text{ピクセル/コアカラム}]) = 480$ ピクセルが ASIC あたりの同時入力ピクセル数である。

*3 この領域がデジタル回路を共有しているピクセルの領域である。

*4 YARR のデフォルト値

2.5 閾値の測定

2.5.1 閾値測定手法

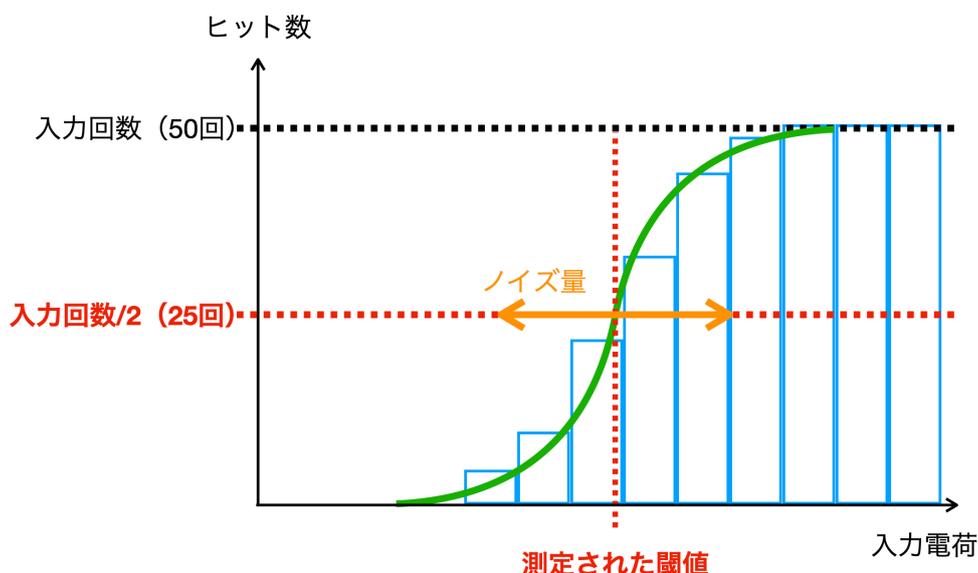


図 2.4: 閾値測定の概念図。横軸が入力電荷。縦軸が1つのピクセルに50回テスト信号を入力したときのヒット数。検出率がちょうど50%になる電荷が閾値である。

検出器モジュールでは、ピクセルごとに閾値に対応する電荷量を測定する。閾値の測定には2.2節で述べたテスト信号を用いる。閾値測定の手順及びそのアルゴリズムは、YARRに実装されている。

閾値測定手法の概念図を図2.4に示す。0eから約2819eまで約47eずつの61種類の入力電荷量のテスト信号を、それぞれ50回ずつ送る。そして、図2.4のような横軸入力電荷量、縦軸ヒットした数（ヒット数と呼ぶ）の分布（ヒット数分布と呼ぶ）をピクセルごとに作成する。このとき得られたヒット数分布に対し、相補誤差関数を用いた式2.2（以降フィット関数と呼ぶ）でフィットする。Hitはヒット数、 Q_{inj} が入力した電荷量、 Q_{th} が実際の閾値、 σ が入力電荷量のノイズ量を示している。

$$\text{Hit}(Q_{inj}) = [\text{offset}] + \frac{1}{2} \left(2 - \text{Erfc} \left(\frac{Q_{inj} - Q_{th}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right) \times [\text{injections}] \quad (2.2)$$

$$\text{Erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (2.3)$$

この式では、offsetが0でinjectionsがテスト信号の入力回数であれば、ヒット率が50%になる電荷量が閾値である。フィットの結果として、閾値とノイズ量が得られる。ノイズ量はフィット関数が立ち上がる時の傾きの大きさに反映される。ノイズ量が小さいヒット数分布は、立ち上がり始め

てから少ないレジスタ値の増加でヒット率が 100% まで立ち上がりきる。これは、ノイズがなければ本来ヒット率 100% になる電荷を入力しても、ノイズの影響で電荷が減少しヒット率が 100% にならず、逆に本来ヒット率 0% になる電荷でもノイズの影響で電荷が増加しヒット率が 0% より大きくなることから起こる。このノイズ量は、閾値自身のノイズや入力電荷のノイズ、センサーからのノイズなどの二乗和平方根になる。検出器モジュールでのノイズ量は約 120~140e である。また、offset はノイズが大きすぎて入力電荷量が小さくてもヒット数が 0 にならないときのオフセットである。injections は、オフセットが変化するとヒット数の最大値が変わってしまうので、実際のテスト信号の入力回数にヒット数の最大値を合わせるためのスケールである。オフセットの初期値は 0 で、スケールの初期値はテスト信号の入力回数、つまり 50 回である。

2.5.2 ピクセルごとの絶対電荷の違いが閾値測定に与える影響

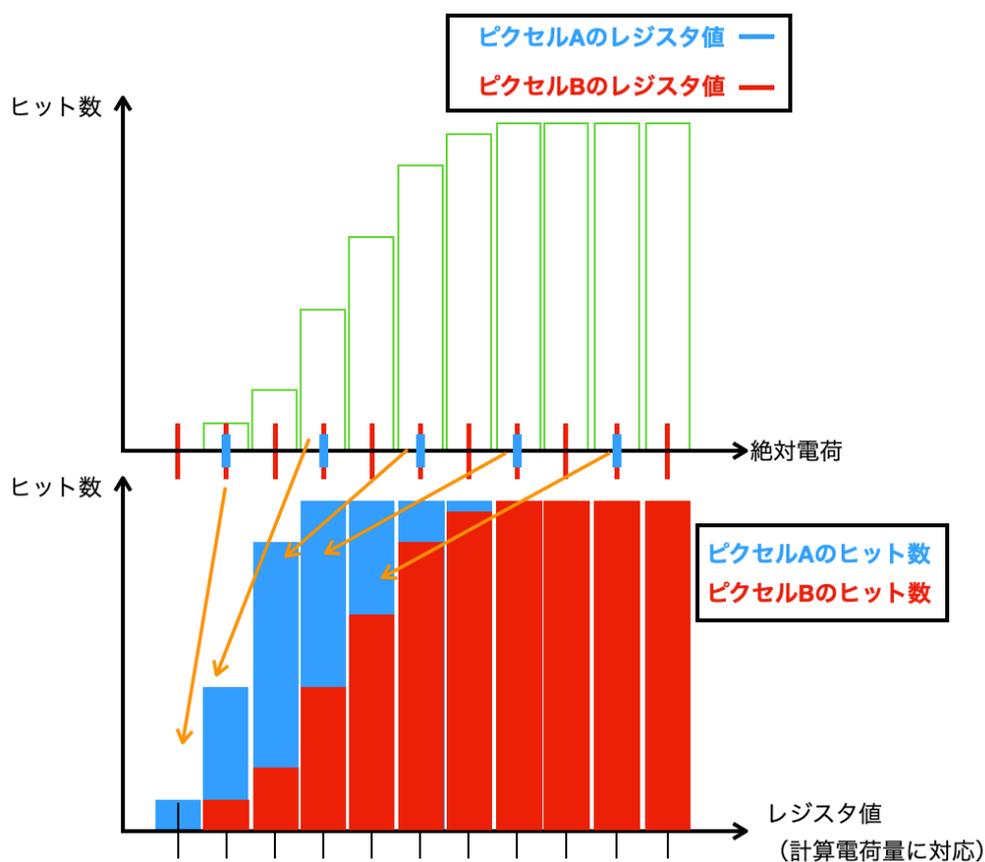


図 2.5: ピクセルごとに絶対電荷が異なる時の閾値測定がどうなるかを示した概念図。上の図は横軸を絶対電荷とした時のヒット数分布である。静電容量が 2 倍であるピクセル A は (上図中青線)、レジスタ値に対してピクセル B (上図中赤線) の 2 倍の幅で入力電荷が増える。下の図は横軸をレジスタ値としたヒット数分布である。ピクセル A はピクセル B に比べて 2 分の 1 のレジスタ値で閾値に達する。

2.2 節で述べたとおり、電荷入力用のコンデンサの静電容量のばらつきによってテスト信号による入力電荷量がピクセルによって異なる。そこで、この入力電荷量の違いが閾値測定に与える影響を考える。

この影響の概念図を図 2.5 に示す。仮に絶対電荷で見て全く同じ閾値に設定され、ノイズ量も全く同じピクセル A、B が存在するとする。またピクセル A、B に搭載されているコンデンサの静電容量を C_A 、 C_B として、 $C_A = 2C_B$ という関係があるとする。この条件では、同じ電荷をアナログ回路に入力する際に、ピクセル A はピクセル B の半分のテスト信号のレジスタ値（計算電荷量に対応）のテスト信号を必要とする。この時、図 2.5 の下図のようにピクセル A ではピクセル B のヒット数分布を左に圧縮したような分布となる。このとき、ピクセル B の閾値はピクセル A の 2 倍と測定される。つまり、コンデンサの静電容量に比例した閾値と測定される。またピクセル A はヒット数がテスト信号の入力回数と同じになるテスト信号のレジスタ値も半分になる。これはノイズ量が半分になることを意味する。

実際のコンデンサの静電容量は許容誤差 $\pm 10\%$ とされているので [8]、絶対電荷量で同じ閾値あっても計算電荷量では $\pm 10\%$ 違う閾値として測定されることが予測できる。ピクセルの静電容量が、閾値を調整した後の閾値の測定に与える影響については 2.6.5 節で議論する。

2.6 閾値の調整

2.6.1 閾値調整レジスタ

閾値は以下の二種類のレジスタ値の組み合わせによって決定される。どちらの種類でも、レジスタ値が大きくなるほど閾値は大きくなる。

1. 全ピクセルの閾値を一括して調整するレジスタ（以下、一括調整レジスタと呼ぶ）。
2. 閾値をピクセルごとに調整するレジスタ（以下、個別調整レジスタと呼ぶ）。

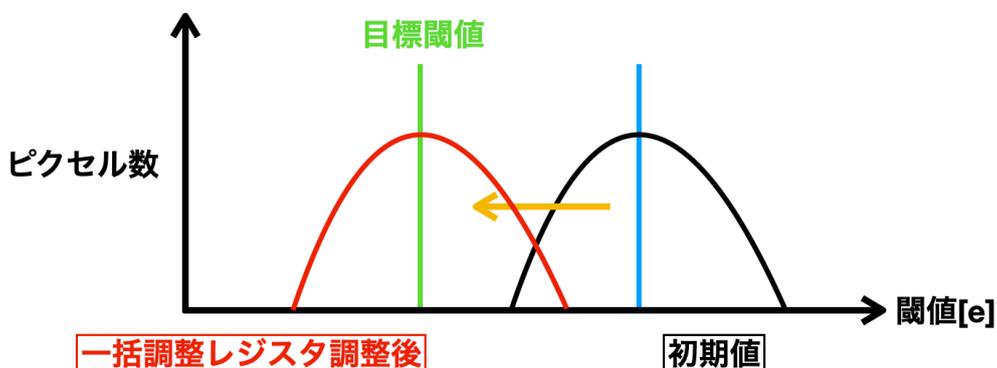


図 2.6: 一括調整レジスタを変更したときの閾値分布変化の概念図。一括調整レジスタを変更することで全ピクセルが目標閾値に近づく。

一括調整レジスタの目的は全体の閾値を調整し、後述する個別調整レジスタと組み合わせて、できるだけ多くのピクセルを目標閾値に近い閾値にすることである。図 2.6 に一括調整レジスタを変更したときの概念図を示す。一括調整レジスタを変更することによって、初期値から目標閾値近くに全体的に閾値が動く。一括調整レジスタのレジスタの大きさは 10 bit である。

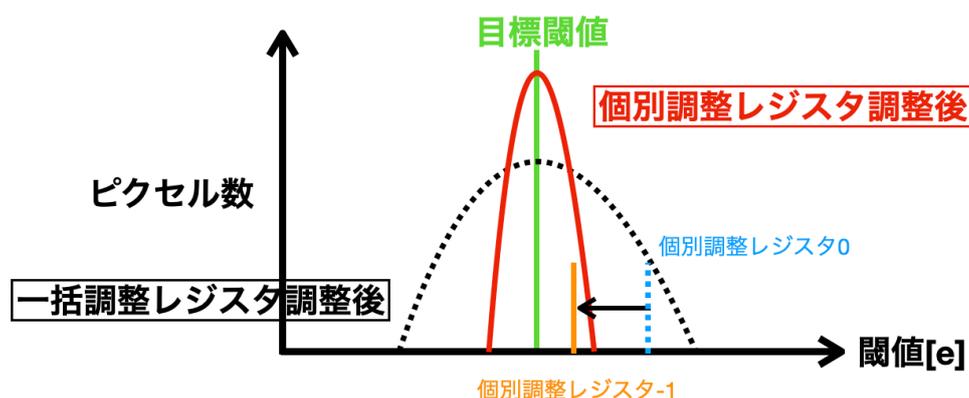


図 2.7: 個別調整レジスタを変更したときの閾値分布変化の概念図。個別調整レジスタを変更することでピクセル個別で目標閾値に近づき、閾値分布のばらつきが小さくなる。

個別調整レジスタの目的は、一括調整レジスタだけではばらつきが大きい閾値分布を目標閾値付近に揃えることである。図 2.7 に個別調整レジスタを変更したときの概念図を示す。個別調整レジスタを変更することによって、ピクセルの閾値がそれぞれ目標閾値に近づき、ばらつきが小さくなる。個別調整レジスタ値はピクセルごとに存在し、一つの ASIC は $384 \times 400 = 153600$ 個の個別調整レジスタを持つ。個別調整レジスタのレジスタの大きさは 5bit であり、レジスタ値の範囲は -15 から +15 である。

どちらのレジスタ値においても、レジスタ値の変化に対する閾値の変化幅はピクセルごとに異なる。これは、ピクセルごとの内部回路の個体差によるものである。

2.6.2 閾値調整手法

閾値の調整では、閾値が目標閾値になったか確認しながら、一括調整あるいは個別調整レジスタのレジスタ値を変更するという手順をとる。閾値が一括調整レジスタと個別調整レジスタで決定されることから、それぞれのレジスタ値を変更する。それぞれのレジスタ値調整の手順及びそのアルゴリズムも、測定のものと同様 YARR に実装されている。

2.6.2.1 一括調整レジスタの調整手法

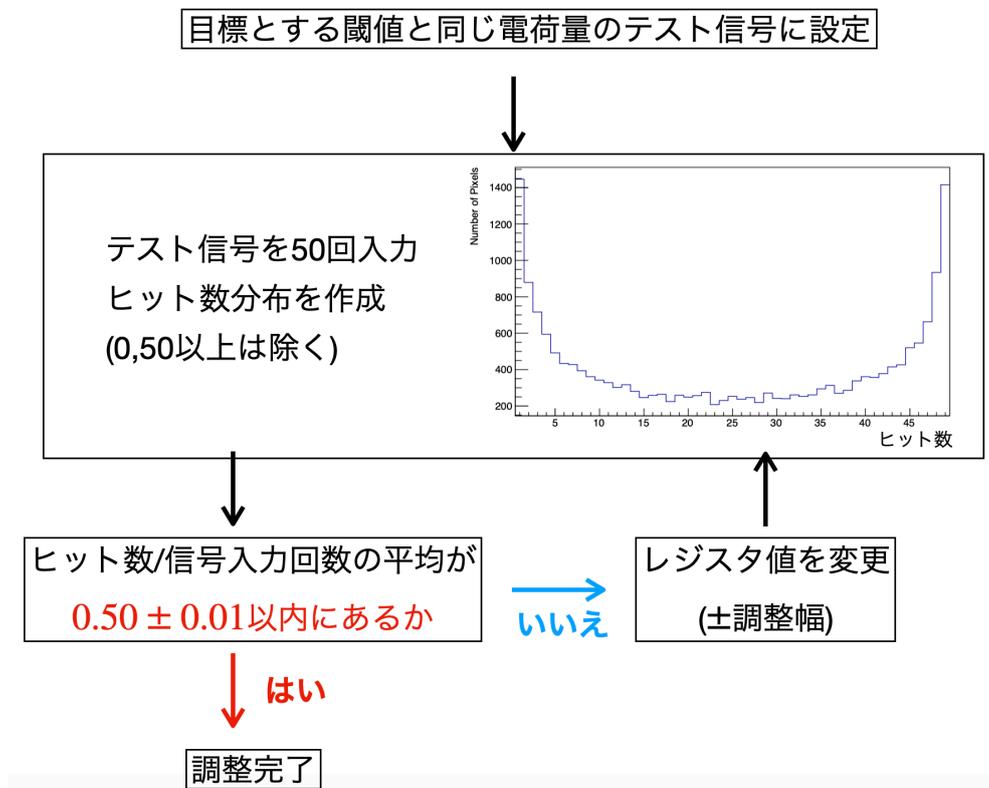


図 2.8: 一括調整レジスタ調整手法の概念図

一括調整レジスタの調整手法について説明する。一括調整レジスタの調整手法の概念図を図 2.8 に示す。調整前にレジスタ値を変更する範囲（調整範囲）と、レジスタ値を変更する時の変化幅の初期値（調整幅）を設定する。本研究では調整範囲を 0 ～ 350、調整幅を 16 とした。調整範囲は閾値にすると約 0 ～ 3000e、調整幅は約 140e に相当する。一括調整レジスタの初期値は調整範囲の最大値である。

次に、目標閾値に一致する入力電荷相当のテスト信号を 50 回入力する。この信号入力、全ピクセルの 16 分の 1 の 9600 ピクセルに対して実施する。このときの結果に対して、式 2.4 の N_{Average} ように、信号を入力したピクセル i のヒット数 (Hit_i) を、入力回数 50 回で割った値（ヒット率 N_i ）を計算し、9600 ピクセルで平均した値を求める。ただし、ヒット数が 0 あるいは 50 以上のピクセル（ピクセル数を N_{drop} とする）は除外する。この値を平均ヒット率と呼ぶ。

$$N_{\text{Average}} = \frac{1}{9600 - N_{\text{drop}}} \sum^{9600 - N_{\text{drop}}} N_i \quad (2.4)$$

$$N_i = \frac{Hit_i}{50} \quad (Hit_i = 0 \text{ と } Hit_i > 50 \text{ は除く}) \quad (2.5)$$

この平均ヒット率が 0.49 以下であれば閾値が下がるように一括調整レジスタのレジスタ値を変更

する。平均ヒット率が 0.51 以上であれば閾値が上がるように一括調整レジスタのレジスタ値を変更する。また、 $N_{Average}$ の計算で用いるピクセル数が、信号を入力したピクセルの 1% 以下であった場合、閾値が下がるように一括調整レジスタのレジスタ値を変更する。この流れを 1 試行として、試行を繰り返すことで一括調整レジスタのレジスタ値を調整する。

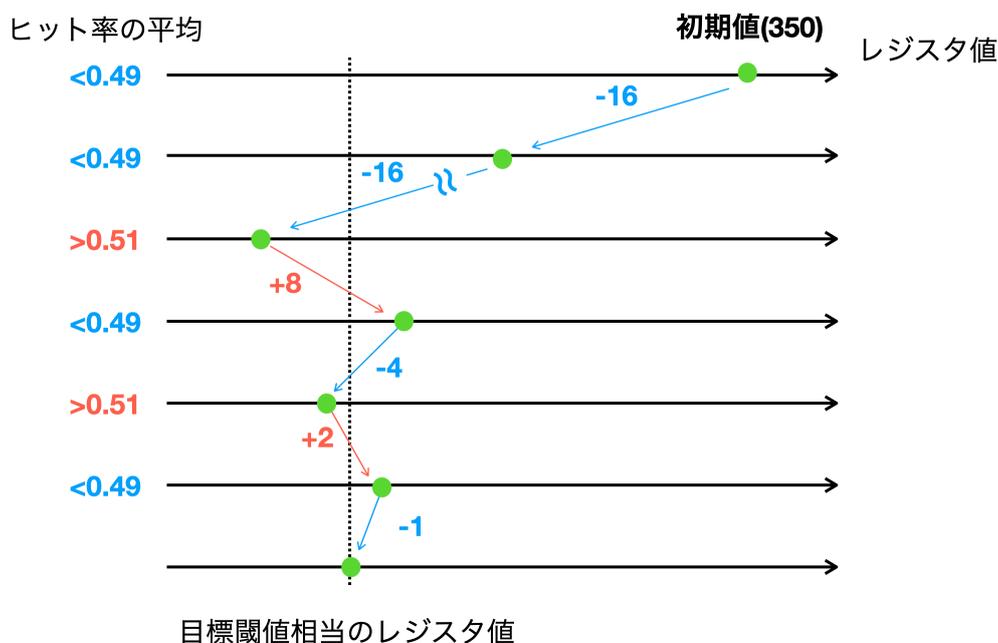


図 2.9: 一括調整レジスタ調整過程での一括調整レジスタのレジスタ値の変化の様子。レジスタ値の変化幅の初期値は 16 である。平均ヒット率は入力回数に対する信号を入力した全ピクセルの平均ヒット数の比である。ヒット率が 0.51 以上か 0.49 以下かで一括調整レジスタのレジスタ値の増減を決定する。前回の試行時の増減と逆の増減になる場合、一括調整レジスタのレジスタ値の変化幅を半分にする。また、変化幅は 1 になったとき、平均ヒット率に関わらず調整は終了する。

