

修士論文

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

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

荒木田 陸斗

2024年3月26日

概要

ATLAS 実験はスイス・ジュネーブ郊外に建設された陽子・陽子衝突型加速器 Large Hadron Collider (LHC) を用いて行われる。この実験はヒッグス粒子の性質の精密測定や素粒子物理学の標準模型を超える新物理の発見を目指している。この研究の更なる発展のために、2029 年から陽子ビームの輝度を上げる高輝度 LHC(High Luminosity LHC、HL-LHC) が始まる。

高輝度 LHC に向けて、高い粒子生成率や放射線量に耐えられるように、ATLAS 検出器最内層のピクセル検出器をアップグレードする。アップグレードされたピクセル検出器で使う検出器モジュール (ピクセルモジュール) には信号生成用のシリコンセンサーと信号読み出し用の ASIC がある。シリコンセンサー上にはピクセル電極が格子状に配置されている。センサー上の各電極と ASIC はバンプと呼ばれる半田球により電氣的に接続されている。

ところで、センサー-ASIC 間が切断されているピクセルからは信号を読み出せない。このような不良なピクセルを見つけるために、X 線をピクセルモジュールに照射してヒット信号を検出する試験が提案された。本研究では、この試験で不良なピクセルを正確に判別するために必要な測定条件を調べた。また、この試験の結果を用いて X 線を用いない不良ピクセル判定手法の正確性を評価した。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	高輝度 LHC ATLAS 実験	1
1.1.1	ATLAS 検出器	2
1.1.2	内部飛跡検出器	2
1.2	ピクセル検出器	2
1.3	X 線ヒット信号を用いた不良ピクセル判定	3
1.3.1	X 線試験	4
1.3.2	先行研究	5
1.4	本研究の目的	5
第 2 章	X 線試験の方法	6
2.1	X 線照射システム	6
2.2	閾値の設定	7
2.3	データの読出し	8
2.4	X 線試験の結果	9
2.5	X 線試験の正確性に関する懸念	11
第 3 章	偽接続の評価	12
3.1	偽接続が発生する確率に対する要求	12
3.2	ノイズによる偽接続の評価	12
3.3	データ化けによる偽接続の評価	13
3.4	ノイズとデータ化けによる偽接続の評価	14
3.5	偽接続評価の結論	16
第 4 章	偽切断の評価	17
4.1	偽切断が発生する確率に対する要求	17
4.2	不良ピクセル判定に必要なヒット数の期待値	17
4.3	不良ピクセル判定に必要な測定時間の見積もり	17

4.3.1	見積もり方法	18
4.3.2	結果	20
第 5 章	X 線を用いない不良ピクセル判定手法の正確性の検証	23
5.1	X 線を用いない不良ピクセル判定手法	23
5.1.1	低ノイズを用いた手法	23
5.1.2	クロストークを用いた手法	25
5.2	不良ピクセル判定の手法間の比較	25
5.2.1	X 線試験のみ不良と判定する場合	26
5.2.2	クロストークを用いた手法のみ不良と判定する場合	26
5.2.3	低ノイズを用いた手法のみ不良と判定する場合	29
5.2.4	低ノイズを用いた手法のみ正常と判定する場合	30
5.3	結果	31
第 6 章	議論	32
6.1	偽接続評価に関する議論	32
6.2	X 線試験における必要試験時間のばらつきに関する議論	34
6.3	量産における X 線試験	36
第 7 章	結論	38
	謝辞	39
	参考文献	41
付録 A	データ化けによる偽のヒットとデータ転送量の関係	42
付録 B	偽接続の評価に用いた各データにおけるフィットの結果	44
付録 C	モジュールの位置精度が X 線ヒット事象数に与える影響	54

目次

1.1	LHC の概略図 [1]。	1
1.2	ATLAS 検出器 [2]。	2
1.3	内部飛跡検出器 [3]。	3
1.4	ピクセルモジュール [4]。	4
1.5	ピクセルモジュールの原理 [4]。	4
1.6	図 1.4 に示すピクセルモジュールをフレキシブル PCB の真上から見たときの ASIC の配置と 1 枚の ASIC 上でのピクセルの配置 [4]。	4
2.1	X 線のエネルギースペクトル [5]。	7
2.2	X 線照射システムの概要図。	7
2.3	閾値の分布の一例。1e は素電荷である。	8
2.4	データの読出し用セットアップ。ピクセルモジュールは外部電源と接続されている。ピクセルモジュールと PC との間のデータの送受信は FPGA を経由して行われる。	9
2.5	ASIC でトリガーを受け取ってからヒット情報を送るまでの流れ。ASIC ではトリガー信号を受け取ると、25 ns の間に電荷信号が閾値を超えたかどうかを調べる。この操作を 32 回繰り返す。その際に得られたヒットの情報を PC に送る。	9
2.6	ピクセル毎のヒット事象数を示す二次元マップ。50 kHz のトリガーレートで 150 s 測定したときの結果である。行と列は図 1.6 で定義した向きである。行方向と列方向のビンの数はそれぞれ 800 と 768 であり、ASIC におけるピクセルの配置に対応する。	10
2.7	X 線を遮蔽する部品とピクセルモジュールの位置関係。	11
2.8	温湿度センサーと金属ばね。温湿度センサーは Sensirion の SHT85[7] である。	11
2.9	ピクセルモジュールに蓋を載せたときの様子。	11
3.1	“基準 X 線試験” において偽接続を引き起こすヒット数の期待値の分布。	14

3.2	“基準 X 線試験”において、偽接続を起こすピクセル数の期待値の分布。	14
3.3	本研究でディセイブルにしたピクセル領域。薄い青で覆われた範囲にあるピクセルをディセイブルにした。	15
3.4	ディセイブルにしたピクセル領域において、ヒットがあったピクセルでのヒット数の分布。	15
4.1	期待値 mean のポアソン分布 $P(n)$ において $n < 10$ となる確率。横軸にポアソン分布の期待値、縦軸に $n < 10$ となる確率を示す。	18
4.2	375s の X 線試験を行った際に得られたヒット数の二次元マップ。最小期待値の導出に使ったピクセル範囲を黒で囲んだ。	19
4.3	図 4.2 において、ヒット事象数が 100 未満のピクセル。最小期待値の導出に使ったピクセル範囲を黒で囲んだ。	19
4.4	図 4.2 におけるヒット数の最小期待値を導出する際に選んだピクセル領域におけるヒット数の分布をポアソン分布でフィットした結果。フィットパラメータ p_0 、 p_1 はそれぞれポアソン分布の期待値とコンスタントである。従って、最小期待値は 38.5 ± 0.3 である。	20
4.5	データ番号別の必要試験時間。	21
4.6	X 線試験における必要試験時間の分布。	22
4.7	“基準 X 線試験”におけるヒット数の最小期待値の分布。	22
5.1	1 枚の chip における全てのピクセルのノイズの分布の例。	24
5.2	ASIC 単体でのノイズの分布の例 [9]。	24
5.3	ピクセル間のクロストーク信号の流れ。	25
5.4	クロストークを用いた手法のみ不良判定したピクセルにおけるノイズとクロストーク事象数の相関。	27
5.5	クロストークを用いた手法のみ不良判定したピクセルにおける閾値とクロストーク事象数の相関。	27
5.6	低ノイズを用いた手法のみ不良と判定したピクセルにおけるノイズ分布の例。“低ノイズ”の範囲の上限 $81.1e$ 側に偏っており、ノイズが低い方にテイルが伸びている。	29
5.7	低ノイズを用いた手法のみ不良と判定したピクセルに隣接する全ピクセルの内“低ノイズ”のピクセルの数の分布。	30
5.8	低ノイズを用いた手法のみ不良と判定したピクセルのセンサー上での位置。	30
5.9	低ノイズを用いた手法のみ正常と判定したピクセルにおけるノイズの分布の例。ノイズは全て“低ノイズ”の範囲内 ($18.2e, 81.1e$) にある。	31