調整過程での一括調整レジスタの値の変化を図 2.9 に示す。調整過程では、前回の試行で一括調整レジスタの値を増やしたか減らしたかを記録している。今回の試行で一括調整レジスタの値の増減が前回の試行と逆転した場合、レジスタ値の変化幅を半分にする。これを繰り返すことでレジスタ値を調整する。繰り返した結果、平均ヒット率が 0.49 以上 0.51 以下になるか、レジスタ値の変化幅が 1 になった時に一括調整レジスタの調整は終了する。

ここで、平均ヒット率が 0.49 以上 0.51 以下という条件がどの程度の閾値の範囲に全体の閾値が調整されることを要求しているのかについて考える。まず、ノイズが全くなく、個体差によって閾値がガウス分布に従う閾値分布を考える。このときの概念図を図 2.10 に示す。

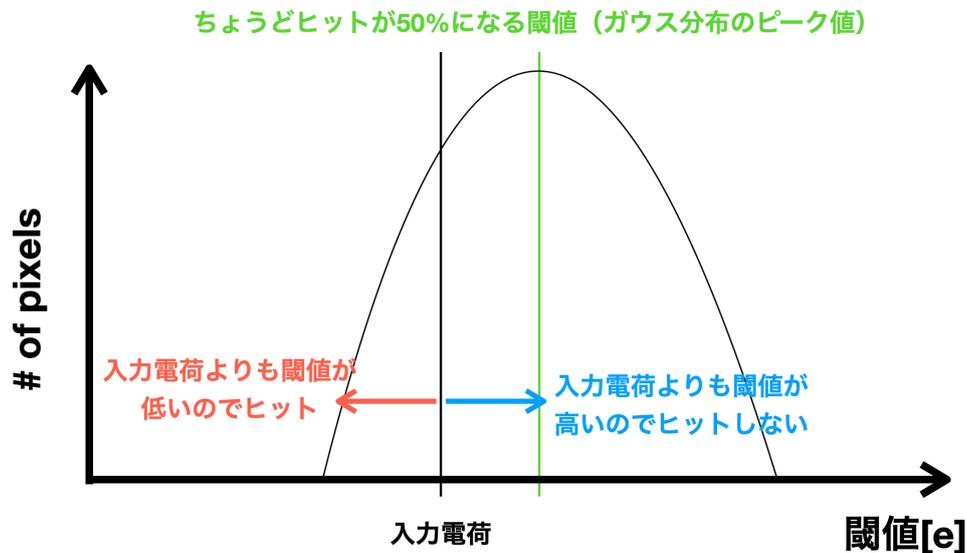


図 2.10: 一括調整レジスタの調整においてノイズがなくピクセルごとの個体差のみが存在するときの、閾値調整の概念図。

この時、入力電荷量が閾値を超えていれば必ずヒットを返すので、ヒット数 50% となるのは、閾値を入力電荷量が超えるピクセル数がちょうど半分になる位置、つまりガウス分布のピークの位置である。そこから 1% のピクセル数の増減に一致する電荷量を計算すればヒット率 49% とヒット率 51% の閾値を計算できる。ガウス分布で全体の 1% に一致するのはピークから標準偏差の 0.025 倍だけ増減した位置である。そのため、閾値分布の標準偏差に対して 0.025 倍した値を目標閾値に足すとヒット率 51% の閾値、目標閾値から引くとヒット率 49% の閾値となる。この閾値の範囲に閾値分布のピーク値が入ることが要求されている。

次に、個体差が全くなく全てのピクセルの閾値が同じ値に揃っているが、ノイズによって測定される閾値がばらつく場合の閾値分布を考える。この時の閾値分布は標準偏差がノイズ量のガウス分布となり、個体差のみの時と全く同じ議論でヒット率 51% の閾値とヒット率 49% の閾値を計算できる。

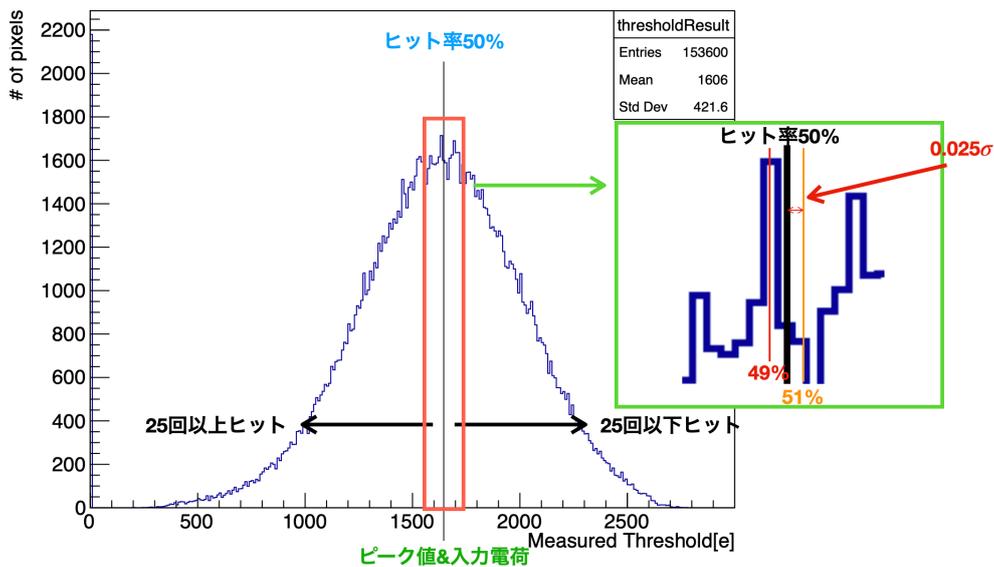


図 2.11: 測定された閾値分布における、計算されたヒット率の許容範囲。

実際の閾値分布では、ノイズ量と個体差の両方が存在している。チップ 1 の閾値調整していない初期状態の閾値分布の標準偏差は、図 2.11 のように約 420 e となっている。よって、少なくとも個別調整レジスタを調整していない状態においては、目標閾値 $\pm 0.025 \times 420 \text{ e} \sim \pm 10 \text{ e}$ の範囲に閾値分布のピーク値が入ることになる。また、一括調整レジスタの 1bit は閾値 9e 程度に相当する。つまり、一括調整レジスタを最適値まで調整できれば、目標閾値に対して $\pm 4.5 \text{ e}$ の範囲に閾値分布のピーク値が入る。したがって、もし閾値分布がガウス分布であり、なおかつ最適な値を取ることができれば、目標閾値に対して $\pm 10 \text{ e}$ の範囲に閾値分布のピーク値が位置するように一括調整することができるはずである。

2.6.2.2 個別調整レジスタの調整手法

個別調整レジスタの調整手法について説明する。

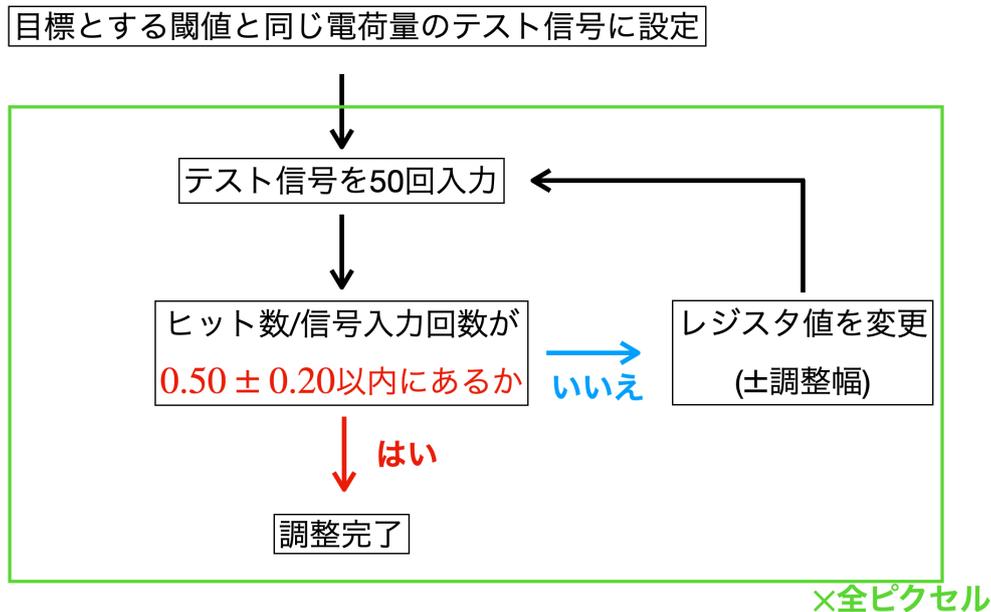


図 2.12: 個別調整レジスタ調整手法の挙動

個別調整レジスタ調整手法の挙動を図 2.12 に示す。入力電荷を目標閾値相当に設定し、50 回テスト信号を入力する点は 2.6.2.1 節と同じである。個別調整レジスタの調整では、ピクセルのヒット率が 0.3 以下であれば閾値が下がるように個別調整レジスタのレジスタ値を変更し、ヒット率が 0.7 以上であれば閾値が上がるように個別調整レジスタのレジスタ値を変更する。ヒット率が 0.3 ~ 0.7 であればそのピクセルの個別調整レジスタのレジスタ値は変更されない。これを 1 試行として試行数が 7 になると個別調整レジスタの調整は終了となる。7 回で終了するのはピクセルの個体差によって、個別調整レジスタの調整範囲ではうまく調整できず、ヒット率が 0.3 ~ 0.7 の間にならないピクセルが存在する可能性があるからである。

調整前に個別調整レジスタのレジスタ値を変更する時の変化幅を設定する。本試験での初期状態からの閾値調整では、初期値を 0 として、調整幅を 1 回目では ± 8 、2 回目では ± 4 、3 回目では ± 2 、4 回目以降では ± 1 としている。4 回目までで $-15 \sim +15$ の全てのレジスタ値に設定することができ、5 回目以降では本当はうまく調整できているはずだが、たまたまヒット率が 0.3 ~ 0.7 の間にならなかったピクセルを考慮して ± 1 ずつで再調整する。

また、本研究では初期状態からではなく一度個別調整レジスタを調整した後の設定値を引き継いでさらに調整することがある。その場合の調整回数は 6 回で全ての試行で変化幅は ± 1 としている。

ヒット率が 0.3 ~ 0.7 になるとき、閾値がどの程度の範囲にあるかは、ヒット率とテスト信号の入力回数の積を式 2.2 の $\text{Hit}(Q_{inj})$ に代入して対応する Q_{inj} を求めることで計算できる。計算すると、閾値の範囲はノイズ量 σ を用いて、目標閾値 $\pm 0.52\sigma$ と書ける。ノイズ量が 120 ~ 140e なので、 $\sigma = 130e$ だとすると、目標閾値に対して 68e 以内に閾値がおさまることを要求していることになる。また、個別調整レジスタによる閾値の変化は、ピクセルの個体差や、一括調整レジスタ

の値によっても変わる [9]。検証した範囲では、個別調整レジスタが 0 の時に、一括調整レジスタによって閾値が 2000e に設定されているピクセルは、個別調整レジスタのレジスタ値 1 bit につき約 80e 程度変化する。つまり、個別調整レジスタを最適値まで調整できれば、目標閾値に対して $\pm 40e$ の範囲に閾値を変更できる。よって、個別調整レジスタの調整では、目標閾値に対して 68e 以内に閾値がおさまるように、閾値を調整できるはずである。

2.6.3 閾値調整の方法

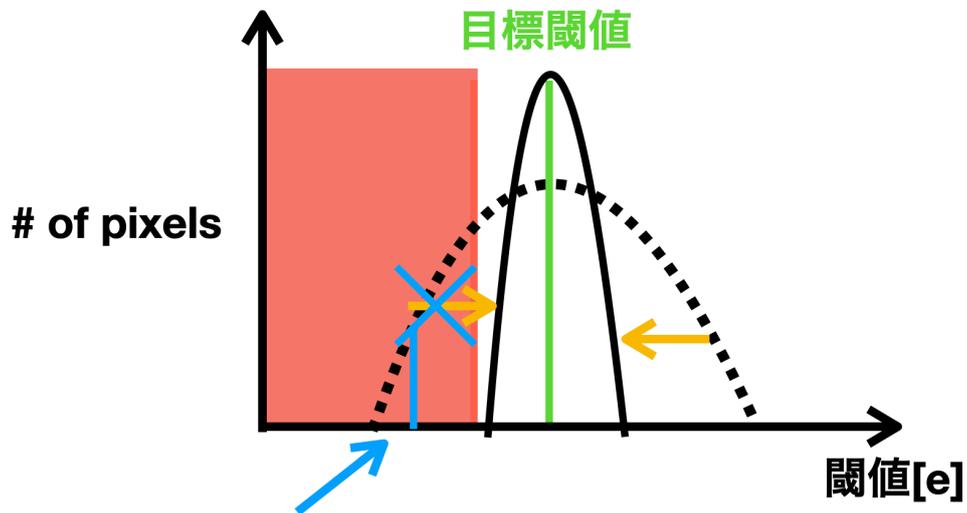
本研究での閾値調整の方法について説明する。閾値調整は先行研究の手法 [9] に従って実施した。閾値調整は 2.6.2.1 節と 2.6.2.2 節で説明した手法を組み合わせで行う。

閾値調整の方法は以下のとおりである。なお、この閾値調整とその後の閾値測定では、特に断りをいれない場合、2.4 節で述べた $nsteps = 5$ であり、同時入力ピクセル数は 480 個である。

1. ASIC のレジスタ値を閾値に関するものも含めて全て初期値にする。
2. ノイズによる影響の少ない十分大きい閾値を仮の目標閾値にする。
3. 一括調整レジスタを変更し仮の目標閾値近くに全体の閾値を動かす。
4. 個別調整レジスタを変更しピクセルごとに閾値を仮の目標閾値近くに動かす。
5. 4. の個別調整レジスタの設定値を引き継いで、一括調整レジスタを変更し真の目標閾値近くに全体の閾値を動かす。
6. 4. の個別調整レジスタの設定値を引き継いで、さらに個別調整レジスタを変更しピクセルごとに閾値を真の目標閾値近くに動かす。

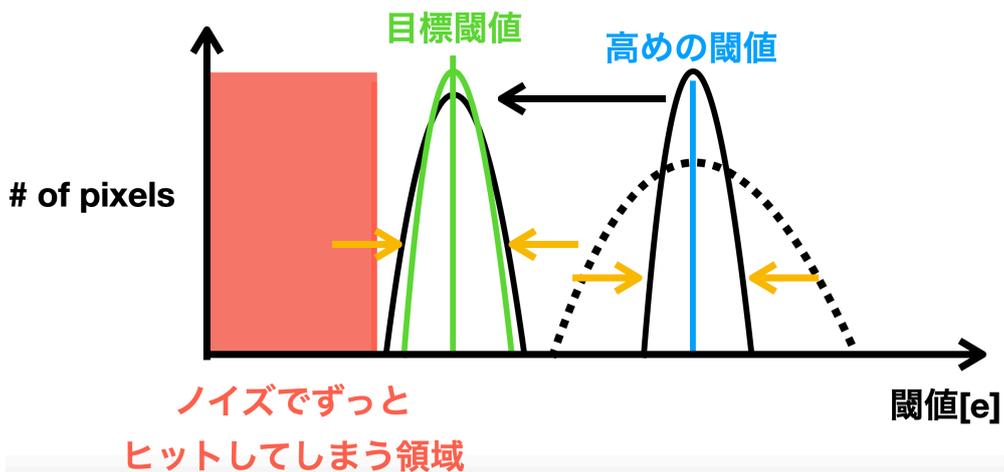
まず、ノイズによる影響の少ない十分大きい閾値を目標閾値にし、一括調整レジスタ・個別調整レジスタの順で閾値を調整する。これは、閾値を調整していない初期状態では閾値が広く分布しているからである。

ノイズでずっと
ヒットしてしまう領域



ノイズのせいでヒットを得られず
閾値調整できない。

図 2.13: 初期状態から直接低めの閾値に調整した時の概念図。ノイズでヒットし続けることになる領域ではヒットが得られずうまく閾値調整できない。



ノイズでずっと
ヒットしてしまう領域

図 2.14: 一度大きめの閾値に調整してから直接低めの閾値に調整した時の概念図。ノイズでヒットし続けることになる領域を避けて閾値調整できるため、正しくヒット判定できるピクセルが増える。

初期状態から直接目標閾値に調整したときの概念図を図 2.13 に示す。目標閾値が小さい場合、初期状態から一括調整レジスタで調整すると閾値がノイズ量よりも小さいピクセルが存在すること

になる。このピクセルのアナログ回路はノイズを常に検出し続け、デジタル回路に常にヒット判定を送り続ける。デジタル回路ではアナログ回路からのヒット判定がなしからありへの変化を見てヒットを検出するため、その変化がなければヒットを検出できない。つまり、閾値が低いにも関わらず、閾値が非常に大きいと判定されることになる。そのため一括調整レジスタを変更して、一度全てのピクセルをノイズによる影響の少ない、十分大きな閾値に設定する。その後個別調整レジスタも変更し、ピクセルごとの閾値のばらつきを抑える。本研究では、1503e に統一して初めの閾値調整を実施した。十分大きな閾値に調整してから目標閾値に調整したときの概念図を図 2.14 に示す。十分大きな閾値に対して一括調整レジスタ、個別調整レジスタを調整した後、一括調整レジスタを真の目標閾値に向けて調整する。このとき、初期値から直接目標閾値に向けて一括調整レジスタを変更したときに、閾値が非常に低いものにも関わらず誤って閾値が非常に高いと判定されたピクセルは、個別調整レジスタで閾値が引き上げられ、正しくヒット判定できることになる。その後、ピクセルの個体差により一括調整レジスタの変化に対して十分閾値が変更されなかったピクセルのために個別調整レジスタを真の目標閾値に対して調整し、閾値調整の方法は終了となる。ピクセルの個体差により一括調整レジスタの変化に対して十分閾値が変更されなかったピクセルについては 2.6.4 節で述べる。

2.6.4 二度目の一括調整レジスタ調整について

2.6.3 節で述べた閾値調整に関する注意点について述べる。2.6.1 節で述べたとおり一括調整レジスタによる閾値の変化には個体差がある。一度目の一括調整レジスタ調整ではそもそも閾値分布のばらつきが大きくこの個体差は問題にはならない。しかし一度一括調整レジスタと個別調整レジスタを仮の目標閾値に対して調整し、ばらつきがおさえられた閾値分布になっている状態からの調整では、以下で述べるように一括調整レジスタによる閾値の変化の個体差の効果は大きく見える。実際に 1503e に閾値調整した後に 996e に一括調整レジスタを変更したときのチップ 3 の閾値分布を図 2.15 に示す。

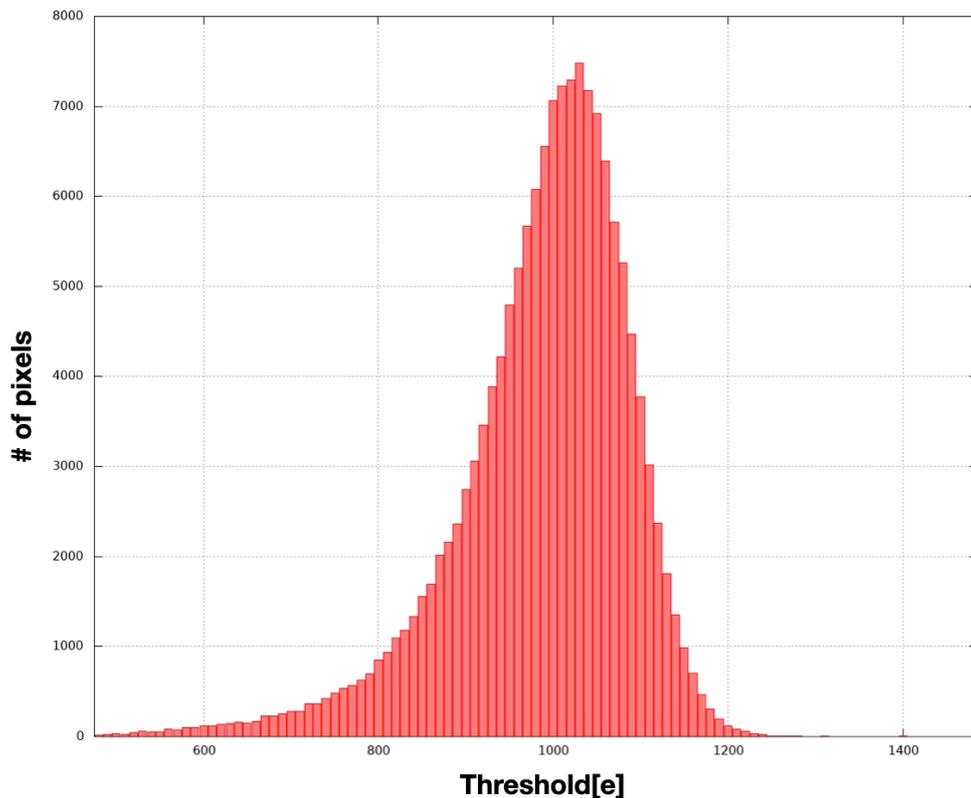


図 2.15: 1503e に閾値調整した後に 996e に一括調整レジスタを変更したときのチップ 3 の閾値分布。全体の閾値は 1000e よりも大きく、低い閾値に向けて尾を引いている。

閾値分布のピーク値が 1000e よりも大きく、低い閾値に向けて尾を引いている。一括調整レジスタの変化に対して閾値の変化幅が大きいピクセルがこの尾を作っている。よって、二度目の一括調整レジスタの調整後の閾値分布のピーク値は 2.6.2.1 節で述べた範囲にはならない。この尾を含めて目標閾値に全ピクセルの閾値がそれぞれ近づくように、個別調整レジスタを変更していくことになる。なお、ここではチップ 3 の閾値分布しか示していないが、どのチップでも、複数回同じ操作をして閾値を測定しても同様の形状の閾値分布になる。

2.6.5 静電容量のばらつきによる絶対電荷の違いの閾値調整への影響

2.2 節で述べたとおり、静電容量のばらつきによって絶対電荷量がピクセルによって異なる。そこで、このピクセルごとの絶対電荷量の違いが閾値を調整し、測定した結果に影響を与えるか考える。

まず、目標閾値に対応する入力電荷量のレジスタ値は 2.3 節で用いた $Q = CV$ の逆を計算することで得られる。ピクセル A、B に搭載されているコンデンサの静電容量を C_A 、 C_B として $C_A = 2C_B$ という関係があるとすれば、調整時の絶対電荷量はピクセル A のものがピクセル B の 2 倍になる。つまり、閾値の調整結果は絶対電荷量によるためピクセル A の閾値はピクセル B の閾値の 2 倍になるはずである。しかし、絶対電荷量が違うとしても計算電荷量は共通であり、閾値

調整時に用いた計算電荷量相当の絶対電荷量が入力されれば、ヒット数は信号入力回数の半分になる。つまり、閾値に相当する絶対電荷量が大きく異なっているとしても、本測定法では静電容量によらず、どちらのピクセルも同じ計算電荷量相当の閾値に調整されるはずである。

その一方で、ピクセル A、B のノイズ量に相当する絶対電荷量が等しい場合、ピクセルの持つコンデンサの静電容量が大きい場合測定されるノイズ量が小さくなる。これは 2.5.2 節での議論と同じで横軸が圧縮されるからである。

よって静電容量の違いはノイズ量の測定値に違いを与えるが、閾値の測定値には影響を与えない。つまり、例えば 996 e を目標閾値として閾値調整されると、測定値は 996 e になるはずである。

第3章

閾値調整の結果

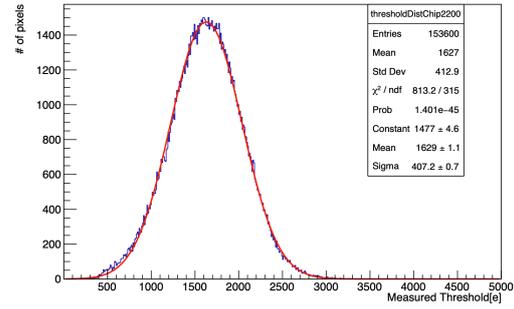
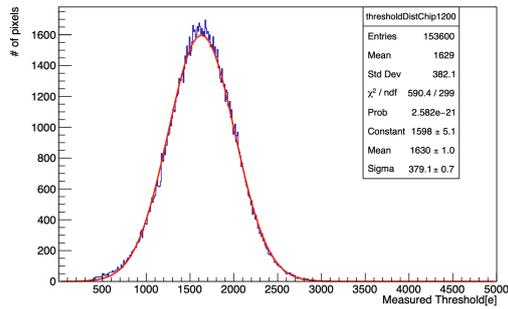
この章では、2章で述べた閾値調整・測定手法を動作セットアップ上で試験した結果を示す。まず、3.1節で、説明した閾値調整の方法で、真の目標閾値を996eとして閾値を調整した結果を示す。次に3.2節で、複数の目標閾値に対して閾値調整した際の結果を示す。そして3.3節で、真の目標閾値を996eとして閾値調整したあと、同時入力ピクセル数を決めるnstepsのみを変化させて閾値を測定した結果を示す。最後に3.4節で、3.2節と3.3節で得られた結果に対して検討する。なお、本章で示す閾値の測定結果は、3.3節を除いて、2.4節で説明したnstepsと同時入力ピクセル数を用いた。また、閾値調整は全て2.4節で説明したnstepsと同時入力ピクセル数を用いた。

3.1 閾値調整の方法の各段階

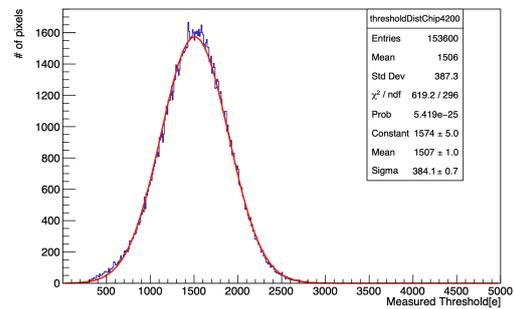
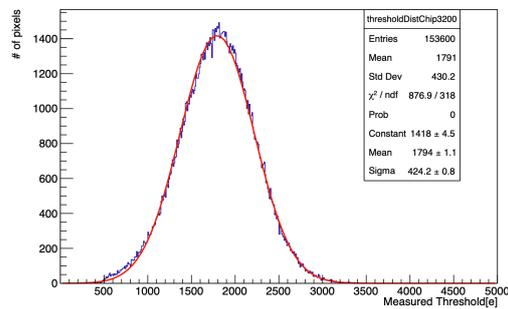
この節では、3.4節の閾値調整の方法で、実際に1503eに閾値を調整してから996eに閾値を調整した結果を示す。まず3.1.1節では、一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値が初期値である時の閾値分布を示す。次に、3.1.2節では、閾値が1503eになるように一括調整レジスタと個別調整レジスタを調整したあとの閾値分布を示す。最後に、3.1.3節では、閾値が996eになるように一括調整レジスタと個別調整レジスタを調整したあとの閾値分布を示す。

3.1.1 一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値が初期値である時の閾値分布

一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値が初期値である時の閾値分布を図3.1に示す。右上のMeanと書かれている値がピーク値である。閾値分布のピーク値はASICによって異なり、図3.1下部のガウスフィットの結果のMeanは1500~1800eの範囲にある。また、1つのASICの中でも、ガウスフィットの結果のSigmaは標準偏差が370~430eと、ピクセルごとの閾値のばらつきが大きい。



(a) チップ 1 の一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値が初期値である時の閾値分布 (b) チップ 2 の一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値が初期値である時の閾値分布

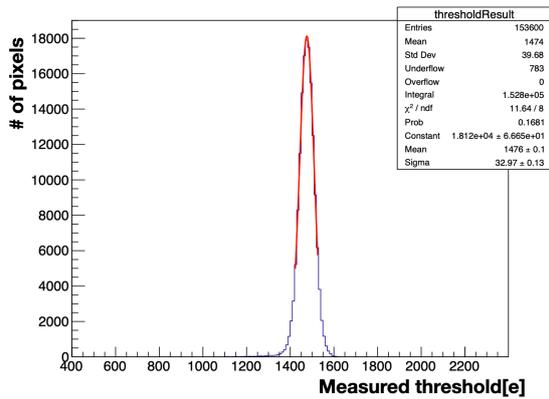


(c) チップ 3 の一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値が初期値である時の閾値分布 (d) チップ 4 の一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値が初期値である時の閾値分布

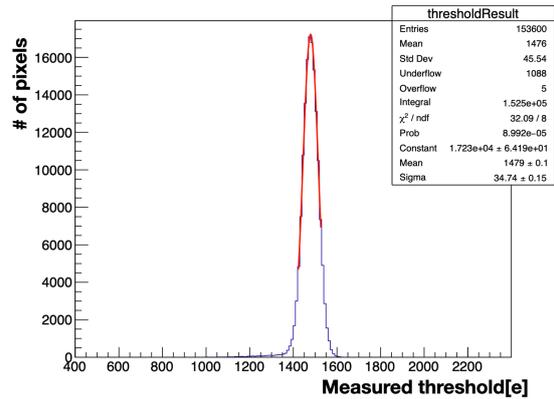
図 3.1: 一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値が初期値である時の閾値分布比較。閾値分布のピーク値は Mean として図中に示されており、ASIC によって異なり 1500~1800 e の範囲にある。

3.1.2 仮の目標閾値への閾値調整後の閾値分布

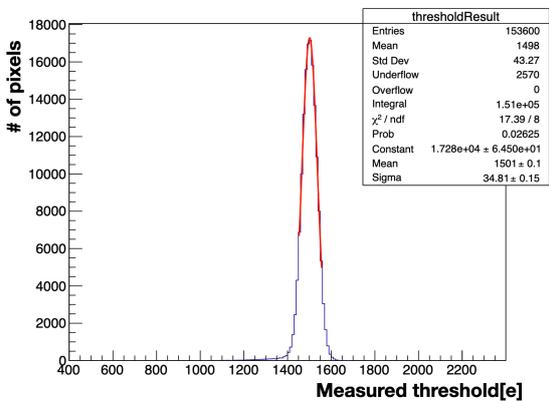
2.6.3 節で述べた方法にしたがって、まず、1503 e を仮の目標閾値として一括調整レジスタと個別調整レジスタを調整した閾値分布を図 3.2 に示す。仮の目標閾値である 1503 e に対し閾値分布のピーク値は、チップ 3、4 については $\pm 10 e$ 程度以内におさまっているが、チップ 1、2 については 15~30 e 程度小さい。



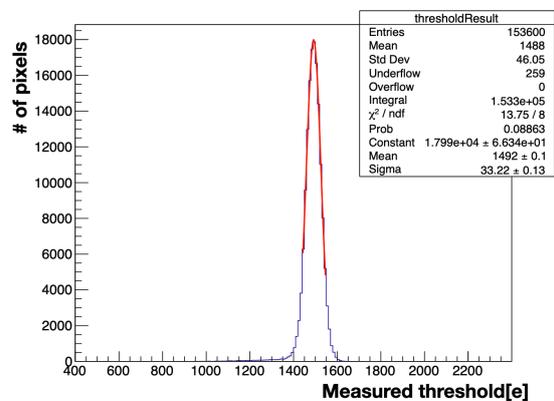
(a) チップ 1 の閾値分布



(b) チップ 2 の閾値分布。



(c) チップ 3 閾値分布。



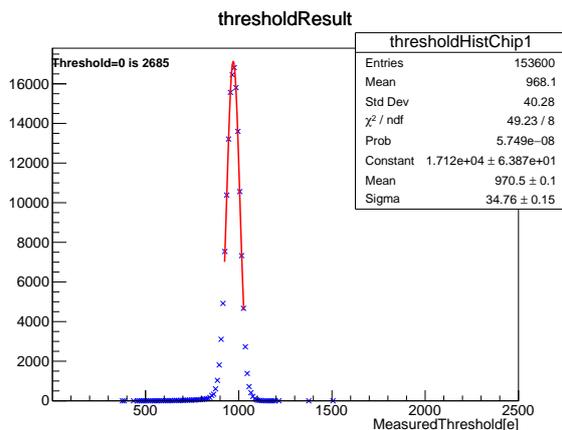
(d) チップ 4 の閾値分布。

図 3.2: 仮の目標閾値である 1503 e へ一括調整レジスタと個別調整レジスタを調整した後の閾値分布。それぞれの閾値分布のばらつきは小さくなり、1503 e から ± 30 e の範囲にピークがある。図中右上の箱の下部が、ピークをガウスフィットした結果である。

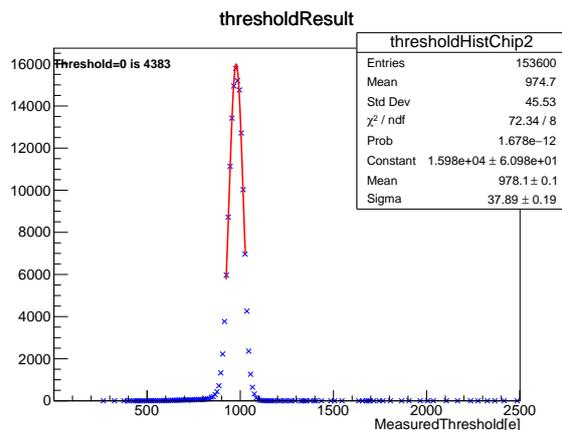
3.1.3 真の目標閾値への閾値調整後の閾値分布

2.6.3 節で述べた方法にしたがって、3.1.2 節の仮の目標閾値への閾値調整の後に、真の目標閾値として 996 e に一括調整レジスタと個別調整レジスタを調整した結果を図 3.3 に示す。

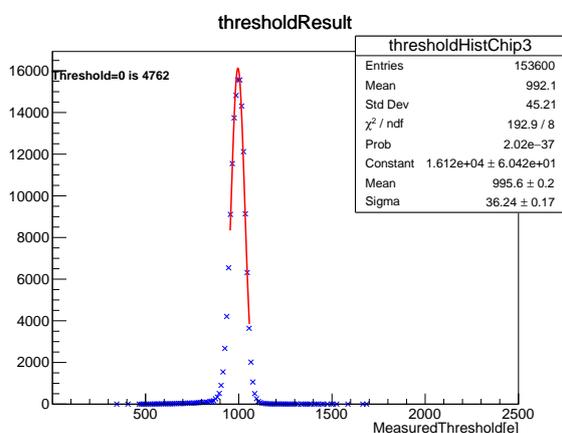
3.1.2 節同様、真の目標閾値である 996 e に対し閾値分布のピーク値は、チップ 3、4 については ± 10 e 程度以内におさまっているが、チップ 1、2 については 15~30 e 程度小さい。



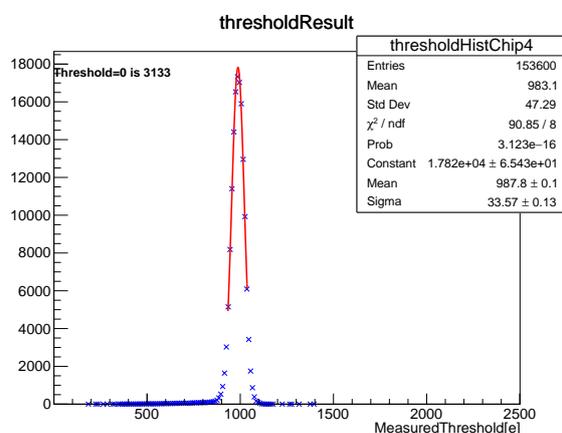
(a) チップ 1 の閾値分布



(b) チップ 2 の閾値分布。



(c) チップ 3 の閾値分布。

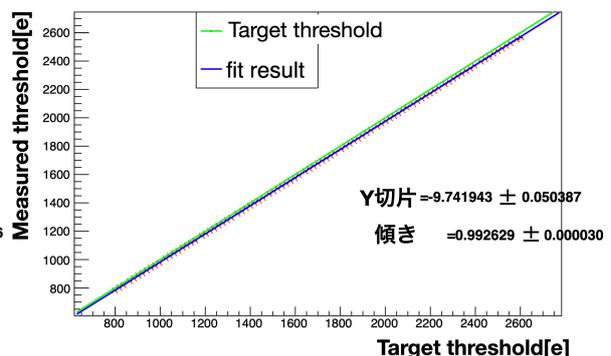
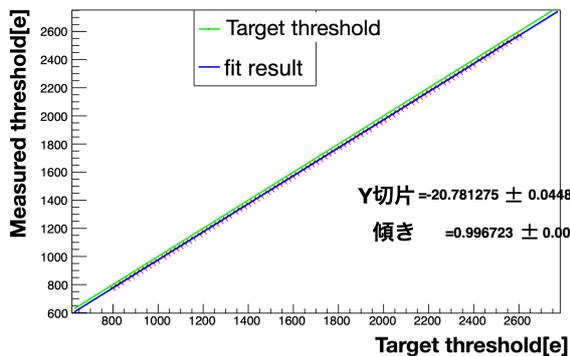


(d) チップ 4 の閾値分布。

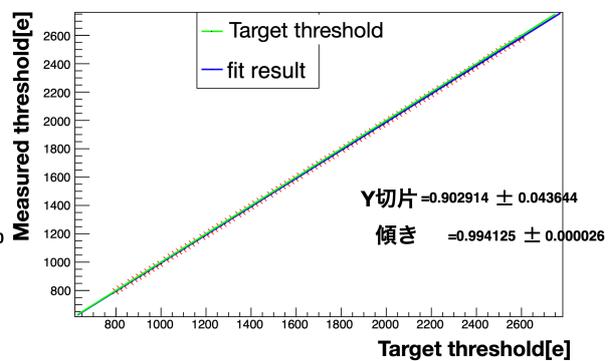
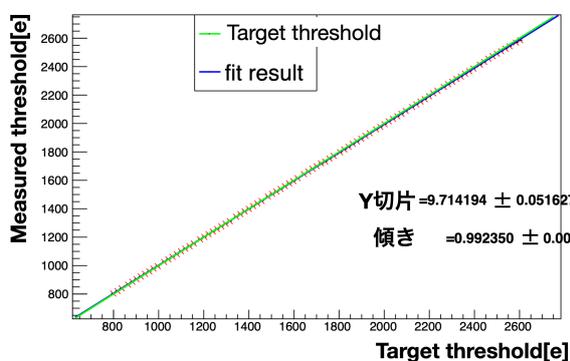
図 3.3: 真の目標閾値である 996 e へ一括調整レジスタと個別調整レジスタを調整した後の閾値分布。それぞれの閾値分布のばらつきは小さくなり、996 e から ± 30 e の範囲にピークがある。図中右上の箱の下部が、ピークをガウスフィットした結果である。

3.2 複数の真の目標閾値への調整結果

3.1.3 節での、目標閾値と閾値分布のピーク値の乖離が、他の真の目標閾値でも同様なのか検証する。真の目標閾値を 799 e から 2603 e まで約 20 e ずつ変化させて、それぞれ 3.1 節と同様に閾値調整した。このときの、真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の関係を図 3.4 に示す。なお、フィット時に各データ点につけた誤差は、閾値分布のピーク値を閾値分布からガウスフィットで求めた際の誤差である。



(a) チップ 1 の真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の比較。 (b) チップ 2 の真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の比較。

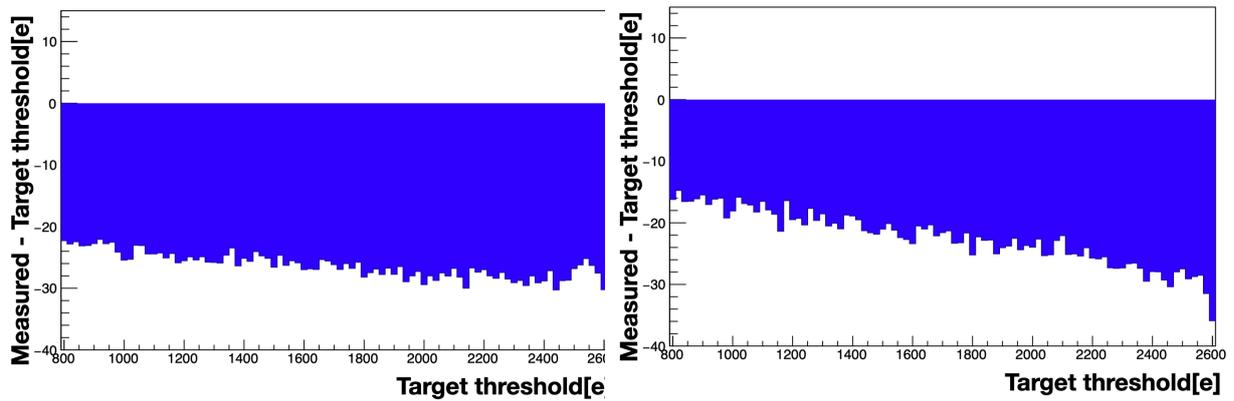


(c) チップ 3 の真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の比較。 (d) チップ 4 の真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の比較。

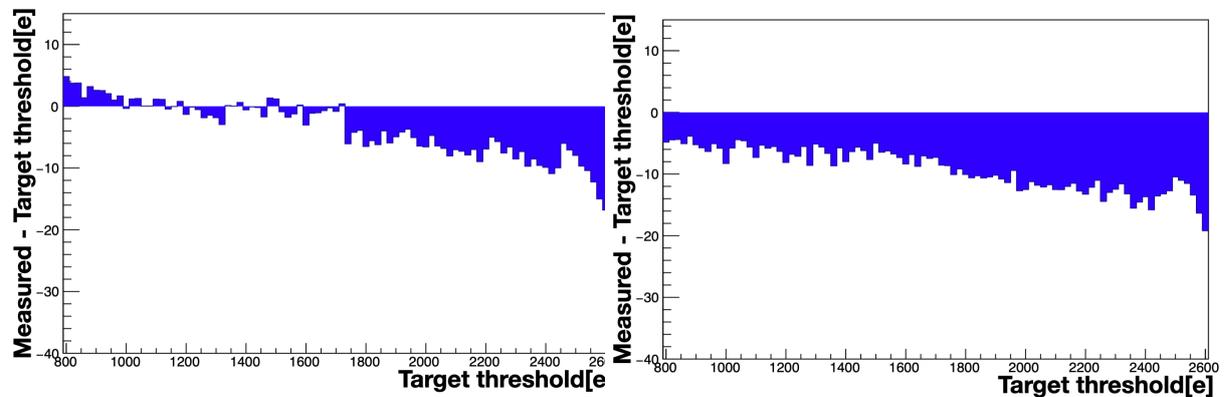
図 3.4: 複数の閾値に調整した時の調整結果。それぞれを直線でフィットした時の傾きと y 切片が図右側に書かれ、またフィット関数が青線で示されている。また、真の目標閾値の線が緑色で描かれている。