6.1	“基準 X 線試験”において、閾値が 1500e の場合にガウスノイズ由来のヒットが起こる回数の期待値。	33
6.2	閾値をかける操作 1 回当たりのヒットの確率の実測値 (P_{meas}) と予想値 (P_{exp}) の相関。	33
6.3	ノイズレートの分布	34
6.4	閾値とヒット数の相関	35
6.5	閾値をかける操作を行った回数 (N_e) に対するイベント数 (N_r) の割合を chip1 について求めた結果。他の chip についても概ね同じ結果を示した。	36
6.6	ヒットの確率が 4×10^{-6} 未満のピクセル。センサーの隅付近に集まったピクセルでは、X 線の中心から離れているためにヒット数が減った。黒で囲んだ部分を異なる必要試験時間をもつデータ間で比較すると、隅に現れるピクセル領域のサイズが異なる様子を確認できる。左下の部分には最小期待値を見積もる際に用いたピクセル領域がある。この領域を薄い橙で囲んだ。	37
6.7	ピクセルモジュールの生産過程。	37
A.1	1 回のトリガーあたりの偽のヒット事象数。異なる凡例は異なる管電流に対応する。	43
B.1	データ番号 1 でのフィットの結果。	44
B.2	データ番号 2 でのフィットの結果。	45
B.3	データ番号 3 でのフィットの結果。	45
B.4	データ番号 4 でのフィットの結果。	46
B.5	データ番号 5 でのフィットの結果。	46
B.6	データ番号 6 でのフィットの結果。	47
B.7	データ番号 7 でのフィットの結果。	47
B.8	データ番号 8 でのフィットの結果。	48
B.9	データ番号 9 でのフィットの結果。	48
B.10	データ番号 10 でのフィットの結果。	49
B.11	データ番号 11 でのフィットの結果。	49
B.12	データ番号 12 でのフィットの結果。	50
B.13	データ番号 13 でのフィットの結果。	50
B.14	データ番号 14 でのフィットの結果。	51
B.15	データ番号 15 でのフィットの結果。	51
B.16	データ番号 16 でのフィットの結果。	52
B.17	データ番号 17 でのフィットの結果。	52

B.18	データ番号 18 でのフィットの結果。	53
C.1	データ番号 1 での様子。この場合の必要試験時間は 183.9 s である。	54
C.2	データ番号 2 での様子。この場合の必要試験時間は 244 s である。	55
C.3	データ番号 3 での様子。この場合の必要試験時間は 147.2 s である。	55
C.4	データ番号 4 での様子。この場合の必要試験時間は 263 s である。	56
C.5	データ番号 5 での様子。この場合の必要試験時間は 216.2 s である。	56
C.6	データ番号 6 での様子。この場合の必要試験時間は 272 s である。	57
C.7	データ番号 7 での様子。この場合の必要試験時間は 208 s である。	57
C.8	データ番号 8 での様子。この場合の必要試験時間は 197.1 s である。	58
C.9	データ番号 9 での様子。この場合の必要試験時間は 264 s である。	58
C.10	データ番号 10 での様子。この場合の必要試験時間は 283 s である。	59
C.11	データ番号 11 での様子。この場合の必要試験時間は 261 s である。	59
C.12	データ番号 12 での様子。この場合の必要試験時間は 282 s である。	60
C.13	データ番号 13 での様子。この場合の必要試験時間は 168.8 s である。	60
C.14	データ番号 14 での様子。この場合の必要試験時間は 253 s である。	61
C.15	データ番号 15 での様子。この場合の必要試験時間は 162.9 s である。	61
C.16	データ番号 16 での様子。この場合の必要試験時間は 174.3 s である。	62
C.17	データ番号 17 での様子。この場合の必要試験時間は 172.2 s である。	62
C.18	データ番号 18 での様子。この場合の必要試験時間は 177.9 s である。	63

表目次

4.1	各データにおけるデータ番号、基準試験時間、最小期待値、必要試験時間。	21
5.1	X線試験のみ不良と判定したピクセルにおけるノイズ、クロストーク事象数。	26
5.2	クロストークを用いた手法のみ不良と判定したピクセルにおけるノイズ、クロストーク事象数、閾値。	28

第 1 章

序論

1.1 高輝度 LHC ATLAS 実験

Large Hadron Collider (LHC) はスイス・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世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突型加速器である。陽子・陽子衝突の重心系エネルギーは 2022 年に 13.6 TeV になった。また、瞬間輝度は最高で $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ になった。LHC には図 1.1 に示すように 4 つの陽子・陽子衝突点に検出器がある。その一つが ATLAS 検出器であり、**A Troidal LHC ApparatuS** (ATLAS) 実験で使われる。ATLAS 実験の目的は、ヒッグス粒子の性質の精密測定や標準理論の枠組みを超える新たな物理の発見等である。これらの目的のため、2029 年以降輝度を上げた陽子ビームを使う高輝度 LHC ATLAS 実験が計画されている。高輝度 LHC ATLAS 実験では陽子・陽子衝突で発生する粒子のレートの増加のため、信号読み出し速度と放射線耐性を向上させた内部飛跡検出器を用いる。

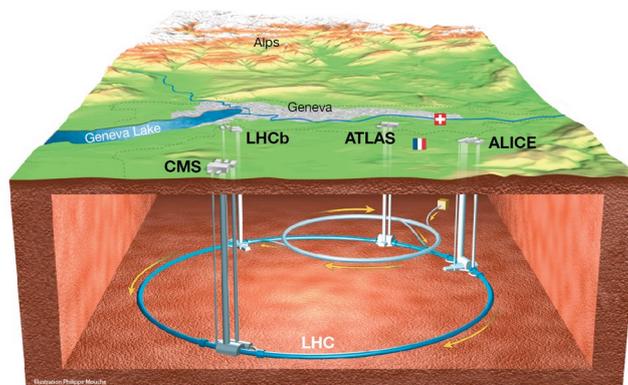


図 1.1: LHC の概略図 [1]。

1.1.1 ATLAS 検出器

図 1.2 は ATLAS 検出器の構造である。この検出器は長さ 44 m、直径 25 m の円筒形である。ATLAS 検出器は様々な検出器で構成される。1.1.2 節で、本研究に関連する内部飛跡検出器のみ説明する。