図中右側に直線でフィットした時の傾きと y 切片を示す。全てのチップにおいてフィット関数の傾きは 1 より小さいが、小数点以下第 3 位での違いであり、本研究では調査しない。その一方で、y 切片の値はチップによって様々である。チップ 3、4 の y 切片は正であるが、チップ 1、2 の y 切片は負である。つまり、チップ 1、2 の閾値分布のピーク値は、常に真の目標閾値よりも小さい。

また、この傾向を詳しく調べるために、測定された閾値分布のピーク値から真の目標閾値を差し引いた差分の分布を図 3.5 に示す。



(a) チップ 1 の真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の比較。 (b) チップ 2 の真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の比較。



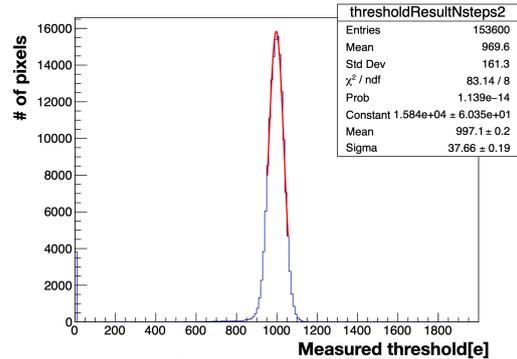
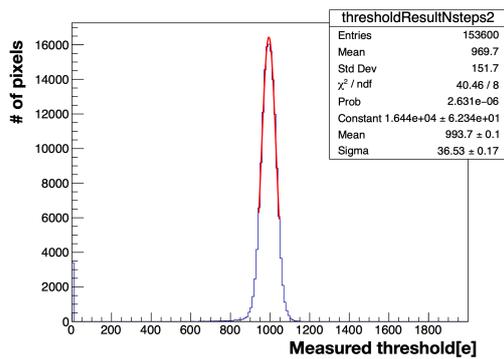
(c) チップ 3 の真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の比較。 (d) チップ 4 の真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の比較。

図 3.5: 複数の閾値に調整したときの真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の差分の分布。チップ 3 は測定された閾値分布のピーク値が真の目標閾値を超えることがあるが、その他のチップでは全て、真の目標閾値よりも測定された閾値分布のピーク値が小さい。また、真の目標閾値が大きくなるとこの差分が負の方向に大きくなる傾向もあるが、本研究ではこの傾向については調査しない。

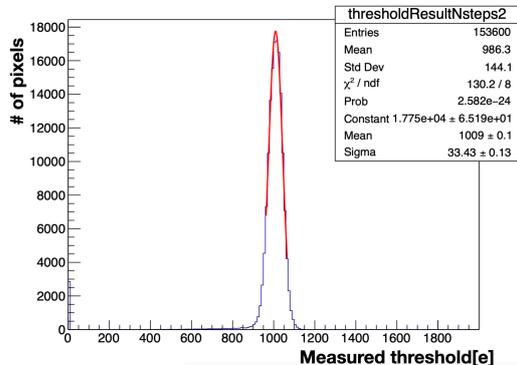
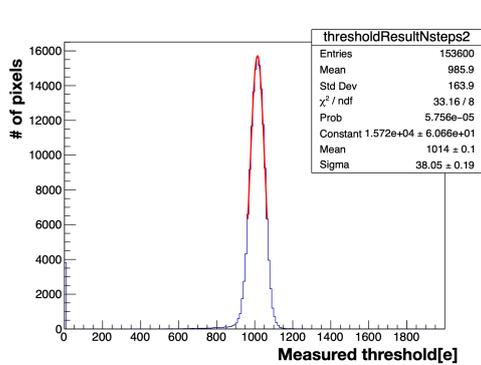
チップ 3 を除いて、全ての真の目標閾値で、測定された閾値分布のピーク値が真の目標閾値よりも小さい。また、真の目標閾値が大きいと、この差分は負の方向に大きい傾向もある。この傾向は図 3.4 に示した傾きが 1 より小さいことに対応する。

3.3 同時入力ピクセル数の変化による閾値ピーク値の変化

同時入力ピクセル数を変更するために、2.4 節で述べた $nsteps$ を変更した。3.1.3 節で、真の目標閾値である $996e$ に閾値を調整した一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値をそのまま使用し、 $nsteps$ を 5 から 2 に変更して閾値を測定した結果を図 3.6 に示す。



- (a) チップ 1 で、nsteps を 5 から 2 に変更して、一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値は 3.1.3 節のものを使用したときに、測定された閾値分布。
- (b) チップ 2 で、nsteps を 5 から 2 に変更して、一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値は 3.1.3 節のものを使用したときに、測定された閾値分布。



- (c) チップ 3 で、nsteps を 5 から 2 に変更して、一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値は 3.1.3 節のものを使用したときに、測定された閾値分布。
- (d) チップ 4 で、nsteps を 5 から 2 に変更して、一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値は 3.1.3 節のものを使用したときに、測定された閾値分布。

図 3.6: 閾値のレジスタ値は 3.1.3 節のものを使用し、nsteps を 5 から 2 に変えて閾値測定した際の閾値分布。

この nsteps の変更は、同時入力ピクセル数を 480 個から 1200 個に変更したことに相当する。nsteps が 5 のときと 2 のときの閾値分布のピーク値の比較を表 3.1 に示す。チップ 1、2 は真の目標閾値である 996 e に対し閾値分布のピーク値が $\pm 10\text{e}$ 程度以内におさまっているが、チップ 3、4 に関しては 10~20e 程度大きい。nsteps を 5 から 2 に変更すると、測定された閾値分布の

表 3.1: nsteps が 5 のときと 2 のときの閾値分布のピーク値の比較

nsteps	5	2
同時入力ピクセル数	480 個	1200 個
チップ 1 の閾値 [e]	970.5	993.1
チップ 2 の閾値 [e]	978.1	997.1
チップ 3 の閾値 [e]	995.6	1014
チップ 4 の閾値 [e]	987.8	1009

ピーク値が全てのチップで約 20 e 増えた。

また、3.1.3 節で、真の目標閾値である 996 e に閾値を調整した一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値をそのまま使用し、nsteps をさらに 1、15、25、50 と変更させて閾値測定した。この時の nsteps に対する閾値分布のピーク値を図 3.7 に示す。表 3.1 での傾向と同様に、全てのチップにおいて nsteps が大きくなると閾値分布のピーク値は減少し、nsteps が 25 以上ではほぼ変化しない。

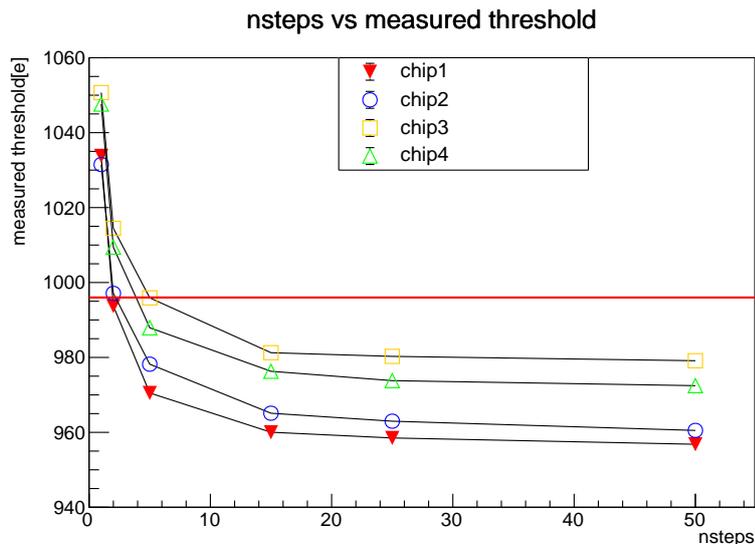


図 3.7: nsteps を 1、2、5、15、25、50 と変化させたときの閾値分布のピーク値を測定した図。赤線は真の目標閾値である 996 e を示す。nsteps が増えるごとに閾値分布のピーク値は小さくなる。

3.4 挙動からの検討

この節では、後の検討課題をそれぞれ説明する。

3.4.1 真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の乖離

3.1 節、3.2 節で見られた真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の乖離について考える。チップ 3 を除いて、今回調整した全ての真の目標閾値で、測定された閾値分布のピーク値は真の目標閾値よりも小さい。この傾向の原因としては、閾値測定法もしくは調整法の何らかの問題である可能性がある。本研究では、閾値測定法について、式 2.2 にフィットする手法を 5 章で検討する。

3.4.2 同時入力ピクセル数を変化させたときの閾値分布のピーク値の変化

3.3 節で見られた nsteps の変化による、測定された閾値分布のピーク値の乖離について考える。一括調整レジスタおよび個別調整レジスタのレジスタ値を変更していないので、真の目標閾値に調

調整された閾値分布のピーク値は変化しないはずである。その一方で、nsteps を変更すると測定される閾値分布のピーク値が変化するので、閾値をうまく測定できていない可能性がある。3.4.1 節の課題と違い、調整された一括調整レジスタと個別調整レジスタのレジスタ値に変化がないのに測定される閾値分布のピーク値が変化する。

測定される閾値は、2.5 節で説明した通り、ピクセルのアナログ回路に対するテスト信号の入力電荷量への応答によって変化する。よって、この乖離は閾値測定の際の絶対電荷量が異なり、測定されるヒット数に問題が出ていると考えた。本研究では、このテスト信号による入力電荷量について 4 章で検証する。

第 4 章

同時入力ピクセル数依存の閾値分布のピーク値の変化の検証

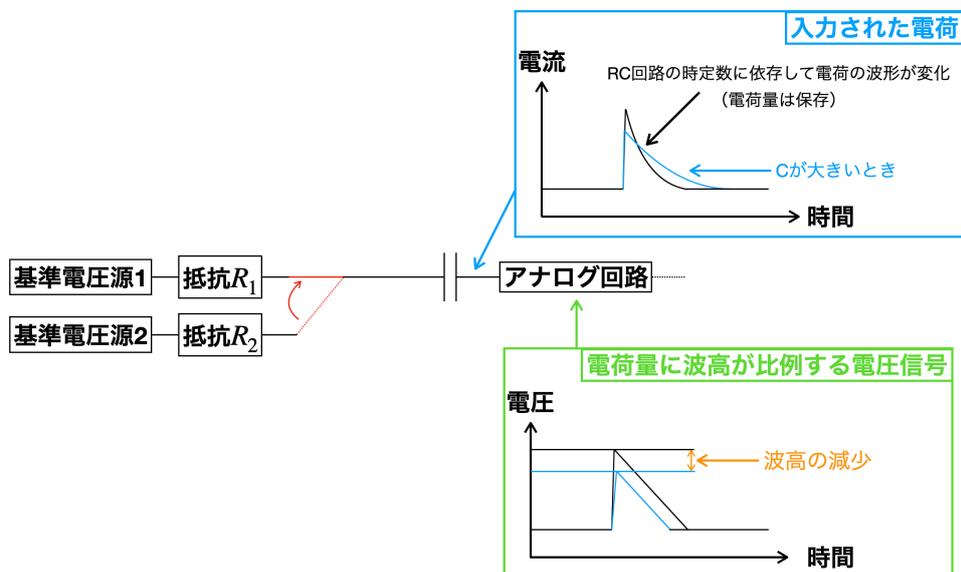
この章では、3.3 節でみられた同時入力ピクセル数依存の閾値分布のピーク値の変化の原因について検証する。まず、4.1 節で原因の候補であるテスト信号による入力電荷量の減少について説明する。次に、4.2 節でその原因の検証方法について説明する。そして、4.3 節、4.4 節、4.5 節、4.6 節で実際の検証に必要な情報を示す。最後に、4.7 節に検証結果を示す。

4.1 同時入力ピクセル数とテスト信号

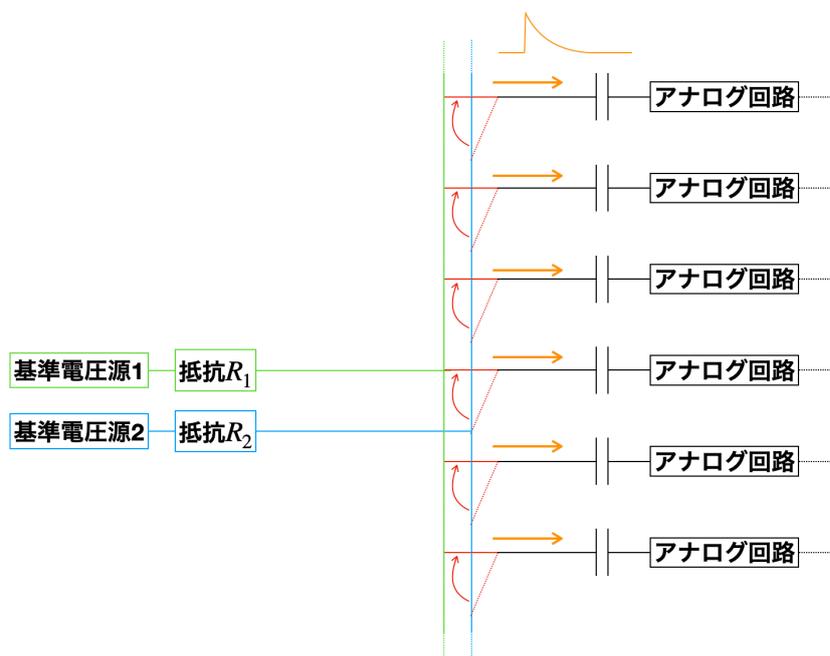
3.3 節にみられた、同時入力ピクセル数に依存した閾値分布のピーク値の変化の原因を考える。2.5.2 節で述べたように、設定された閾値に相当する絶対電荷量が同等であっても、電荷入力用のコンデンサの静電容量が異なる場合、絶対電荷量が異なる。このため、測定される閾値は変化した。つまり、同時入力ピクセル数を変化させた際に、テスト信号のレジスタ値に対する絶対電荷量が増加すれば、3.3 節の現象は起こりうる。

では、同時入力ピクセル数を変化させた際に絶対電荷量が変わりうるか考える。まず、テスト信号の入力では、基準電圧源 1 から電荷入力用コンデンサまでの内部抵抗と、電荷入力用のコンデンサの静電容量による、RC 回路の過渡現象が起こる。この過渡現象による影響の概念図を図 4.1 に示す。

基準電圧源 2 から基準電圧源 1 に接続を切り替えて、RC 回路の時定数よりも十分大きい時間だけ基準電圧源 1 につなげた時を考える。電荷入力用のコンデンサに入力される絶対電荷量の総量は同時入力ピクセル数に依存しないが、同時入力ピクセル数が多くなるほど時定数 RC は増加し、パルス状の電荷の波形は尾を引くような形状に変化する。この尾を引いた電荷は、同時入力ピクセル数が少ないときの電荷に比べて、長い時間をかけて、その電荷量をアナログ回路に入力することになり、入力電荷の波高が小さくなる。この波形の波高の減少に応じて、ヒット判定に用いられる電圧信号の波高が減少するならば、同時入力ピクセル数の増加により、テスト信号のレジスタ値に対する絶対電荷量が増加する。



(a) ひとつのピクセルにテスト信号を送る際の、テスト信号の変換過程。



$$\text{静電容量} C = \text{電荷入力用コンデンサひとつあたりの静電容量} \times \text{同時入力ピクセル数}$$

(b) 同時入力ピクセル数が多いときのテスト信号。

図 4.1: RC 回路の際のピクセルに入力されるテスト信号の概念図。図 4.1a では、単に 1 ピクセルにテスト信号を入力する場合でも、電荷入力用コンデンサの静電容量で RC 回路の時定数が変わる。図 4.1b では、同時入力ピクセル数だけ電荷入力用コンデンサが並列に繋げられるため、時定数 RC への影響が大きい。

4.2 テスト信号による入力波形の波高推定法

4.1 節で述べたように、アナログ回路中でヒット判定に用いられる電圧信号の波高が、同時入力ピクセル数によって変化しているのかを確認したい。そこで、アナログ回路でヒット判定に用いられる電圧信号の波高推定手法（波高推定手法と呼ぶ）を、大阪大学の廣瀬氏との議論を経て考案した。これは、LBNLの先行研究 [10] を変更したものである。

複数の時間とその時の電圧[e]（閾値）を測定→入力信号を再現

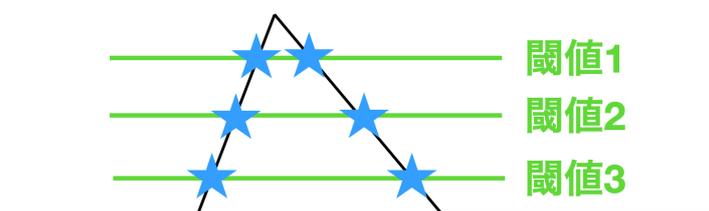


図 4.2: 閾値を超えた時間と閾値を下回った時間を複数の閾値で測定して、入力された信号の波形を再現する概念図。

波高推定手法では、波高を推定する前に、まずアナログ回路で変換・増幅された電圧信号の波形を再現する。この波形再現の概念図を図 4.2 に示す。アナログ回路で変換・増幅された電圧信号が閾値電圧を超えた時刻と閾値電圧を下回った時刻（ふたつの時間を合わせて閾値到達時刻と呼ぶ）をそれぞれ測定する。この時刻を複数の閾値で測定し、測定点をつなげると図 4.2 のように、ピクセルごとに、アナログ回路で変換・増幅された電圧信号の波形を得ることができる。波形の再現をしたあと、この再現した波形の波高を推定する。

この波形の横軸は時間である。縦軸は閾値到達時刻の測定に用いた閾値電圧に相当するが、統一した同時入力ピクセル数（480 個）を用いて、真の目標閾値に対して調整し、測定された閾値であり、単位は計算電荷量 [e] である。

波高推定手法の手順としては以下のとおりである。

1. ピクセルごとに波形を測定する。
2. ピクセルごとの波形を重ね合わせ、縦軸がピクセルの閾値、横軸がその閾値の閾値到達時刻の、二次元ヒストグラムを作る。
3. 二次元ヒストグラムで時間のビンごとの閾値の平均 ($\int_T^{T+\delta T} threshold(t)dt/\delta T$) とその標準誤差を計算し、ASIC あたりの波形を再現する。
4. 求めた波形の頂点付近がガウス分布であると仮定してフィットし、波高を得る。

4.3 閾値到達時刻測定

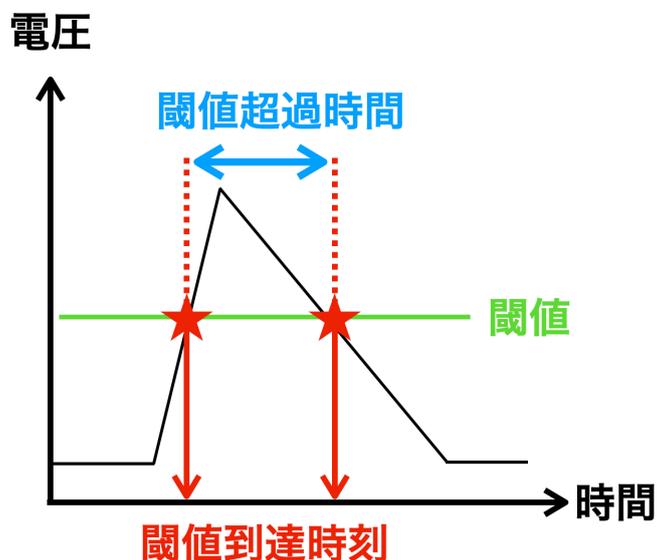


図 4.3: 閾値到達時刻と閾値超過時間の概念図。黄緑の線が閾値で、赤線の時間に信号が閾値を超え、その後閾値を下回る。この閾値を超えた時刻、下回った時刻が閾値到達時刻である。また、閾値到達時刻同士の差分である青線が閾値超過時間である。

4.2 節の手法で用いる閾値到達時刻の測定について説明する。

ASIC では、ピクセルごとに図 4.3 のように、信号が閾値を超えた時刻と、その後閾値よりも大きい波高だった時間（閾値超過時間と呼ぶ）を測定できる。信号が閾値を超えた時刻と閾値超過時間の和を、信号が閾値を下回った時刻として定義する。信号が閾値を超えた時刻と閾値超過時間は、それぞれ 1.5625 ns 単位（640 MHz のクロック数でサンプリング）で測定される。測定をされる時刻は、テスト信号を送る時刻を基準としている。1 回の測定につきテスト信号は 50 回入力し、ピクセルごとに、ヒットと判定された信号の、閾値を超えた時刻と閾値超過時間の平均値とその標準偏差を取得した。ただし、この閾値到達時刻測定では、ASIC 内部の時刻測定回路の都合上、1 コアカラムにつき 4 ピクセル以下しか同時に信号を入力できない。そのため、閾値測定の時とは同時入力ピクセル数が異なるが、設定できる同時入力ピクセル数の範囲で、波高が変化するか検証することはできる。