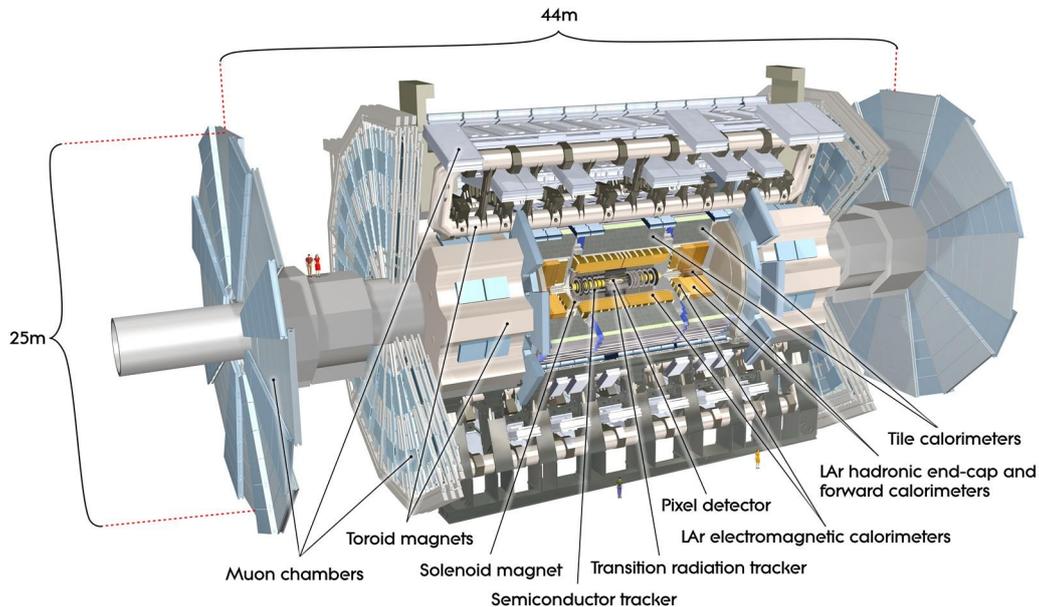


図 1.2: ATLAS 検出器 [2]。

1.1.2 内部飛跡検出器

ATLAS 検出器最内層に内部飛跡検出器がある。高輝度 LHC におけるこの検出器の構造を図 1.3 に示す。この検出器は長さ 6.2 m、直径 2.1 m の円筒形である。陽子・陽子衝突点に近い順にシリコンピクセル検出器 (以下単に「ピクセル検出器」と呼ぶ)、シリコンストリップ検出器がある。内部飛跡検出器の領域には外部のソレノイド電磁石による磁場がある。この磁場により、陽子・陽子衝突点からの荷電粒子の軌道が曲げられる。内部飛跡検出器を用いてこの飛跡を再構成し、荷電粒子の運動量を測定する。

1.2 ピクセル検出器

ピクセル検出器は約 1 万台の検出器モジュールで構成される。図 1.4 にこの検出器モジュール (以下、「ピクセルモジュール」と呼ぶ) の構造を示す。ピクセルモジュールは、デー

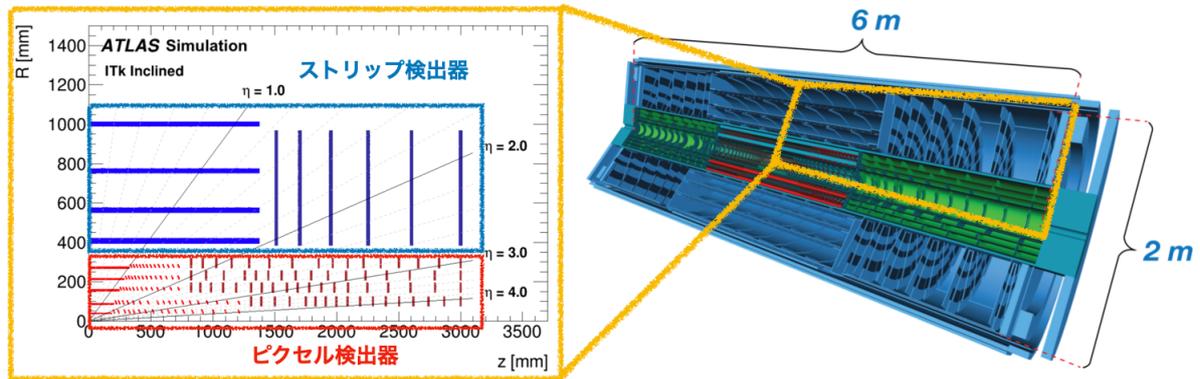


図 1.3: 内部飛跡検出器 [3]。

タ送受信用のフレキシブルプリント基板 (以下、「フレキシブル PCB」と呼ぶ)、荷電粒子を検出し信号を出す 4 cm 角のシリコンセンサー、信号処理用の 2 cm 角の ASIC (以下、単に「ASIC」と呼ぶ)4 枚からなる。

シリコンセンサーはシリコンでできた半導体検出器である。このセンサーでは、格子状に区切られた 50 μm 角の領域 (ピクセル) 毎に信号を読み出す。ピクセル毎に電極がある。図 1.5 に示す通り、荷電粒子がシリコンセンサー内の空乏層を通過する際に電子・正孔対を生む。センサー中の電場により、生成された電子と正孔が移動する。これにより誘起される電荷信号がピクセル毎に読み出され、ASIC に入る。

ASIC では、図 1.6 右に示すように 1 行あたり 400 個、1 列あたり 384 個、合計 $400 \times 384 = 153600$ 個のピクセルが並ぶ。4 枚の ASIC はそれぞれチップ 1,2,3,4 と番号で区別される。それぞれの配置を図 1.6 左に示す。ASIC 上でのピクセルの配置は、センサー上での対応するピクセルの配置と一致する。図 1.5 に示すように、対応するピクセルとピクセルの間をバンプと呼ばれる半田球により電氣的に接続 (バンプ接続) する。ASIC では各ピクセル毎に信号処理用の電気回路があり、シリコンセンサーからの電荷信号を増幅し閾値をかけることで荷電粒子のヒットを検出する。

1.3 X線ヒット信号を用いた不良ピクセル判定

ピクセルモジュールに X 線を照射した際のヒット信号から信号読み出し可能なピクセルを判別する手法 (以下 X 線試験と呼ぶ) がある。この節では、X 線試験の概要を説明する。また、X 線試験の先行研究について述べる。

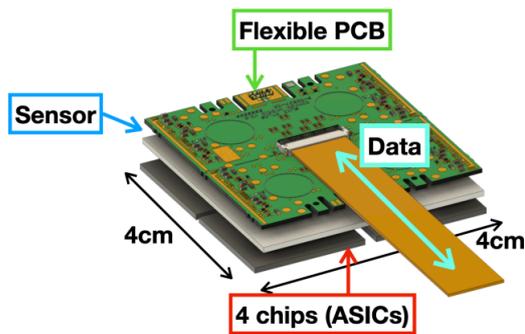


図 1.4: ピクセルモジュール [4]。

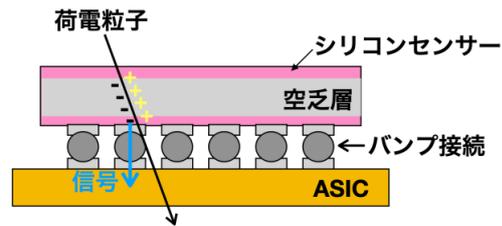


図 1.5: ピクセルモジュールの原理 [4]。

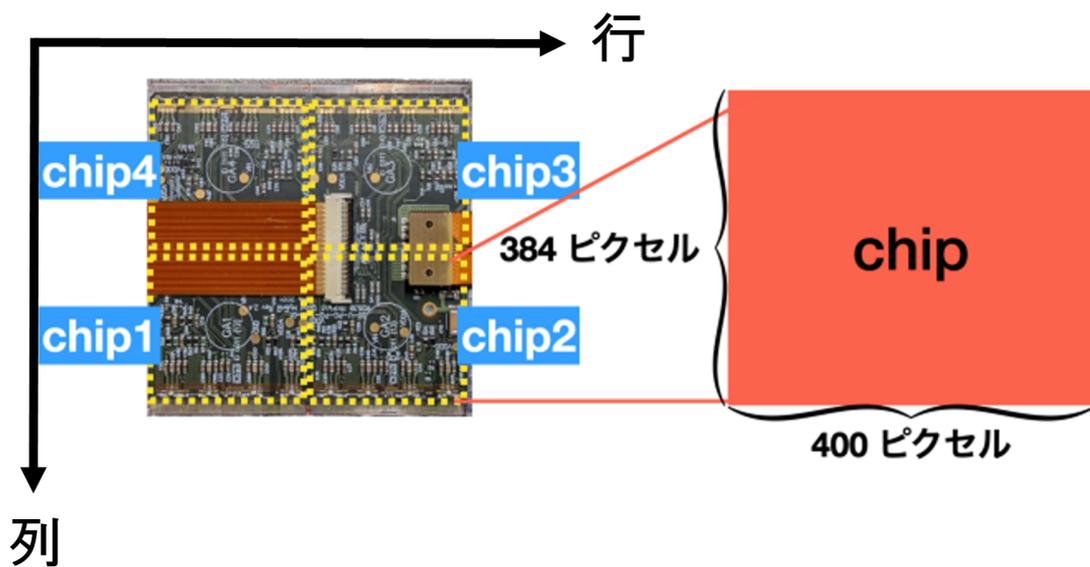


図 1.6: 図 1.4 に示すピクセルモジュールをフレキシブル PCB の真上から見たときの ASIC の配置と 1 枚の ASIC 上でのピクセルの配置 [4]。

1.3.1 X 線試験

X 線試験では、X 線をピクセルモジュールに照射した際にセンサーに生じた電荷信号をピクセル毎に読み出す。この時、センサー-ASIC 間が切断されたピクセルからは信号を読み出せない。また、センサー上の信号線が欠損しているピクセルからも信号を読み出せない。このような不良なピクセルを同定するために、ピクセル毎に X 線によるヒットの回数を数える。ATLAS は、正常なピクセルと判定するための基準を 10 ヒット以上と定めた。これは、センサー-ASIC 間が切断されたピクセルに対し、ノイズ等により数回ヒットがあっても不良なピクセルであると正しく判定するためである。この基準が妥当かどうかは本論文で議

論する。

1.3.2 先行研究

プロトタイプ版のピクセルモジュール (以下「プロトタイプモジュール」と呼ぶ) を用いて X 線試験の正確性が研究された [3]。この研究では、X 線試験に必要な最短時間を調べた。結果として、4 min 以内の X 線試験で不良なピクセルを正確に判別できることが示された。

1.4 本研究の目的

先行研究で使ったプロトタイプモジュールの ASIC は最終版の ASIC と比べて信号読み出しに使えるピクセルの数が半分であった。従って、最終版のピクセルモジュールでは、同じ測定条件だとしても生成されるヒット信号の量がプロトタイプモジュールより多くなる。それに伴い、信号読み出しを正常に行える測定条件も変わる。しかし、最終版のピクセルモジュールにおける、不良なピクセルを正確に判別するために必要な X 線試験の測定条件については調べられていない。

また、X 線を用いないで不良なピクセルを判別する手法が 2 つある。センサー接続の有無によるノイズの大きさの差を用いた手法とセンサーを介したピクセル間のクロストークを用いた手法である。これらの手法の正確性はまだ検証されていない。

本研究では、千葉県館山市のハヤシレピック第 3 工場で量産中のピクセルモジュールを用いて、最終版の ASIC を使ったモジュールに対する X 線試験の最適な測定条件を調べる。また、X 線を用いない不良ピクセル判定の正確性を、それらと X 線試験による判定結果を比較することにより検証する。

第 2 章

X 線試験の方法

この章では、ピクセルモジュールの不良なピクセルを X 線由来のヒットを用いて判別する方法を説明する。

2.1 X 線照射システム

X 線の照射に用いる X 線管は AMPTEK 社の Mini-X2 Xray Tube[5] である。この X 線管では、電子を一定電圧で加速し、銀の標的に衝突させ、X 線をつくる。図 2.1 にこの X 線管から発生する X 線のエネルギースペクトルを示す。この図から分かるように、加速エネルギー以下の連続分布と 22 keV の特性 X 線がある。この X 線管の仕様から、電子の最大加速電圧は 50 kV、最大管電流は 200 μA である。また、X 線の最大出力は 4 W である。さらに、加速電圧が 50 kV かつ管電流が 1 μA のとき、X 線管の先端から 300 mm の距離での X 線の流束は $6 \times 10^4 \text{ mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である。

図 2.2 は X 線試験に使われる測定系である。測定系は鉛板と鉄板の組み合わせでできた遮蔽箱により覆われている。X 線はコリメータにより、X 線管の先端から 85 mm の距離で直系 78.4 mm の範囲に制限される。この X 線は 40 mm 角のシリコンセンサーを覆う。この測定系における X 線由来のヒット事象数の予想と実測の一致に関しては先行研究により確認された [3]。

本研究の X 線試験では、X 線のフラックスを管電流のみで制御した。その際、加速電圧を 50 kV に固定した。その根拠は次の通りである。加速電圧を変えると、発生する X 線のエネルギーが変わる。これにより、X 線がセンサーに落とすエネルギーが変わる。それに伴い、センサーで発生する電荷量も変わる。従って、加速電圧に対して X 線由来のヒットを検出する回数が非線形に変化する*1。一方、管電流の制御で X 線のエネルギー分布は変わらない。従って、X 線由来のヒットを検出する回数は管電流に比例する。そのため、管電流の調