この測定では、1 コアカラムあたりの同時入力ピクセル数を 4 にし、nsteps を 1 と 25 の間で変化させた。したがって、同時入力ピクセル数は、 $4 \times \frac{50}{25} = 8$ と、 $4 \times \frac{50}{1} = 200$ の間である。

4.3.1 測定条件

4.2 節の手法で測定する条件について説明する。

まず、ピクセルごとのテスト信号の波形を再現する時の、縦軸の電荷量の値を決めるために、閾値を調整し、調整した閾値を測定する。ピクセルの閾値は目標閾値 [e] を 404、601、799、996、1202、1400、1597、1804、2001 と約 200 e ずつ変えながら調整し、閾値を測定した結果を用いた。閾値の調整と測定の際の nsteps は 5 にし、コアカラムあたりの同時入力ピクセル数は 48 個とした。この時の同時入力ピクセル数は 480 個である。

次に、波高を測定するための標準のテスト信号は、計算電荷量が 1503 e になるレジスタ値を用い、1 ピクセルにつき 50 回ずつ入力した。本測定では、nsteps を 1 ～ 5 の間を 1 刻み、10 ～ 25 の間を 5 刻みで変えた。したがって、同時入力ピクセル数は最小 8 個、最大 200 個である。

波形の測定には、この節の初めに述べた 404～2001 e の 9 種類の閾値を用いた。したがって、最大 18 点の時刻がテスト信号の波形測定に用いられる。

4.4 1 ピクセルでのテスト信号の波形の再現

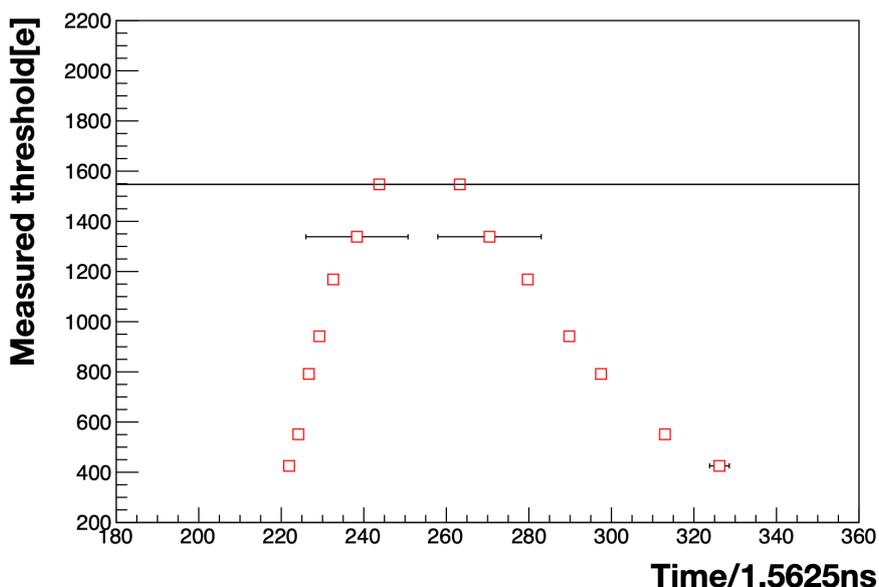


図 4.4: チップ 4 のとある 1 ピクセルに入力されたテスト信号。横軸が時間であり、縦軸が閾値到達時刻の測定に用いた閾値である。誤差は測定された時刻の標準誤差である。

チップ 4 のある 1 ピクセルの波形を図 4.4 に示す。閾値が 0 と測定されたとき、ヒット数が 0 になったときの、閾値到達時間と閾値超過時間はこの波形再現の図に表示されていない。時刻を測定できた閾値は、下から、404、601、799、996、1202、1400、1597 e である。

それぞれの測定点について、YARR から出力された標準偏差とヒット数を用いて計算した $(\frac{\text{標準偏差}}{\sqrt{\text{ヒット数}}})$ 、時刻の標準誤差が示されている。なお、ヒット数が 1 の時は標準誤差を定義できないので、仮に $10000 \times 1.5625 \text{ ns}$ として表示している。1400、1597 e の点では、ヒット数が少ないため、標準誤差は $20[1.5625\text{ns}]$ 以上である。

また、1804e 以上の閾値でヒット数が 0 になるが、これはチップのノイズ量 σ が約 130e であり、 2σ 上回る閾値で 50 回の信号入力でヒットと判定されない確率が約 10% なので妥当である。

4.5 波高推定手法の各段階

この節では 4.4 節の波形をもとに、入力電荷量 1503e で nsteps が 2 のときのテスト信号の波高を推定する。まず、4.4 節で作成したピクセルごとの波形の測定点を、ひとつの二次元ヒストグラムに、誤差を無視して全ピクセル分つめる。

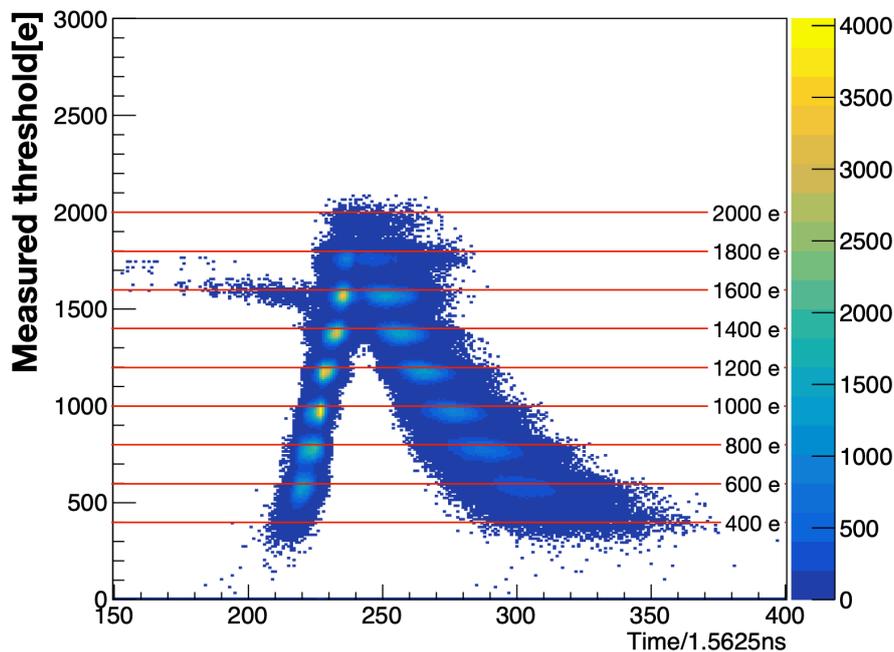


図 4.5: チップ 1 に入力電荷量 1503e で nsteps が 2 のテスト信号を入力した。4.4 節で作成したような 1 ピクセルの波形の測定点を、ひとつの二次元ヒストグラムに、誤差を無視して全ピクセル分つめる。この時得られた二次元ヒストグラム。横軸が時間であり、縦軸が閾値到達時刻が測定された閾値である。図中赤線が目標としていた閾値。

図 4.5 にチップ 1 のデータで作成した二次元ヒストグラムを示す。このヒストグラムは、測定された閾値が 0 かつ閾値到達時刻が 0 であるデータを除いて作成した。縦軸の、測定された閾値は目標閾値付近に分布する。3.2 節で述べた、目標閾値からの測定された閾値分布のピーク値の乖離も見られる。

Time/1.5625 ns が 220 以下で閾値が 1500e 以上の領域のイベントが存在している。このイベントについては 4.9.3 節で議論する。

次にこの二次元ヒストグラムに対し 1.5625 ns ごとに閾値の平均とその標準誤差を計算し、図 4.6 のように時間の関数としてプロットしたグラフを作る。そのグラフの頂点付近の範囲でガウス分布によるフィッティングを行い、テスト信号の波高を推定する。図中右上の箱の下部がフィッ

ト結果であり、波高は Constant で示される $1658 \pm 0.7 e$ となった。入力電荷量としていたのは $1503 e$ なので、約 $150 e$ 大きく推定された。

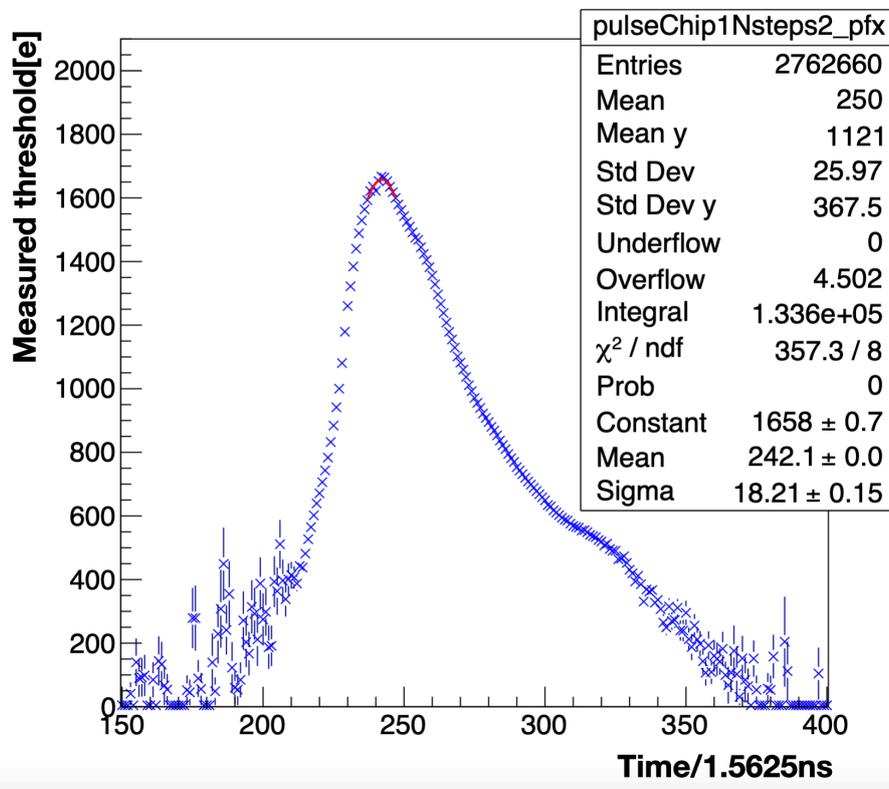


図 4.6: 図 4.5 に対して、 1.5625 ns ごとに閾値の平均とその自乗平均平方根を計算したグラフ。さらに頂点付近をガウス分布でフィットする。図中右上の箱の下部がフィット結果であり、波高は約 $1658 e$ となった。

4.6 波高変化の測定精度

この節では波高推定手法の、波高変化の測定精度について検証する。例えば $20 e$ だけ入力信号の波高が増加した時に、推定される波高が $20 e$ 増加したと判断できれば、精度が良いと言える。また、推定される波高が、入力信号の波高の変化量だけ変化しただけでなく、増加あるいは減少の傾向を正しく推定できる精度があれば、4.1 節で説明した、同時入力ピクセル数の変化による入力信号の波高の変化を観測できる。

4.6.1 検証方法とその際の測定条件

波高推定の精度を検証する方法とその際の測定条件を説明する。

同時入力ピクセル数を固定し、複数種類の計算電荷量のテスト信号を入力し、4.5 節で述べた方法でテスト信号の波高を推定する。この時に、計算電荷量の変化量に対する推定されたテスト信号

の波高の変化量を確認する。

測定条件である、同時入力ピクセル数、計算電荷量の種類及びテスト信号の波高測定時の閾値は以下の通りである。

1. 閾値到達時間と閾値超過時間の測定時の nsteps は 5 (同時入力ピクセル数は 40 個)。
2. 閾値到達時間と閾値超過時間の測定時に、入力するテスト信号の計算電荷量は、996 e から 2001 e の間を約 100 e 刻み、さらに 1400 e から 1597 e の間は 10 e 刻みで変える*1。よって、計算電荷量の種類は 29 種類である。
3. 閾値は 4.3.1 節の範囲に加えて、2199、2396、2603 e での測定値も使用する。閾値の調整と閾値の測定は、nsteps は 5 で同時入力ピクセル数は 480 個である (4.3.1 節の閾値調整・測定条件と同じ)。

4.6.2 結果

4.6.1 節の条件で波高を推定した結果を図 4.7 に示す。

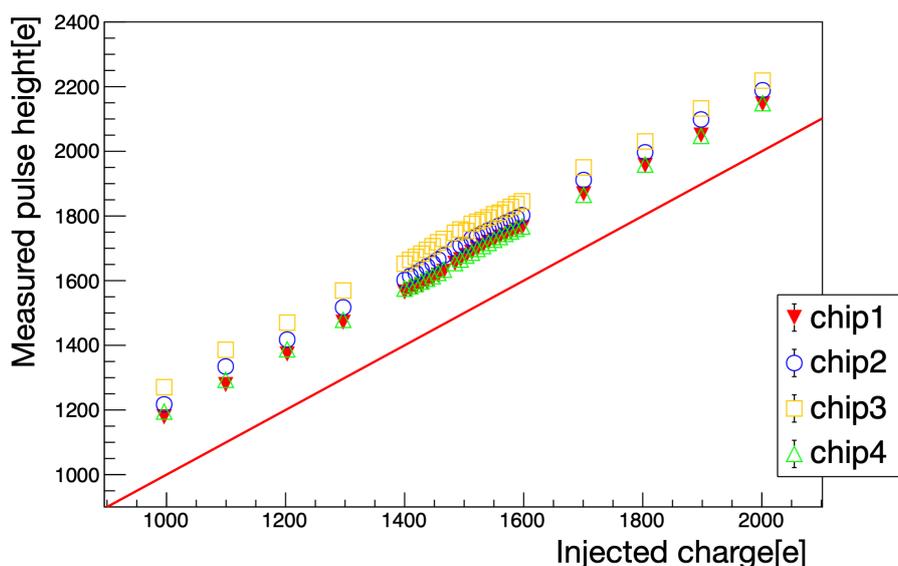


図 4.7: 4.6.1 節の条件で波高を推定した結果。縦軸が測定された波高であり、横軸が入力したテスト信号の電荷量である。また、入力電荷量と波高推定値が同じ場合の線を赤線で示している。

どの計算電荷量でも、波高の推定値とテスト信号の入力電荷量の間には 180~280 e 程度の乖離がある。これは、推定手法のバイアスがある、あるいは実際に絶対電荷量が想定よりも大きいということになる。この点に関しては、4.9.4 節で議論する。

その一方で、波高推定値は赤線に近い傾きを持っている。図 4.7 の 1400 e から 1597 e の間を拡

*1 996、1099、1202、1297、1400、1409、1419、1428、1438、1447、1456、1466、1485、1494、1503、1513、1522、1532、1541、1550、1560、1569、1579、1588、1597、1701、1804、1898、2001 e

大した図を図 4.8 に示す。約 20e だけ計算電荷量が増えると推定波高は常に大きくなっているため、20e 程度の精度はある。

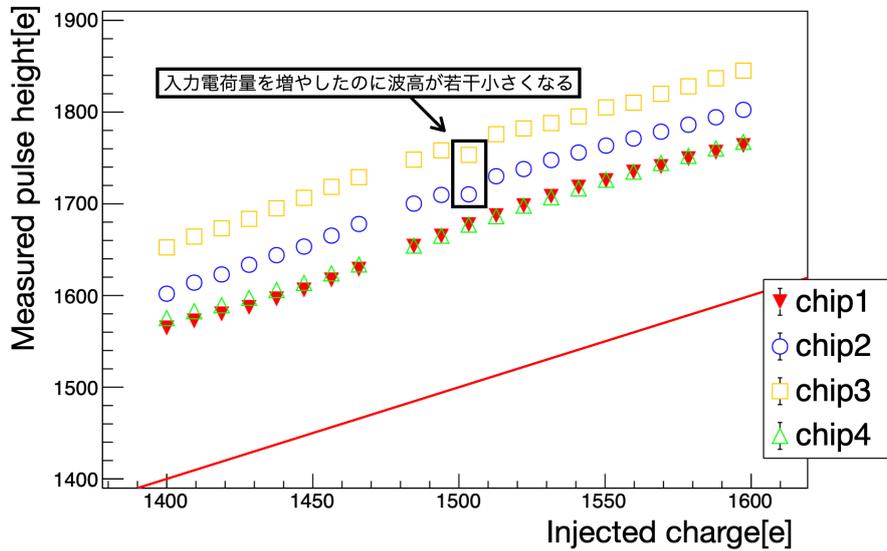


図 4.8: 図 4.7 の 1400 e から 1597 e の間を拡大した図。入力電荷量と波高推定値が同じ場合の線を赤線で示している。

4.7 nsteps を変化させた時の波高推定結果

4.3.1 節の条件で推定した波高の nsteps 依存性を図 4.9 に示す。どのチップでも nsteps の 1 から 25 の変化に対し、少なくとも 20e 以上は変化している。4.6 節で求めた波高の推定精度を考えると、実際に nsteps を変更するとピクセルに入力される波高が変化している。

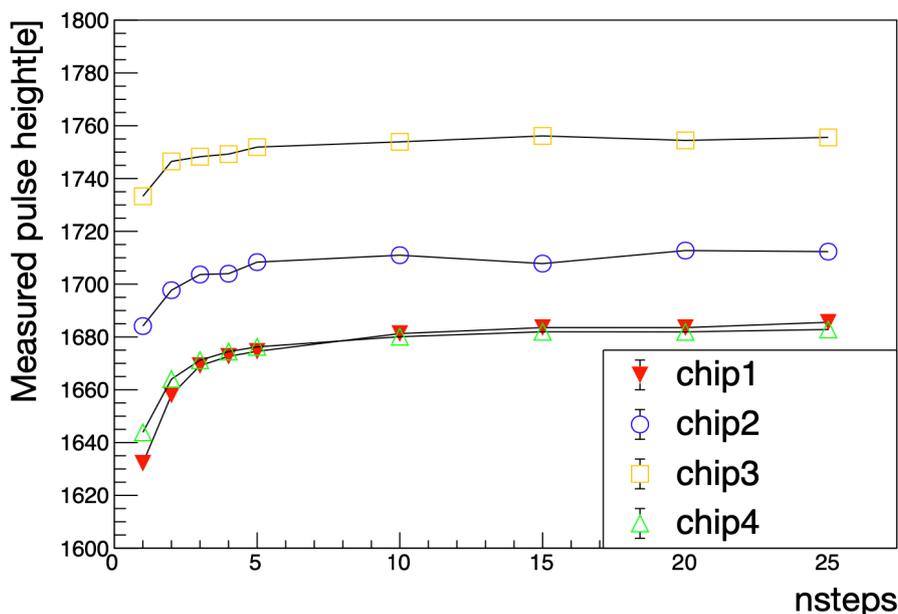


図 4.9: 4.3.1 節の条件で推定した波高の nsteps 依存。どのチップでも nsteps の 1 から 25 の変化に対し、少なくとも 20 e 以上は変化している。

4.8 コアカラムあたりの同時入力ピクセル数依存のテスト信号の波高の減少

nsteps 以外にも、コアカラムあたりの同時入力ピクセル数によって、アナログ回路で変換・増幅された電圧信号の波高が変化することが予想される。今回の波高推定法を用いる場合、コアカラムあたりの同時入力ピクセル数は 4 以下に限られる。そのため波高推定法ではなく、本章の動機となった閾値測定を用いる。まず、閾値は 996 e に nsteps を 5 にして再度調整し直した。そして nsteps は 5 に固定して、コアカラムあたりの同時入力ピクセル数は 48 と 4 の時のそれぞれで、閾値を測定した。もし今回考えた仮説が正しいければ、コアカラムあたりの同時入力ピクセル数が増えるほど、入力される信号の波高が小さくなるので、測定される閾値分布のピーク値は大きくなるはずである。このコアカラムあたりの同時入力ピクセル数を変えたときの閾値分布のピーク値の比較を表 4.1 に示す。

コアカラムあたりの同時入力ピクセルが少ない方が閾値分布のピーク値は 10~13 e 程度小さい。よって、コアカラムあたりで同時に動作するピクセル数を何種類か変更して閾値を測定して確認する必要はあるが、4.1 節で述べた仮説と矛盾しない。

また、nsteps が 5 で、コアカラムあたりの同時入力ピクセル数が 48 個と 4 個であるとき、同時入力ピクセル数はそれぞれ 480 個と 40 個である。この同時入力ピクセル数の違いは、図 3.7 における nsteps が 5 (同時入力ピクセル数 480 個) の時と nsteps が 50 (同時入力ピクセル数 48 個) の時とほぼ同等である。図 3.7 では nsteps が 5 から 50 に変化すると、10~15 e 程度変化してい