*1 これは、電荷信号が閾値を超える確率が変わるためである。

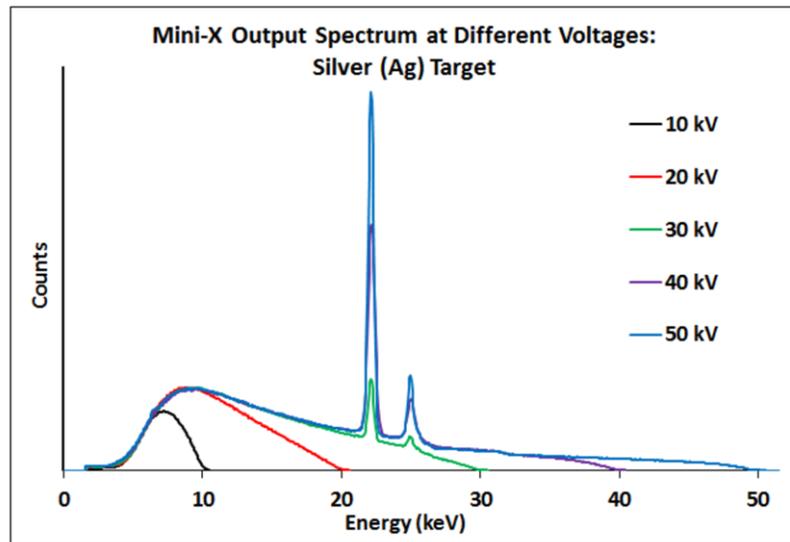


図 2.1: X 線のエネルギースペクトル [5]。

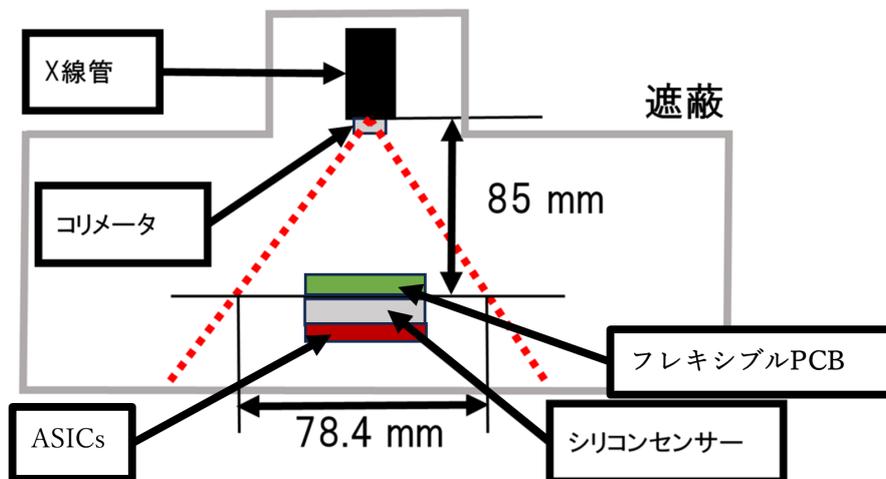


図 2.2: X 線照射システムの概要図。

整によりヒット数の制御が容易である。管電流の値については、2.4 節で述べる。

2.2 閾値の設定

1.2 節でも述べた通り、ピクセルモジュールではシリコンセンサーからの電荷信号に対して閾値をかけ、ヒットを検出する。ASIC の全てのピクセルに対して個別に閾値を調整できる [4]。図 2.3 は、ピクセル毎に設定した閾値の分布の一例である。ここで、1e は素電荷で

ある。閾値は $1500 e^2$ を目標に設定されているが、ピクセルの個体差によりばらつく [4]。

本研究では 50 keV 以下のエネルギーの X 線を使うため、主に光電効果によりシリコンセンサーに電荷信号が生じる。X 線の主なエネルギーは 22 keV なので、シリコンの電子正孔対生成エネルギーを 3.6 eV としてシリコンセンサーに生成される電荷量を概算すると、

$$\frac{22000}{3.6} = 6.1 \times 10^3 [e] \quad (2.1)$$

となる。センサーからの電荷量に対してかけた閾値は概ね 1000 e から 2000 e の範囲内にあるので、ASIC ではこの X 線由来のヒットを検出できる。

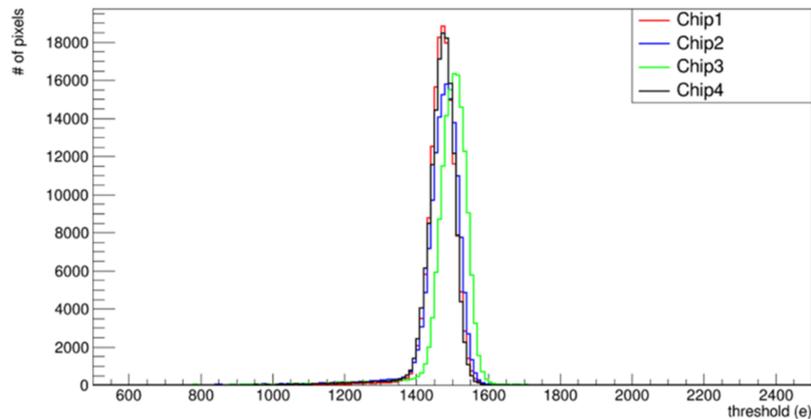


図 2.3: 閾値の分布の一例。1e は素電荷である。

2.3 データの読出し

データを読み出すセットアップを図 2.4 に示す。ピクセルモジュールの電力は外部電源から供給される。この電力は、シリコンセンサーにバイアス電圧を掛けたり、ASIC を動作させるために使われる。ピクセルモジュールと PC の間のデータの送受信は FPGA と呼ばれる素子を経由する。FPGA では、ASIC からのデータを PC で読み取り可能な規格に変換する。

X 線由来のヒットを読み出す際、ソフトウェア^{*3}により ASIC に対して一定の周期で「データを取れという指令」(これを「トリガー」と呼ぶ)を指定した時間の間に繰り返す。このときの周波数(以下「トリガーレート」と呼ぶ)と時間はソフトウェアで設定可能である。図 2.5 に、ASIC でトリガーを受信してからヒット信号のデータを PC に送信するまでの流れを示す。ASIC では、トリガーを受け取ると、25 ns の間にセンサーからの電荷信号

^{*2} これは、ATLAS 実験で決められた値である。

^{*3} ATLAS 実験では、YARR[6] を用いる。

が閾値を超えたかを調べる操作を行う。この操作を 32 回^{*4}繰り返す。従って、1 回のトリガーの間にヒット検出を行う時間は $25 \text{ [ns]} \times 32 = 800 \text{ [ns]}$ である。ヒット検出が終わると、ヒットの有無、ヒットがあったピクセルの位置、ヒット数等の情報をデジタルデータとして PC に送る。PC では、このデータを受信する。

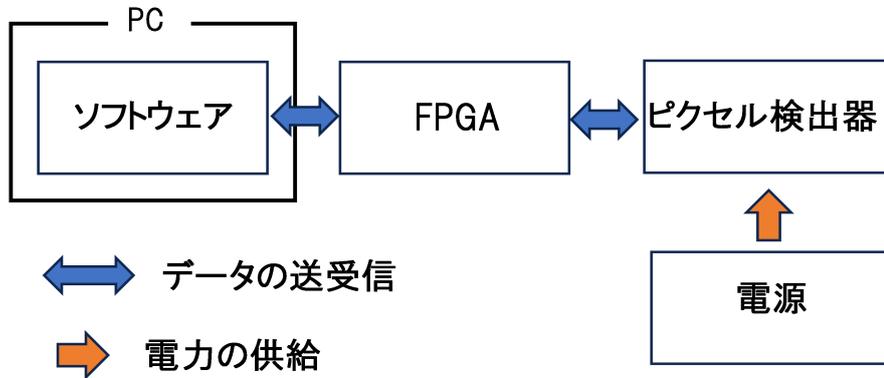


図 2.4: データの読み出し用セットアップ。ピクセルモジュールは外部電源と接続されている。ピクセルモジュールと PC との間のデータの送受信は FPGA を経由して行われる。

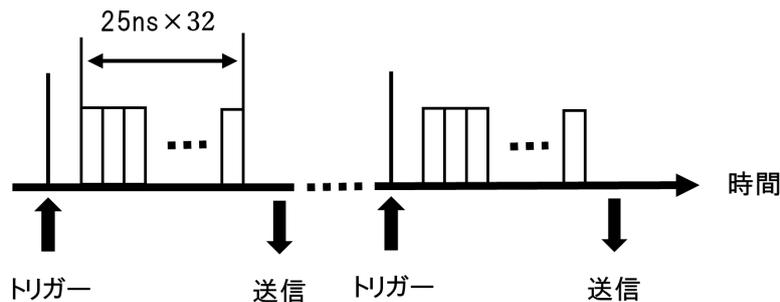


図 2.5: ASIC でトリガーを受け取ってからヒット情報を送るまでの流れ。ASIC ではトリガー信号を受け取ると、 25 ns の間に電荷信号が閾値を超えたかどうかを調べる。この操作を 32 回繰り返す。その際に得られたヒットの情報を PC に送る。

2.4 X 線試験の結果

図 2.6 は、X 線試験で得られたピクセル毎のヒット数を示す。この二次元ヒストグラムにおいて、 x - y 平面上のビンは図 1.6 に示すピクセルの配置に対応する。各ビンにおける色の

^{*4} この回数はソフトウェアで決まっている。

明暗は、対応するピクセルで検出したヒット事象数の大小を示す。ヒット事象数が周囲と比べて低いピクセルの真上には X 線を遮蔽する部品がある。これらは主に、図 1.6 左に示すフレキシブル PCB に実装された部品、ピクセルモジュール周辺の温度と湿度を測定するためのセンサー、ASIC を冷却用のヘッドに押し付けるための金属ばねである。図 2.7 に各部品とピクセルモジュールの位置関係を示す。実際に使用した温湿度センサーと金属ばねがピクセルモジュールの蓋に備えつけられた様子を図 2.8 に示す。また、ピクセルモジュールに蓋を載せた様子を図 2.9 に示す。

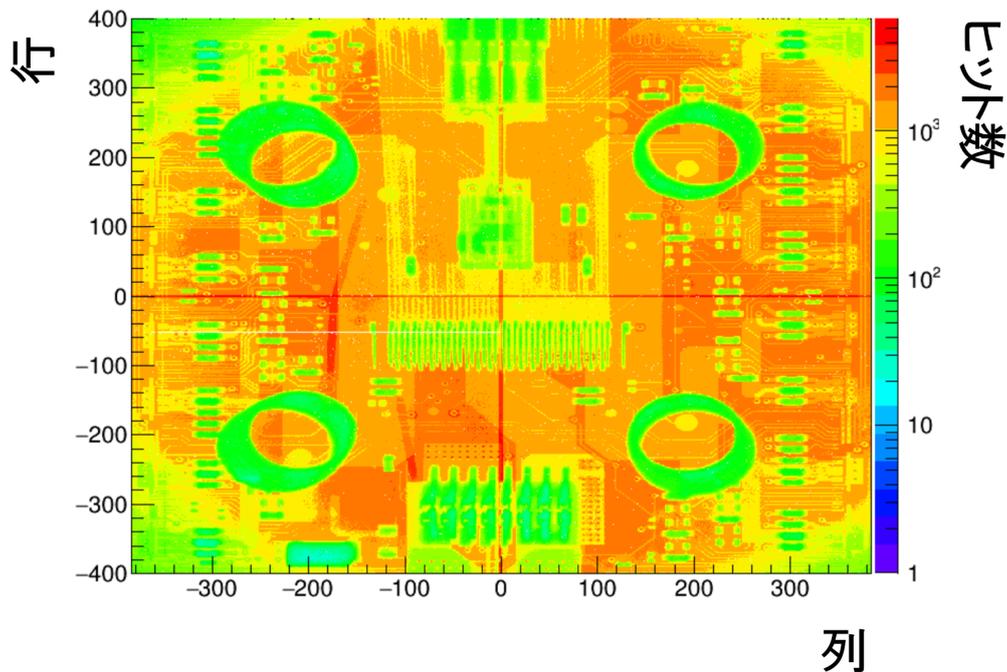


図 2.6: ピクセル毎のヒット事象数を示す二次元マップ。50 kHz のトリガーレートで 150 s 測定したときの結果である。行と列は図 1.6 で定義した向きである。行方向と列方向のビン数はそれぞれ 800 と 768 であり、ASIC におけるピクセルの配置に対応する。

現在ハヤシレピック第 3 工場では、ピクセルモジュールの量産と検査が進行中である。その検査項目の中に X 線試験がある。この X 線試験でのトリガーレートは 50 kHz である。また、X 線管の管電流として $40 \mu\text{A}$ ^{*5}を使う。

^{*5} これはモジュールの検査を安定に行うことのできる限界の電流である。その詳細については付録 A で述べる。

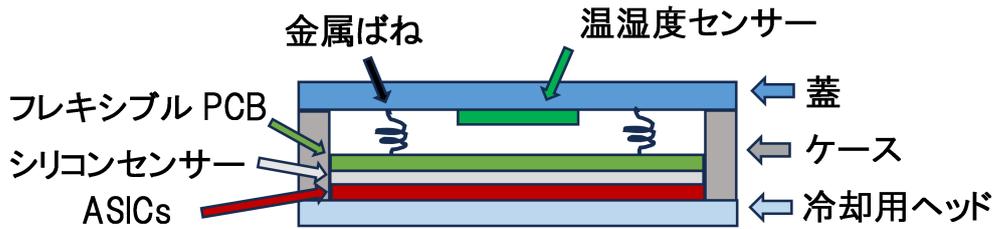


図 2.7: X 線を遮蔽する部品とピクセルモジュールの位置関係。



図 2.8: 温湿度センサーと金属ばね。温湿度センサーは Sensirion の SHT85[7] である。

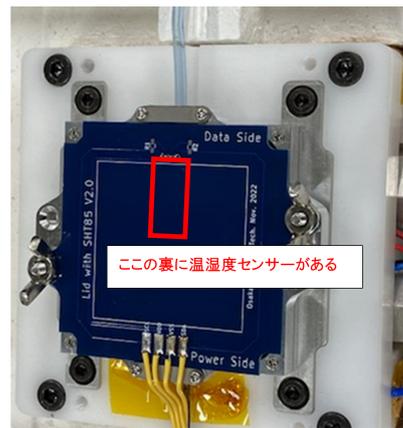


図 2.9: ピクセルモジュールに蓋を載せたときの様子。

2.5 X 線試験の正確性に関する懸念

X 線試験において、不良なピクセルを正しく判別することが重要である。しかし、不良ピクセル判定の正確性を脅かす要因が 2 つある。

1. ASIC 内で生じたノイズ電荷等が閾値を超える、または ASIC からのデジタルデータが化けることで、実際は切断されているが誤ってセンサー-ASIC 間が接続されていると判定する場合。この場合を偽接続と定義する。
2. ヒット検出した回数が少なく、実際は接続されているが誤ってセンサー-ASIC 間が切断されていると判定する場合。この場合を偽切断と定義する。