表 4.1: nsteps を 5 に固定してコアカラムあたりの同時入力ピクセル数のみを変化した時の閾値分布のピーク値比較

コアカラムあたりの同時入力ピクセル数	48	4
同時入力ピクセル数	480	40
チップ 1 の閾値分布のピーク値 [e]	972.5	962.4
チップ 2 の閾値分布のピーク値 [e]	978.2	969.3
チップ 3 の閾値分布のピーク値 [e]	1009.7	996.1
チップ 4 の閾値分布のピーク値 [e]	989.3	979.3

る。これは、表 4.1 の 10~13e 程度の変化とほぼ一致しており、4.1 節で述べた仮説と矛盾しない。

4.9 考察

4.9.1 最適な nsteps について

ここでは、検出器モジュールでテスト信号を用いた試験をする際の nsteps の新たなデフォルト値を提案する。本章の結果から、テスト信号の波高は nsteps に依存することがわかった。図 4.9 に示すように、この波高は nsteps が 10 以上でほぼ一定である。よって、1 コアカラムで 4 ピクセルにしかテスト信号を入力しない場合、nsteps は 10 以上にすることを提案する。

4.9.2 テスト信号の波高推定法について

本章では新しく考案したテスト信号の波高推定法を用いて、テスト信号による入力電荷量を推定した。今回の測定条件では、この波高推定法を用いると 20e 以上の差であれば観測できる。この精度は、波高推定の測定条件における閾値の種類をさらに増やすことでさらに良くすることができる。実際、閾値到達時刻を測定する閾値を、799e から 2603e の間を約 20e ずつ変化させた 91 種類で他の条件を 4.6.1 と同様にしてテスト信号の波高を推定した。その結果を図 4.10 と、1400e から 1597e の間を拡大した図 4.11 に示す。

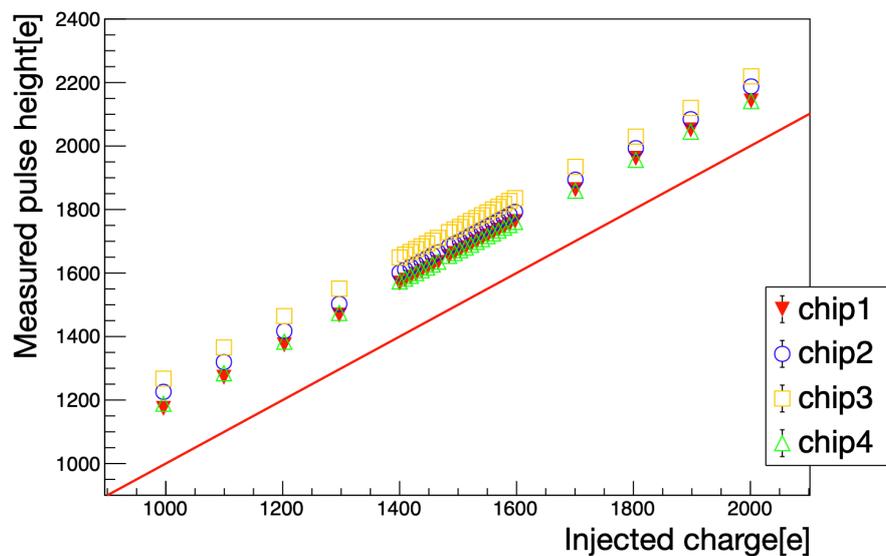


図 4.10: 波形を測定するための閾値を約 20 e ずつに変えて波高を推定した結果。縦軸が測定された波高であり、横軸が入力したテスト信号の電荷量である。また、入力電荷量と波高推定値が同じ場合の線を赤線で示している。

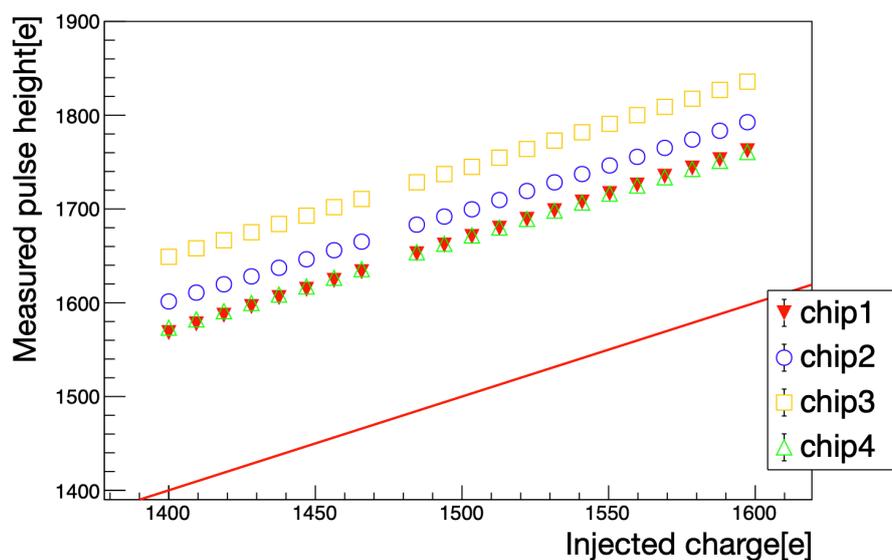


図 4.11: 図 4.10 の 1400 e から 1597 e の間を拡大した図。また、入力電荷量と波高推定値が同じ場合の線を赤線で示している。

約 10 e だけ入力電荷量を増加させたときもその違いを判断できている。この結果は、今回の考案した波高推定法で推定された電荷量の差の妥当性を示す。

4.9.3 閾値到達時刻が早いイベント

4.5 節で観測できた、Time/1.5625 ns が 220 以下で閾値が 1500 e 以上の領域のイベントについて考察する。これは、ASIC の仕様により、ヒット判定でありながら信号が閾値を超える時刻と閾値超過時間が測定できず 0 になってしまうイベントが存在し、そのイベントも含めて信号が閾値を超える時刻と閾値超過時間の平均をそれぞれ計算することが原因である。このとき信号が閾値を超えた時刻がどのように計算されるか、式 4.1 に示す。

$$\begin{aligned} \text{信号が閾値を超えた時刻} &= \sum^{\text{ヒット数}} 1 \text{ イベントで測定された時刻} / \text{ヒット数} \\ &= \sum^{\text{ヒット数} - \text{時刻が 0 になってしまったイベント数}} 1 \text{ イベントで測定された時刻} / \text{ヒット数} \\ &= \frac{\text{ヒット数} - \text{時刻が 0 になってしまったイベント数}}{\text{ヒット数}} \times \text{真の信号が閾値を超えた時刻} \end{aligned} \quad (4.1)$$

ヒット数が小さくなるほど時刻が 0 と測定されたイベントの影響を受けやすくなってしまう。この効果が、図 4.5 のようにヒット数が減り始める 1503 e 付近の閾値で見え始めている。実際に、横軸ヒット数で縦軸を信号が閾値を超える時刻とした二次元ヒストグラムを図 4.12 に示す。

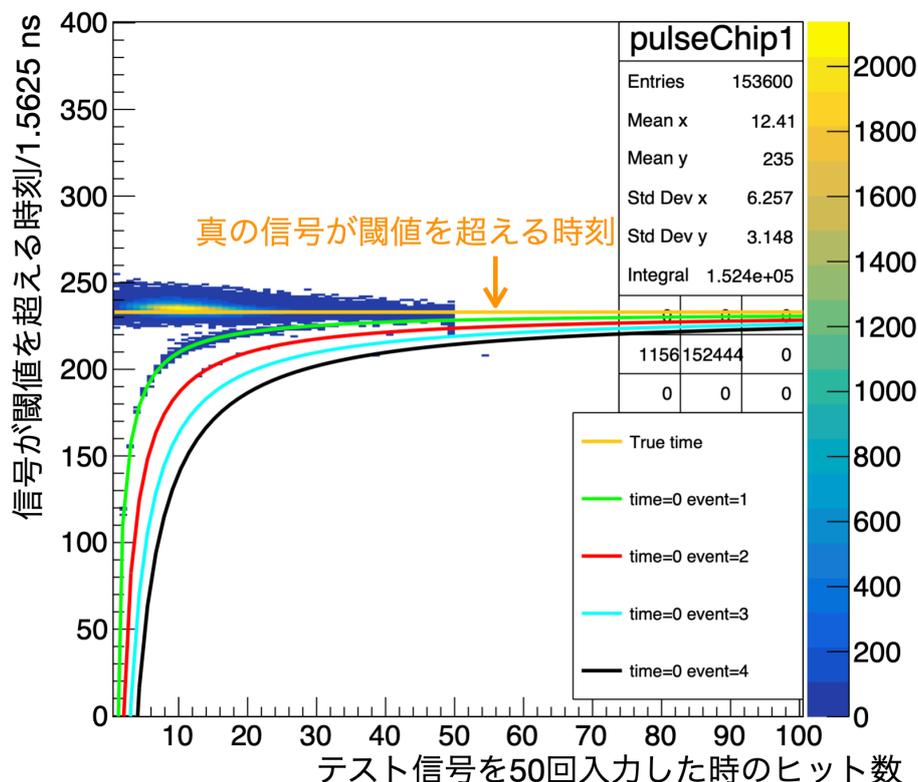


図 4.12: チップ 1 で閾値を 1597e とした時に 1503e の入力電荷を nsteps 5 で入力したときのデータで、横軸ヒット数で縦軸を信号が閾値を超える時刻とした二次元ヒストグラムにした図。オレンジの線が仮に決定した真の信号が閾値を超える時刻で、緑色、赤色、水色、黒色の線は、それぞれら信号が閾値を超える時刻が 0 になるイベントが 1、2、3、4 回発生した場合に計算される信号が閾値を超える時刻を示した線である。

この図はチップ 1 で閾値を 1597e とした時に 1503e の入力電荷を nsteps 5 で入力したときのデータを用いている。ヒット数が 50 を超えているイベントが存在しているが、これは今回の議論とは別の問題であるため無視して考える。図中のオレンジの線は真の信号が閾値を超える時刻の値として仮に決定した時間 ($233[\text{Time}/1.5625 \text{ ns}]$) である。そして、緑色、赤色、水色、黒色の線は、それぞれら信号が閾値を超える時刻が 0 になるイベントが 1、2、3、4 回発生した場合に計算される信号が閾値を超える時刻を示した線である。特に、緑色の線は多くのイベントと合致しており、他の線も含めるとピークになるべき領域（仮の真の信号が閾値を超える時刻付近）以外のほとんどのイベントをカバーしている。よって $\text{Time}/1.5625 \text{ ns}$ が 220 以下の領域のイベントの原因は、ヒットが存在するものの、信号が閾値を超える時刻と閾値超過時間が 0 になってしまったイベントによると結論づけた。

4.9.4 テスト信号の推定された波高と目標としていた入力電荷量の違い

4.6.2 節で示した、推定された波高とテスト信号の計算電荷量との乖離について考察する。まず、同時入力ピクセル数の違いによる効果を考える。同時入力ピクセル数が違うと、アナログ回路で変換・増幅された電圧信号の波高の変化により、閾値到達時刻測定で入力したテスト信号の計算電荷量と異なる電荷量と推定される。この効果は、閾値の調整と測定の同時入力ピクセル数と、閾値到達時刻測定時の同時入力ピクセル数を、同じにした時の波高を推定することで確認できるはずである。しかし、本研究ではこの検証はできていない。

次に、推定手法特有のバイアスについて考える。アナログ回路は、ピクセルに入力された信号の電荷量が閾値の相当する電荷量より大きくなるとヒットと判定する。図 4.5 で 2000e 付近の閾値でもヒットがあり閾値到達時間・閾値超過時間が測定されていた。これは、ノイズによって元々入力していた電荷量よりもピクセルに入力される信号の電荷量が大きくなり、閾値を超えることで起こる。このため、本来よりも高い閾値でのイベントが存在し、そのイベントによって推定波高が引き上げられるという効果があると考えられる。この効果を見積もることはできなかったが、本研究で用いたモジュールのノイズ量は、閾値測定した際の結果ではチップ 3、2、4、1 の順で大きい。推定された波高とテスト信号の入力電荷量の乖離の度合いは、チップ 3、2、1、4（チップ 1 と 4 はほぼおなじ）の順で大きいため、この効果は存在すると考えた。

第 5 章

閾値測定時のフィット手法の検討

この章では、3.2 節で述べた真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の乖離について、閾値測定時のフィット手法の観点から検討する。2.5 節で述べたとおり、閾値の測定では、複数種類の電荷量をピクセルのアナログ回路に入力し、得られるヒット数分布に対し相補誤差関数を用いた関数でフィットして閾値を得る。このフィット時の関数と誤差について調べる。YARR は、閾値、ノイズ量のフィット結果以外に、ヒット数分布もピクセルごとに保存するため、任意の関数でフィットし直すことができる。そこで、真の目標閾値を 996 e として閾値を調整したときのヒット数分布を別の誤差と関数、フィットのソフトウェアを用いてフィットし直す。

5.1 フィットの問題

閾値測定でのフィットの問題点をふたつ説明する。

まず、YARR 固有のフィットプログラムではヒット数分布のデータ点の誤差を 1 に固定する。ヒット数分布のデータ点には、本来式 5.1 で表される、二項分布から計算される誤差がつくはずである。 N_{inj} はテスト信号の入力回数、 p_{hit} はヒット率である。

$$\text{Binominal Error} = \sqrt{N_{inj}p_{hit}(1 - p_{hit})} \quad (5.1)$$

次に、フィットする時の関数である式 2.2 は、変数として閾値 Q_{th} とノイズ量 σ だけでなく、offset と injections も定義されている。本来、ヒット数の最小値は 0 回で、最大値はテスト信号の入力回数になるべきである。しかし、offset と injections によって、この最小値と最大値を変更することができる。

本章では、このふたつの問題点が閾値の測定結果にどのような影響を持つか確認し、3.2 節での真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の乖離を再現するのか検証したい。

ここで、YARR のフィットプログラムが、他に問題点を持つか確認するため、汎用解析ソフトウェアの ROOT[11] を用いて、実際に誤差を 1 に固定して YARR と全く同じ式 (式 2.2) を用いてフィットした。

この ROOT でフィットした結果の閾値と、YARR の出力した閾値との、ピクセルごとの差分分

布を図 5.1 に示す。

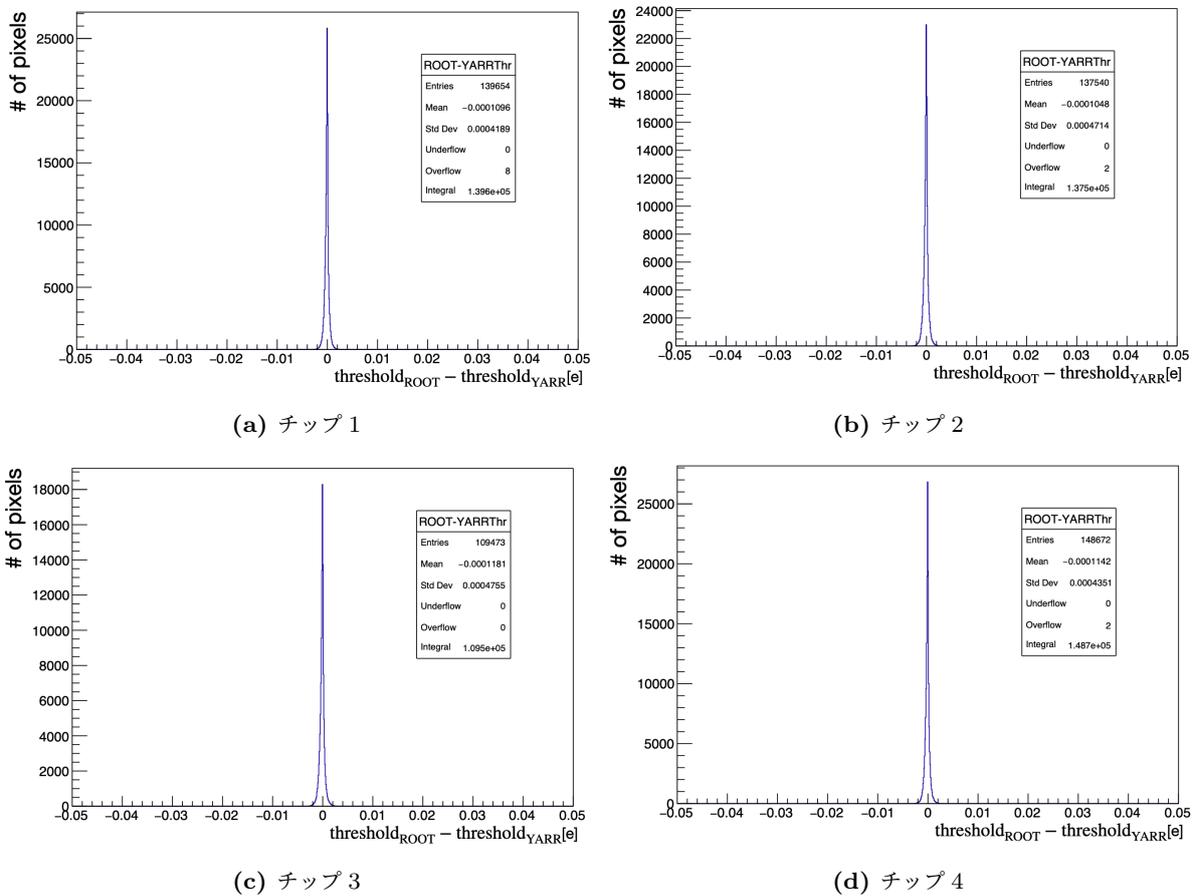


図 5.1: YARR と同じ式で、ROOT を用いて全ての測定点の誤差を 1 としてフィットした時のピクセルごとの閾値の差分分布。

なお、YARR で閾値が 0 と測定されているピクセルのデータは、フィットせず除外しているため、エントリーは全ピクセル数である 153600 に一致していない。また、ヒット率が 100% を超えるような異常値を持つピクセルは除外している。これらの除外したピクセルのデータは、以降のどの検証でも使用しない。ほとんどのピクセルは $0.002e$ 以内の差に収まっているが、全く同じ値の再現はできていない。この理由として、YARR 固有のフィットプログラムと ROOT のフィット手法の違いや、コンピュータ上での丸め込み誤差などが考えられる。しかし、3.2 節での真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の乖離は、 $10e$ 以上である。そのため、この YARR の出力する閾値と今回のフィット結果の差である $0.002e$ はこの乖離の原因ではない。

また、フィットしているピクセル数に対する、差分分布の範囲外にあるピクセルの割合は、最大でもチップ 1 の $8 \div 139654 \sim 5.73 \times 10^{-5}$ と非常に小さい。

よって、誤差の評価方法と、フィット関数以外の、YARR のフィットプログラムの問題が、3.2 節での真の目標閾値と測定された閾値分布のピーク値の乖離の原因ではない。

さらに、今回の結果から、ROOT を用いたフィットでも、YARR 固有のフィットプログラムの結果を再現でき、ほぼ同様の結果を出力できることがわかった。よって、以降の結果に示す YARR 固有のフィットプログラムの結果としては、ROOT で誤差を 1 に固定して YARR と全く同じ式を用いてフィットした結果を用いる。

5.2 二項分布の誤差でのフィット結果

5.1 節で述べたとおり、ヒット数は二項分布に従う誤差で評価するべきである。そのため、実際に二項分布に従う誤差を用いたフィットを ROOT で行い、5.1 節同様 YARR の出力した閾値、ノイズ量と比較する。また、ヒット数分布の最小値が 0 で最大値がテスト信号の入力回数である 50 で固定されるように、式 5.2 を定義し、フィットした。

$$Hit(Q_{inj}) = 50 - 25 \times \text{Erfc}\left(\frac{Q_{inj} - Q_{th}}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (5.2)$$

もし ROOT の出力した閾値が YARR の出力した閾値と差が出るのであれば、YARR のフィット関数あるいは誤差の評価に問題がある。あるピクセルのヒット数分布をフィットした結果を図 5.2 に示す。

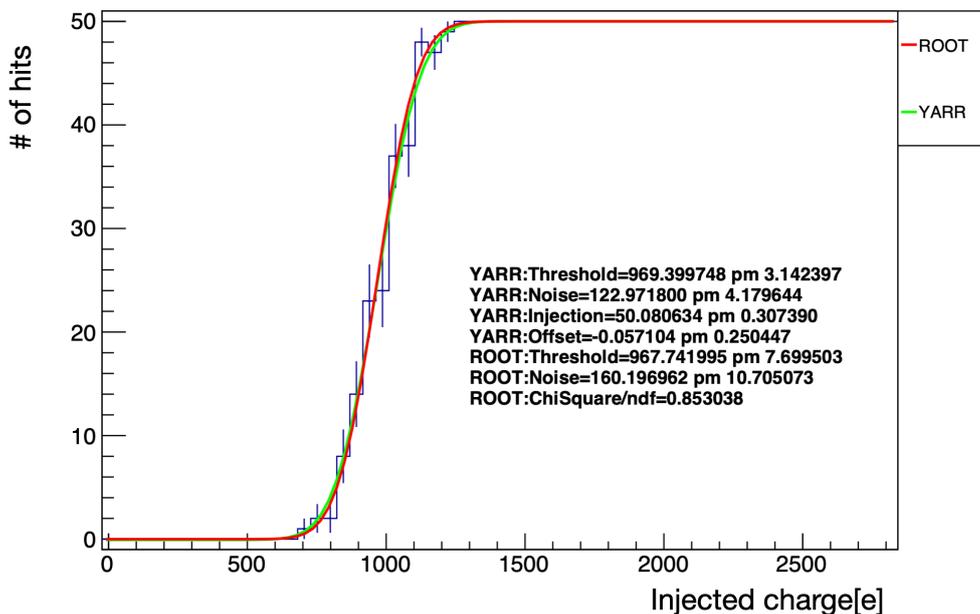


図 5.2: 1 ピクセルのヒット数分布に対して、新しく定義した関数で二項分布の誤差をつけてフィットした結果と、YARR の式で固定した誤差をつけてフィットした結果の比較図。赤線が今回フィットされた結果の関数であり、黄緑色の線が 5.1 節で YARR の出力を再現した ROOT のフィット結果の関数である。右中央に 5.1 節でフィットした結果 (YARR) と今回のフィットの結果 (ROOT) を載せた。閾値にはほぼ差がなく、ノイズ量に大きな差がある。