第 3 章と第 4 章では、偽接続と偽切断を考慮し、不良ピクセルを正確に判定する X 線試験の測定条件を調べる。

第 3 章

偽接続の評価

この章では、偽接続が起こる確率を評価する。また、偽接続が不良ピクセル判定の正確性に影響しない条件を調べる。

3.1 偽接続が発生する確率に対する要求

ATLAS 実験では、生産したピクセルモジュールに対して、不良なピクセルの数が 1 台のモジュールの全ピクセル数の 0.3% 以内であることを要求する。この時の 0.3% を初期不良許容率と呼ぶ。本研究では、1 台のモジュールの全ピクセルに対して偽接続が発生する確率が初期不良許容率の 10%(=0.03%) 以内であることを要求する。高輝度 LHC ATLAS 実験ではピクセルモジュールを使用する際に、不良なピクセルの数が 1 台のモジュールの全ピクセル数の 3% まで増えることを許容する。1 台のモジュールの全ピクセルの 0.03% までの不良ピクセルを使っても、実験に影響しない。

3.2 ノイズによる偽接続の評価

ノイズによる偽接続の影響を調べるために X 線を照射しない状態で信号を読み出した^{*1}。この測定を“ノイズスキャン”と呼ぶ。

ハヤシレピック第 3 工場における量産では、X 線試験の試験時間に対して 250 s^{*2}を基本とする。そこで、この試験時間で行う X 線試験を“基準 X 線試験”と呼ぶ。このときの総トリガー数は $50000 [\text{triggers/s}] \times 250 [\text{s}] = 1.25 \times 10^7 [\text{triggers}]$ である。“ノイズスキャン”での総トリガー数をこのトリガー数に規格化する。こうすることで、“基準 X 線試験”にお

*1 X 線試験と同様に、ソフトウェアを用いてこの測定を行う。そのためのソースコードは ATLAS グループにより公式で提供されている。その測定条件は 2.3 節と同様だが、12 kHz のトリガーレートかつ 250 s の測定時間である。また、ピクセル毎の閾値の設定についても X 線試験と同様である。

*2 これは暫定の測定条件である。X 線試験に必要な試験時間の理解に伴い今後変わる可能性がある。

いて偽接続を引き起こすヒット事象数の期待値が分かる。図 3.1 に、ある 1 台のピクセルモジュールを用いて求めたこの期待値の分布を示す。このピクセルモジュールにおいてヒット数の期待値が 10 以上のピクセルは 148 個ある。偽接続が生じるピクセルの数の傾向を調べるために、他のノイズスキンのデータを用いて同様の操作を行った。現段階では 23 個分のデータまでの解析が終わった。その結果を図 3.2 に示す。23 個分のデータに対して、偽接続が起こるピクセル数は前節で述べた要求 ($=614400 \times 3 \times 10^{-4} = 184.3$ 以内) を満たす。また、一部の外れ値を除いて、まとまった分布をつくる傾向にある。このことから、偽接続を起こすピクセル数にモジュールに共通する期待値があると仮定する。図 3.2 における、23 個のデータサンプルからこの期待値を推定する。図 3.2 に示す分布において、平均が 38.6、標準偏差が 30.5 である。この分布の期待値の誤差は

$$30.5 \times \sqrt{\frac{23}{22}} = 31.2$$

となる。従って、偽接続が起こるピクセル数の期待値は

$$38.6 \pm \frac{31.2}{\sqrt{23}} = (3.9 \pm 0.7) \times 10^1$$

となる。この結果から、1 台のモジュールの全てのピクセルの中で偽接続が起こる確率は

$$\frac{(3.9 \pm 0.7) \times 10^1}{614400} = (6.3 \pm 1.1) \times 10^{-5}$$

となる。この確率は、偽接続は起こる確率に対する要求を満たす。

次に、偽接続が不良ピクセル判定に与える影響について検討する。図 3.2 に示す分布はまだ統計を増やせる。そこで、より多くのノイズスキンのデータを解析し、偽接続を起こすピクセル数を見積もる。そうすることで統計の増えた分布から、偽接続が不良ピクセル判定に与える影響を評価することができる。これを今後の課題とする。

偽接続を引き起こすヒットが何により生じたものかは 6.1 節で議論する。

3.3 データ化けによる偽接続の評価

データ読出し中にデータ化け^{*3}が起こると、実際にヒットがあったピクセルとソフトウェア上でヒットがあったピクセルが相違する。正常なピクセルからのヒットの信号を、不良なピクセル由来であるとソフトウェアが誤って認識することで、偽接続が起こる。そこで、このように起こった偽接続が X 線試験に与える影響を評価した。

まず、ピクセルモジュールのとある領域のピクセル全てを信号読み出しに使わないように設定する (以下この設定を「ディセイブル」と呼ぶ)。今回は、図 3.3a と図 3.3b に示すよう