YARR の出力と二項分布の誤差で式 5.2 でのフィット結果の比較を表 5.1 に示す。

表 5.1: 図 5.2 における、YARR の出力と二項分布の誤差で新しく定義した式 5.2 でのフィット結果の比較

	YARR	二項分布かつ新しく定義した式
閾値 $Q_{th}[e]$	969.4	967.7
ノイズ量 $\sigma[e]$	123.0	160.2

閾値は $1.5e$ 程度と大きくは変化しないが、ノイズ量に約 $40e$ 以上の大きな差がある。このノイズ量の違いについては 5.4 節で考察する。また、今回のフィット結果の χ^2/ndf の値は 0.85 程度である。ROOT は、誤差が 0 の点をフィットに用いない。つまり、二項分布の誤差をつける場合、ヒット数が 0 、 50 回の点は、フィットに用いられない。そのため、この時の自由度は 10 になり、有意確率 60% であるので、妥当である。

次に、5.1 節の結果と今回のフィット結果の閾値のピクセルごとの、閾値分布の比較図を図 5.3 に、ピクセルごとの閾値の差分分布を図 5.4 に示す。閾値分布には、大きな差は見られない。また、閾値の差分は、ピクセルによっては $10e$ ほどずれることもあるが、 $0e$ を中心としている。

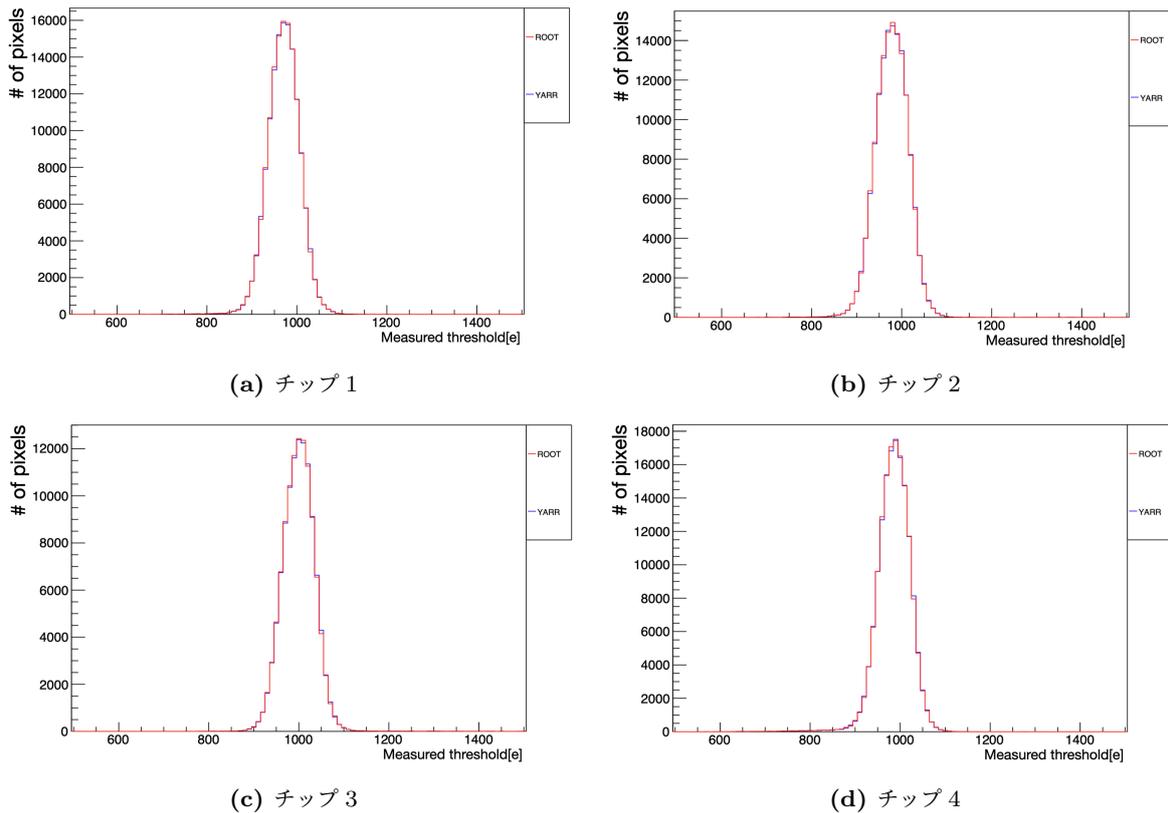
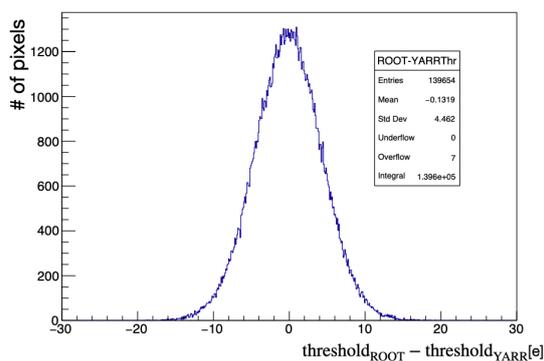
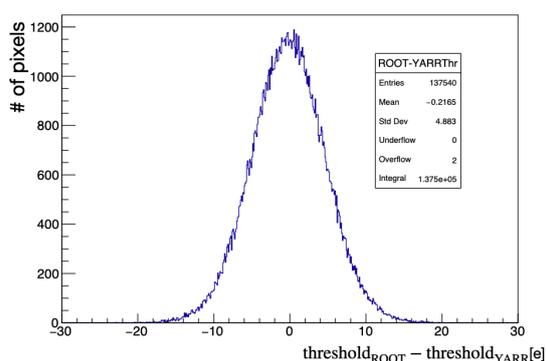


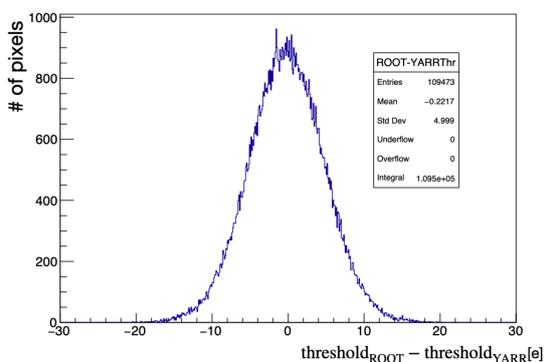
図 5.3: 5.1 節で計算した閾値の分布 (図中青線) と、式 5.2 で二項分布誤差をつけフィットした結果の閾値の分布 (図中赤線) の比較。



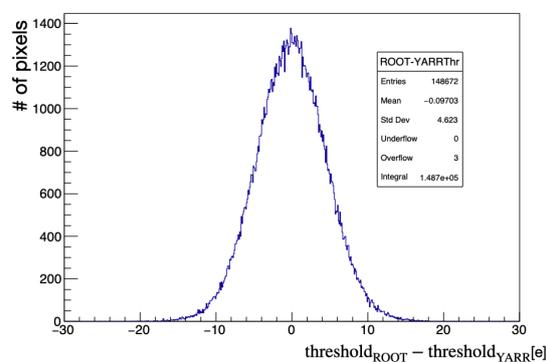
(a) チップ 1



(b) チップ 2



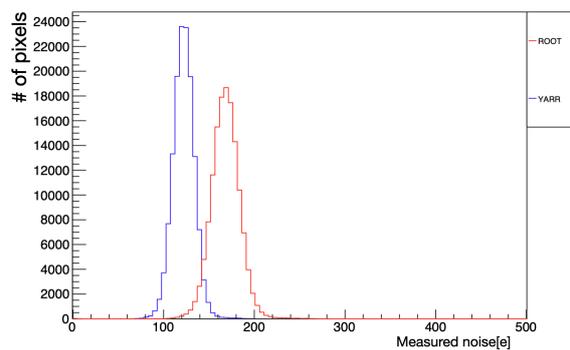
(c) チップ 3



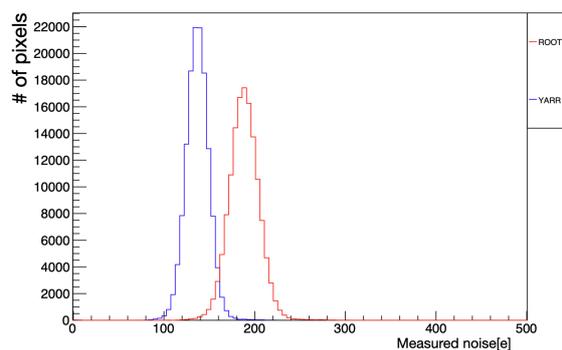
(d) チップ 4

図 5.4: 5.1 節の閾値と式 5.2 で二項分布誤差をつけフィットした結果の閾値のピクセルごとの差分。

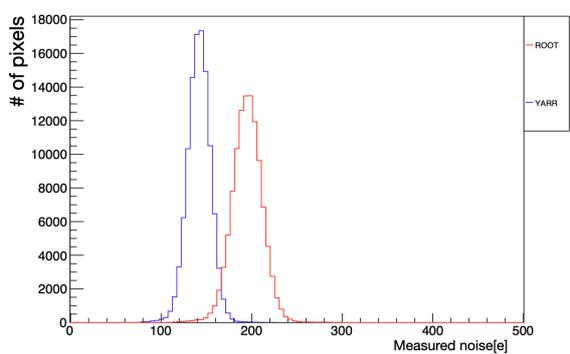
また、この時の式 5.2 のノイズ量 σ の分布の比較図を図 5.5 に、ピクセルごとのノイズ量の差分分布を図 5.6 に示す。図 5.2 で見られた傾向と同様、差分分布のピークから YARR で出力されたノイズ量に比べて 45~53e 程度大きく見積もられている。



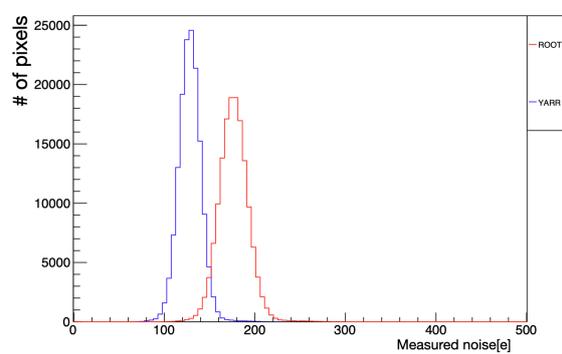
(a) チップ 1



(b) チップ 2

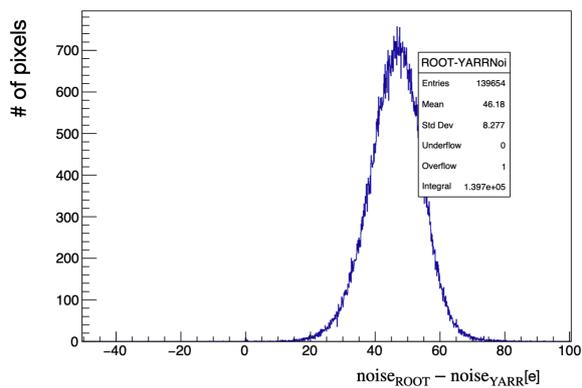


(c) チップ 3

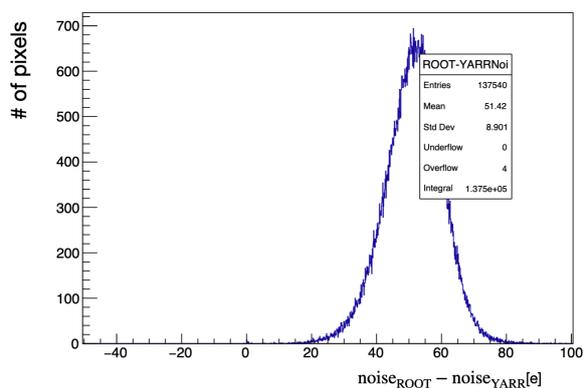


(d) チップ 4

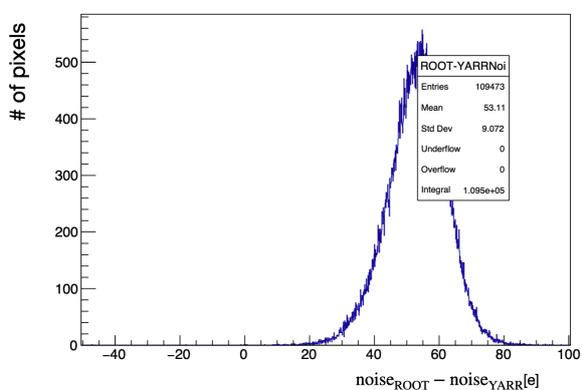
図 5.5: 5.1 節で計算したノイズ量の分布 (図中青線) と、式 5.2 で二項分布誤差をつけフィットした結果のノイズ量の分布 (図中赤線) の比較。



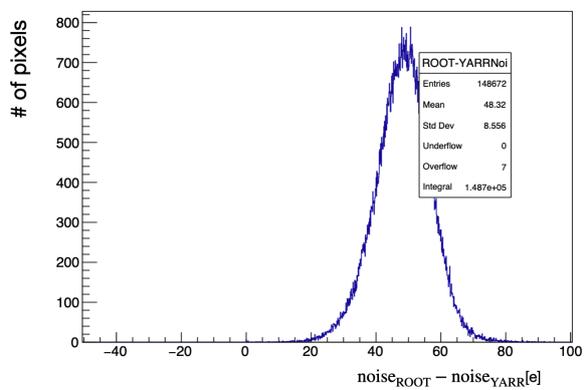
(a) チップ 1



(b) チップ 2



(c) チップ 3



(d) チップ 4

図 5.6: 5.1 節のノイズ量と式 5.2 で二項分布誤差をつけフィットした結果のノイズ量のピクセルごとの差分。

フィット関数や誤差に問題がないか確認したい。チップ 1 を例にして考える。チップ 1 における、二項分布の誤差をつけ式 5.2 を用いた、フィット時の自由度の分布を図 5.7 に示す。

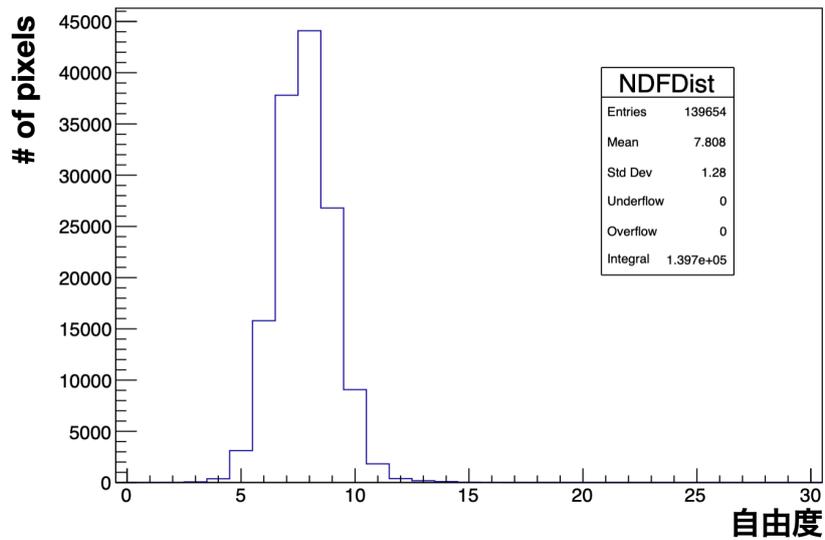
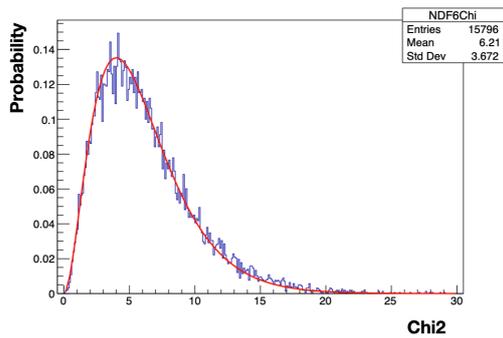
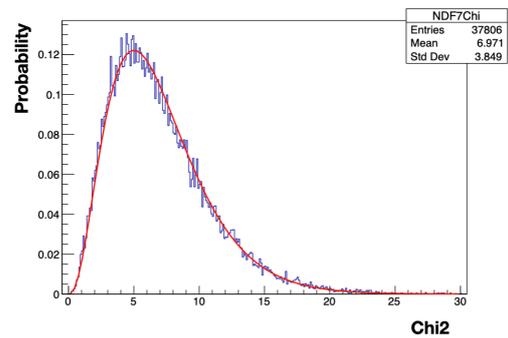


図 5.7: チップ 1 における、二項分布の誤差をつけ式 5.2 を用いた、フィット時の自由度の分布。

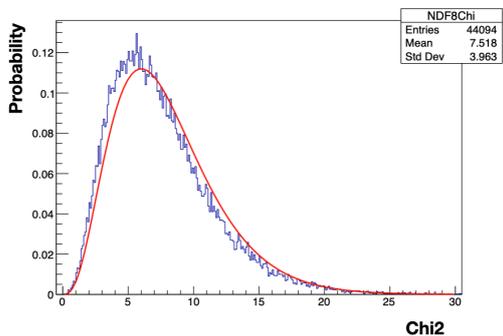
自由度が 6~9 が大部分を占め、全体の約 89% である。また、自由度が 6~9 のときそれぞれの χ^2 分布を図 5.8 に示す。自由度が 6、7 の時は理論曲線にほぼ一致しているが、自由度が 8、9 の時は分布のピークの χ^2 が理論曲線よりも小さい。したがって、フィット関数がヒット数分布に対してうまく合うかという観点で問題はないと考えた。



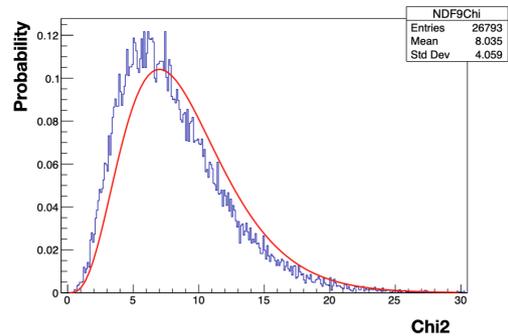
(a) 自由度=6



(b) 自由度=7



(c) 自由度=8



(d) 自由度=9

図 5.8: 式 5.2 に二項分布の誤差をつけた際の、各自由度ごとの χ^2 分布。図中赤線は、それぞれの自由度の際の χ^2 の理論曲線である。自由度が 6、7 の時は理論曲線にほぼ一致しているが、自由度が 8、9 の時は分布のピークの χ^2 が理論曲線よりも小さい。

また、フィット関数や誤差が、他の自由度でも問題がないか確認するため図 5.8 に χ^2 / ndf 分布を示す。それぞれのピーク値が 0.9 程度であり、図 5.8 の時と同様に理論的な予測よりも小さい傾向がある。

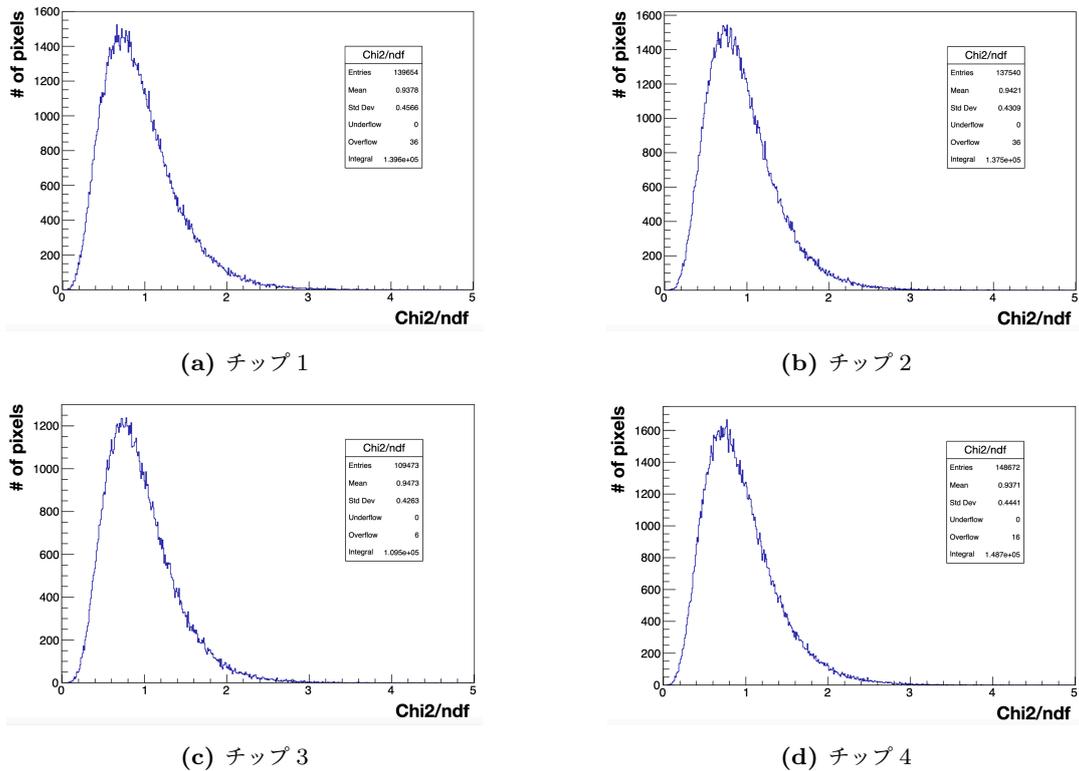


図 5.9: 式 5.2 に二項分布の誤差をつけた際の χ^2/ndf 分布。

5.3 フィット関数と誤差を変更した時に測定される閾値の結果

5.2 節で二項分布の誤差をつけて評価したが、YARR の出力する閾値との差分が大きいピクセルがあるものの、閾値分布にはほとんど影響がなかった。よって、少なくとも閾値測定のフィット時における、今回の誤差とフィット関数の変更は、目標閾値と閾値分布のピーク値の乖離の要因ではない。

その一方で、YARR の誤差を 1 に固定したフィットに比べて、ROOT の二項分布誤差フィットはノイズ量が大きくなることがわかった。これは次の節で考察する。

5.4 ノイズ量の増加に関する考察

5.3 節までで、検証した内容と検証できていない事項のまとめを、表 5.2 に示す。なお、YARR の式 (式 2.2) を YARR、今回新しく定義した式 (式 5.2) を New Func と書く。

表 5.2: 5.3 節までで、検証した内容と検証できていない事項のまとめ。✓ は検証済みを示す。

式の種類	YARR	New Func
固定した誤差	✓	未検証
二項分布誤差	未検証	✓

また、YARR の出力を基準としたときの、フィットで得たノイズ量の YARR の結果との差を表 5.3 に示す。

表 5.3: YARR の出力を基準としたときの、フィットで得たノイズ量の YARR の結果との差

式の種類	YARR	New Func
固定した誤差	0e	未検証
二項分布誤差	未検証	+46e

5.2 節で、YARR でのフィットからの変更点は、誤差の評価方法とフィットしている関数の変数である。原因がどちらにあるか確認するため、表 5.2 における未検証の項目それぞれのノイズ量を評価する。

1. YARR の関数である式 2.2 に二項分布誤差をつける。(5.4.1 節)
2. New Func の式 5.2 に固定した誤差 1 をつける。(5.4.2 節)

なお、全てのチップで同様にノイズ量が増えていることから共通の原因と考え、以降ではチップ 1 の結果のみを示す。

さらに、それぞれのノイズ量を表 5.4 のような変数で定義する。

表 5.4: ノイズ量の表し方の定義。

式の種類	YARR	New Func
固定した誤差	σ_{Fix}^{YARR}	σ_{Fix}^{New}
二項分布誤差	σ_{Bin}^{YARR}	σ_{Bin}^{New}

5.4.1 YARR の関数に二項分布の誤差をつける

YARR の式と二項分布の誤差を用いてフィットして、 σ_{Bin}^{YARR} を得た。 σ_{Fix}^{YARR} と σ_{Bin}^{YARR} のノイズ分布の比較を図 5.10 に、差分分布を図 5.11 に示す。

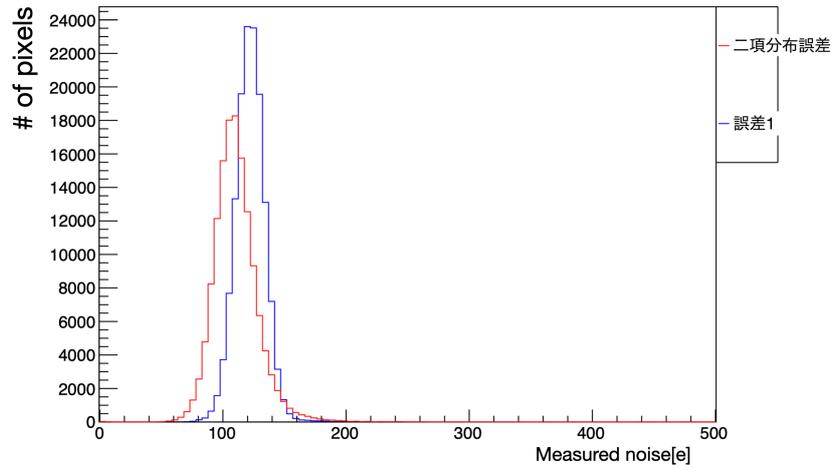


図 5.10: YARR の関数を用いて誤差を変更した。その際の、 σ_{Fix}^{YARR} と σ_{Bin}^{YARR} の分布。赤が σ_{Bin}^{YARR} 。青が σ_{Fix}^{YARR} である。

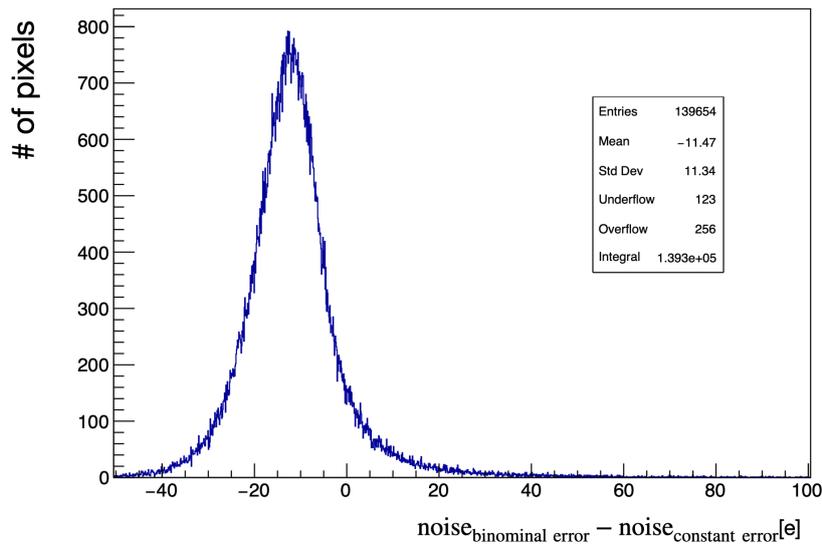


図 5.11: YARR の関数を用いて誤差を変更した。その際の、 $\sigma_{Bin}^{YARR} - \sigma_{Fix}^{YARR}$ の差分分布。

差分分布のピーク値では、 σ_{Bin}^{YARR} の方が、 σ_{Fix}^{YARR} よりも約 11e 小さい。二項分布の誤差を用いることによって、ノイズ量は増加しなかったため、 σ_{Fix}^{YARR} と σ_{Bin}^{New} の差の原因は、誤差の評価方法ではない。

また、この時のノイズ量の差分のピーク値を追加した表 5.3 を表 5.5 に示す。

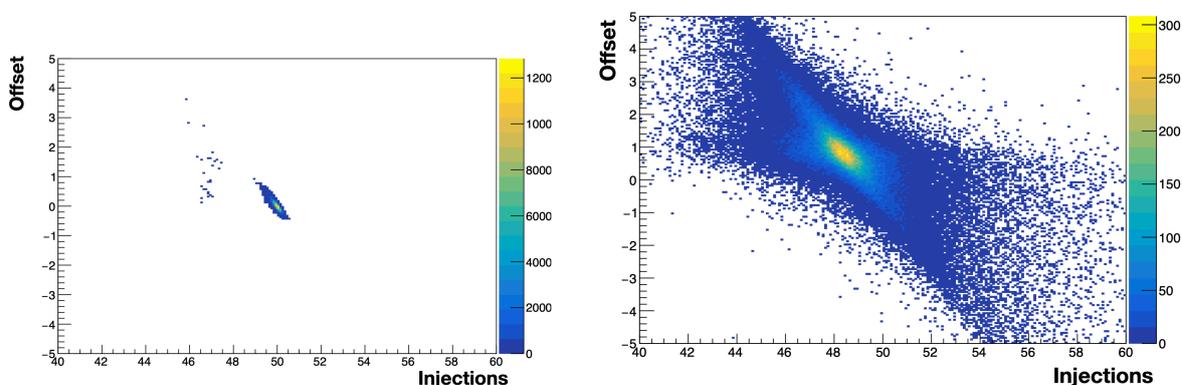
表 5.5: YARR の出力を基準としたときの、フィットで得たノイズ量の YARR の結果との差

式の種類	YARR	New Func
固定した誤差	0 e	未測定
二項分布誤差	-11.5 e	+46 e

σ_{Bin}^{YARR} と σ_{Fix}^{YARR} の違いには、ふたつの原因があると考えられる。まず、ROOT では誤差が 0 の点はフィット時に無視することである。このとき σ_{Fix}^{YARR} の計算では影響を及ぼしていたヒット数 0、50 の点の誤差が 0 になり、 σ_{Bin}^{YARR} では影響せず、式 2.2 の offset や injections を変更しやすくなる。

次に、二項分布の誤差では、データ点のヒット数によって異なる誤差がつくことである。 σ_{Bin}^{YARR} の計算時は、ヒット数がテスト信号の入力回数の半分である時の誤差が最も大きい。つまり、式 2.2 の、立ち上がり時の傾きへの誤差による制限が弱い。この時、ヒット数がテスト信号の入力回数の半分である時以外のデータ点にさえあうようにすれば、十分フィットがあうはずである。すると、ヒット数の最小値を 0 回、最大値を 50 回に制限する必要もないため、injections と offset を大きく変更しやすくなる。

すると、フィット時に最小化する χ^2 値が小さくなるように、injections と offset を変更しやすくなる。実際に injections と offset がどの程度の範囲の数値なのか 2 次元ヒストグラムにしたものを図 5.12 に示す。



(a) 固定した誤差でフィットしたときの offset と injections の相関。(b) 二項分布誤差でフィットしたときの offset と injections の相関。

図 5.12: 式 2.2 の injections と offset の二次元ヒストグラム。左が固定誤差でのヒストグラムで右が二項分布誤差のヒストグラムである。

図 5.12a が σ_{Fix}^{YARR} の計算時の結果、図 5.12b が σ_{Bin}^{YARR} の計算時の結果である。誤差を固定した場合に比べ、二項分布の誤差の場合、injections と offset が大きく変化する。

5.4.2 新しく定義した関数に固定した誤差 1 をつける

New Func の式と固定した誤差 1 を用いてフィットして、 σ_{Con}^{New} を得た。 σ_{Fix}^{New} と σ_{Bin}^{New} のノイズ分布の比較を図 5.13 に、差分分布を図 5.14 に示す。

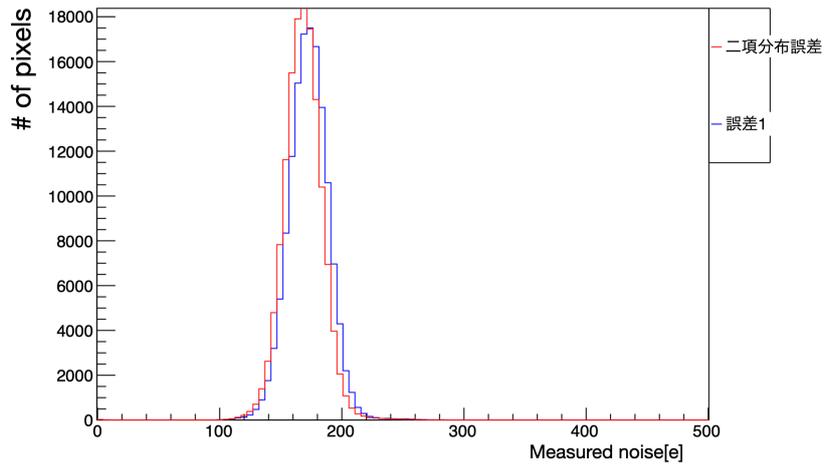


図 5.13: σ_{Fix}^{New} と σ_{Bin}^{New} それぞれのノイズ量分布。赤が σ_{Bin}^{New} 。青が σ_{Fix}^{New} である。

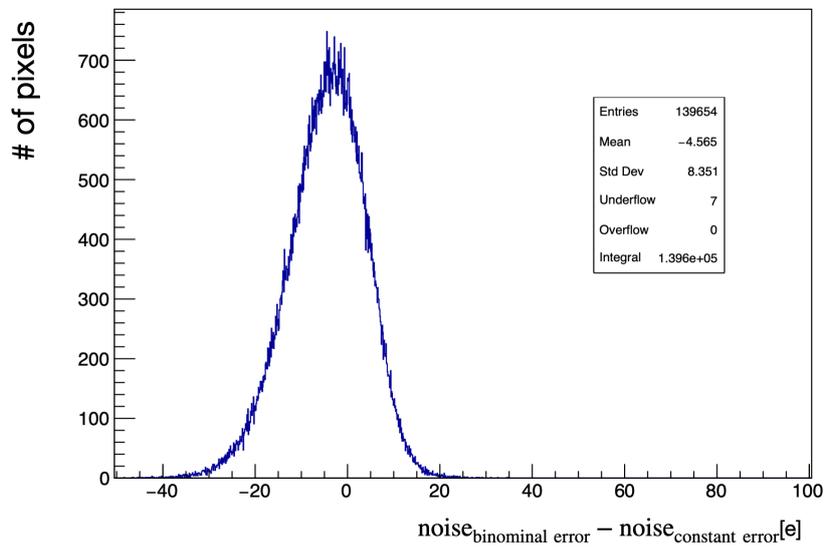


図 5.14: $\sigma_{Bin}^{New} - \sigma_{Fix}^{New}$ の差分分布。

差分分布のピーク値では、 σ_{Bin}^{New} の方が、 σ_{Fix}^{New} よりも約 $4.6e$ 小さい。

5.4.3 まとめ

本節の結果を表 5.3 に追加した表を、表 5.6 に示す。

表 5.6: YARR の出力を基準としたときの、フィットで得たノイズ量の YARR の結果との差

式の種類	YARR	New Func
固定した誤差	0 e	+50 e
二項分布誤差	-11.5 e	+46 e

よって式の変更がノイズ量を増加させたといえる。つまり、injections と offset を変更できると、フィットされるノイズ量が小さくなる。

しかし、実際の ASIC におけるノイズ量に相当する絶対電荷量が、式 2.2 と式 5.2 のどちらでフィットした方が正しいのかは判定できなかった。

第 6 章

結論

高輝度 LHC に向けた ATLAS 実験の新型ピクセル検出器用に開発された検出器モジュールでは、搭載された ASIC 内部で生成されるテスト信号を用いて、閾値が目標閾値となるように ASIC の設定を変更し、その閾値を測定する。

実際に閾値を調整し測定したところ以下の二つの問題点がわかった。

1. 閾値の測定値が目標とする閾値よりも小さくなってしまう。
2. ASIC 内部で同時にテスト信号を入力するピクセル数を変更すると、同じ閾値になるはずの設定でも測定される閾値が変化する。

1. については、閾値測定に使うデータをフィットする関数とデータへの誤差を変えても閾値に変化がなく、他に原因がある。

2. については、同時にテスト信号を入力するピクセル数が増えると、アナログ回路の出力の波高が小さくなることがわかった。したがって、現在の同時にテスト信号を入力するピクセル数では目標閾値に正しく調整できないため、同時にテスト信号を入力するピクセル数を 20 ピクセル以下にすることを提案した。

謝辞

研究室に所属してから、大学院博士前期課程を終えるまで、非常に多くの方にお世話になりました。

山中卓教授には、研究・勉強のために素晴らしい環境を提供していただきました。また、研究活動の中で多くのご指導をしていただきました。素粒子実験に関する指導はもちろん、研究発表やその際の資料作成の方法、研究者としての考え方などを学ぶことができました。その他にも、研究室内外での何気ない会話でも、多くの有益な情報を教えていただきました。

南條創准教授には、本論文の執筆にあたって多くのご指導をしていただきました。ASIC 内部の回路動作などの間違えていた認識や、曖昧な理解にだった内容を丁寧に教えていただきました。研究と論文執筆の進捗で大変ご迷惑をおかけしました。それでもご多忙の中、時間を割いて丁寧に指導していただいたことを心から感謝しております。

廣瀬穰助教には、学部生のときから3年間大変お世話になりました。研究については、実験に関する基礎知識や ATLAS 実験に関すること、ソフトウェア・ハードウェアに関する知識などを、丁寧に指導していただきました。本論文で実施した、テスト信号の波高推定手法も一緒に考えていただきました。さらに、研究に関する相談の合間に、emacs や PC の自作についてなど、私の興味のある内容についても多くのことを教えていただきました。今私がこの文を emacs で書くことができ、研究室に所属している3年の間にPCを自作できたのは、間違いなくあの教えのおかげです。

KEK 素核研の外川学准教授、中村浩二助教、生出秀行助教には検出器モジュール自身やその動作環境に関して多くのご指導をしていただきました。また KEK への出張時も、様々な情報の提供や、必要なものの手配などご助力いただきました。

東京工業大学の鈴木敦博さん、橋本純平さんとは、KEK での検出器モジュールの動作環境の構築時に、多くの問題に対して一緒に取り組みました。ひとりでは不可能だったであろう期間で問題を解決できたのは、お二人のおかげです。

ローレンス・バークレー研究所の Timon Heim 氏には ASIC とその内部でのテスト信号について、多くの助言をいただきました。

筑波大学の比江森友太さんには、検出器モジュールを動作させた際の挙動に関して様々なことを教えていただきました。また、本研究で用いた検出器モジュールのテスト動作も前もって確認してくださいました。

大阪大学 ATLAS 実験グループの先輩である Lakmin Wickremasinghe さんには、学部生の頃

から研究に関するだけでなく、KEK や CERN の話など、様々なことを教えていただきました。本研究で検出器モジュールの動作について相談しても、お忙しい中疑問について考えていただきました。

山中卓研究室に同期で配属され、ATLAS 実験グループの同期でもあった藤田侑葵子さんには、研究の際に様々な助言をいただき、質問にも快く答えていただきました。KOTO 実験に配属された同期の小野啓太さんと北川歩さんとは、実験が違うものの、頻繁に色々な話で盛り上がりました。本論文を執筆できたのは、同期の方々が頑張っている姿を見て、刺激を受けたからだと思います。

大阪大学 ATLAS 実験グループの後輩である荒木田陸斗さん、久郷莉奈さんには、検出器モジュールを優先して使用できるように調整していただきました。

山中卓研究室 KOTO 実験の小寺克茂さん、白石諒太さん、柴田哲平さん、川田悠統さんとは、研究の日々の中で様々な話で盛り上がり、楽しく過ごすことができました。川田悠統さんは、私の本論文を完成できるよう願掛けもしてくれました。

学部 4 年生の安藤彰洋さんと着本壮人さんが、研究室内でゼミを実施し、実験室で研究に打ち込む姿はとても刺激になりました。

秘書の藤阪千衣さんと前田純子さんには、研究で必要になる様々な手続きで大変お世話になりました。

そして、生活面でサポートしてくれた家族には大変感謝しています。また、書ききれなかった全ての方にも感謝いたします。本当に、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Philippe Mouche, <https://cds.cern.ch/record/1708847?ln=en>, 2014.
- [2] The ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, 2008.
- [3] The current inner detector,
<https://atlas.cern/discover/detector/inner-detector>.
- [4] 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評価,
https://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/theses/master/2021/MasterThesis2021_Iwata.pdf,
2022.
- [5] Lakmin Vindula Bandara Wickremasinghe, Development and performance evaluation of the DAQ system used for testing new ATLAS pixel modules for the HL-LHC,
https://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/theses/master/2020/MasterThesis2020_Lakmin.pdf,
2021.
- [6] Particle Data Group, <https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/rpp2022-rev-passage-particles-matter.pdf>.
- [7] Yet Another Rapid Readout, <https://gitlab.cern.ch/YARR/YARR>.
- [8] The ATLAS Collaboration, RD53B(ASIC) manual, https://gitlab.cern.ch/rd53/RD53B_Manual/-/jobs/26952323/artifacts/file/RD53B_ATLAS_Main.pdf.
- [9] 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, https://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/theses/master/2019/MasterThesis2019_Yamagaya.pdf, 2020.
- [10] LBNL, https://indico.cern.ch/event/956613/contributions/4020579/attachments/2113114/3554726/2020_09_30_rd53b_testing_meeting_dantrimPDF.pdf.
- [11] ROOT, <https://root.cern/>.