^{*3} この原因は現在調査中である。

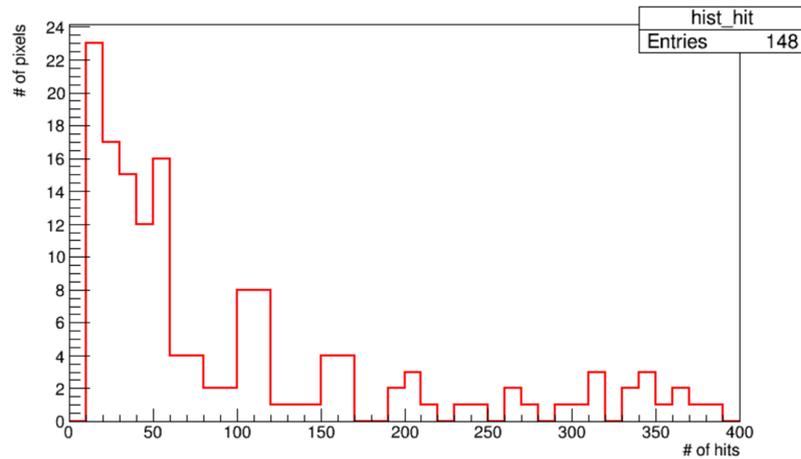


図 3.1: “基準 X 線試験”において偽接続を引き起こすヒット数の期待値の分布。

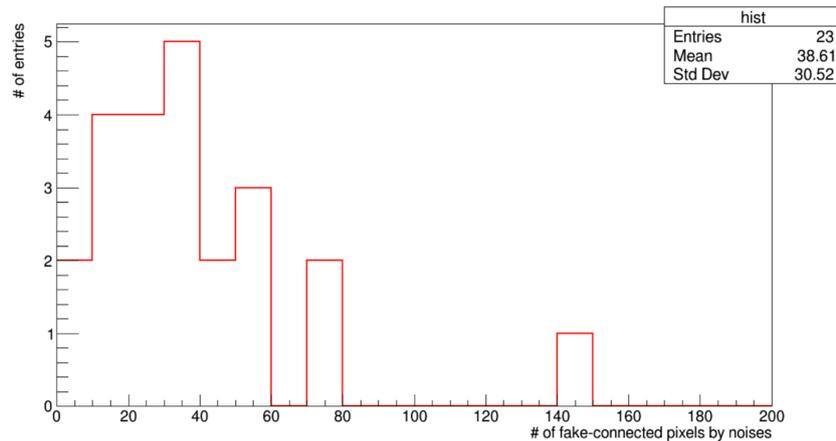
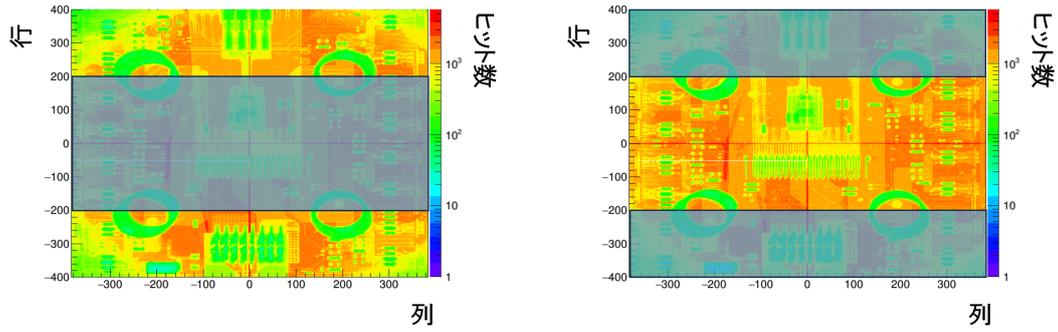


図 3.2: “基準 X 線試験”において、偽接続を起こすピクセル数の期待値の分布。

にディセーブルにしたピクセル領域でソフトウェアにより誤ってヒット判定した事象数を調べた。“基準 X 線試験”を行った際にディセーブルにしたピクセル領域において、ヒットがあったピクセルでのヒット数の分布を図 3.4a と図 3.4b に示す。X 線試験では 10 ヒット以上で接続判定するため、データ化けが原因で数回偽のヒット事象があっても誤って接続と判定することはない。

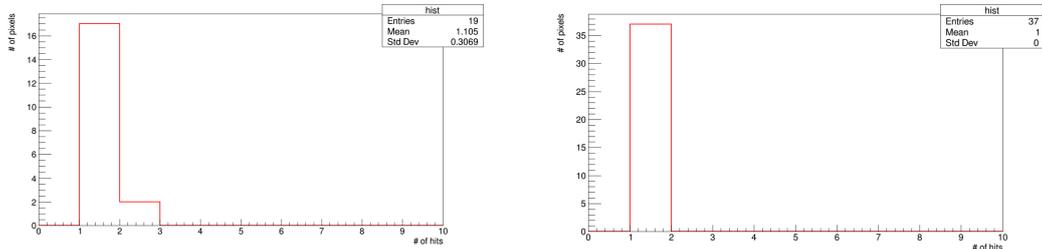
3.4 ノイズとデータ化けによる偽接続の評価

次に、ノイズとデータ化けによる偽のヒット事象が加算されることによる偽接続の確率を評価する。データ化けによる偽接続の評価に用いたピクセルモジュールにおいて、“基準 X 線試験”を行う際に生じるノイズ由来の偽のヒット数の期待値を 3.2 節で説明した方法で求



(a) ピクセルモジュールの内側半分の領域のピクセルをディセーブルにしたときの様子。 (b) ピクセルモジュールの外側半分の領域のピクセルをディセーブルにしたときの様子。

図 3.3: 本研究でディセーブルにしたピクセル領域。薄い青で覆われた範囲にあるピクセルをディセーブルにした。



(a) ピクセルモジュールの内側半分の領域のピクセルをディセーブルした場合。 (b) ピクセルモジュールの外側半分の領域のピクセルをディセーブルした場合。

図 3.4: ディセーブルにしたピクセル領域において、ヒットがあったピクセルでのヒット数の分布。

めた。全ピクセルでの期待値の合計をとると、3083 となった。データ読出し時に閾値を掛ける操作を 1 回行う毎にヒット検出する確率 $3083/(50000 \times 250 \times 32) = 7.7 \times 10^{-6} \ll 1$ を考慮し、この値の標準誤差を $\sqrt{3083} = 55.52$ と見積もる^{*4}。図 3.4a と図 3.4b におけるヒット事象は独立なので、データ化けによるヒット事象数の期待値をそれらの場合の合計 (21 + 37 = 58) とする。これは、ノイズによる偽のヒット数 3083 に対して 90% の信頼区間内にある。これは、データ化けによる偽接続の影響を加えてもノイズによる偽接続に対して有意差を生まないことを意味する。そのため、データ化けによる偽接続は本章の結論に影響しない。

*4 ヒット事象数がポアソン分布に従うとした。

3.5 偽接続評価の結論

この章では、ノイズとデータ化けが X 線試験による不良ピクセル判定に与える影響を調べた。ノイズによる偽接続の評価の結果、“基準 X 線試験”において偽接続が起こる確率が $(6.3 \pm 1.1) \times 10^{-5}$ であることを示した。この確率は偽接続の確率に対する要求を満たす。また、データ化けによる偽接続が不良ピクセル判定に影響しないことが分かった。

第 4 章

偽切断の評価

この章では、X 線を用いて不良なピクセルを正確に判定するために必要なヒット数を得る測定条件を調べる。

4.1 偽切断が発生する確率に対する要求

本研究では、1 台のモジュールの全てのピクセルの内、偽切断が発生する確率が初期不良許容率の 1% ($= 3 \times 10^{-5}$) 以内であることを要求する。この条件が満たされる場合、実際には使えるピクセルを不良と判定して使わないようにしてもピクセルモジュールの性能に影響しない。

4.2 不良ピクセル判定に必要なヒット数の期待値

150s の X 線試験を行う時、センサーからの電荷信号に閾値をかける操作を $50000 [\text{triggers/s}] \times 32 [/\text{trigger}] \times 150 [\text{s}] = 2.4 \times 10^8$ 回行う。図 2.6 より、この条件でのピクセル当たりのヒット事象数は多くても 1 万ヒット程度である。従って、1 つのピクセルでヒットを検出する確率は十分低い。そこで、ピクセル当たりにヒットが起こる確率分布をポアソン分布と仮定する。図 4.1 に、期待値 mean のポアソン分布 $P(n) = e^{-\text{mean}} \frac{\text{mean}^n}{n!}$ において $n < 10$ となる確率を示す。この図から、 3×10^{-5} 以内の確率で 10 ヒットを下回るために、各ピクセルのヒット数の期待値は 27.96 を超える必要がある。

4.3 不良ピクセル判定に必要な測定時間の見積もり

この節では、前節で求めたヒット数を得るために必要な X 線照射時間 (以下単に「必要試験時間」と呼ぶ) を見積もる。

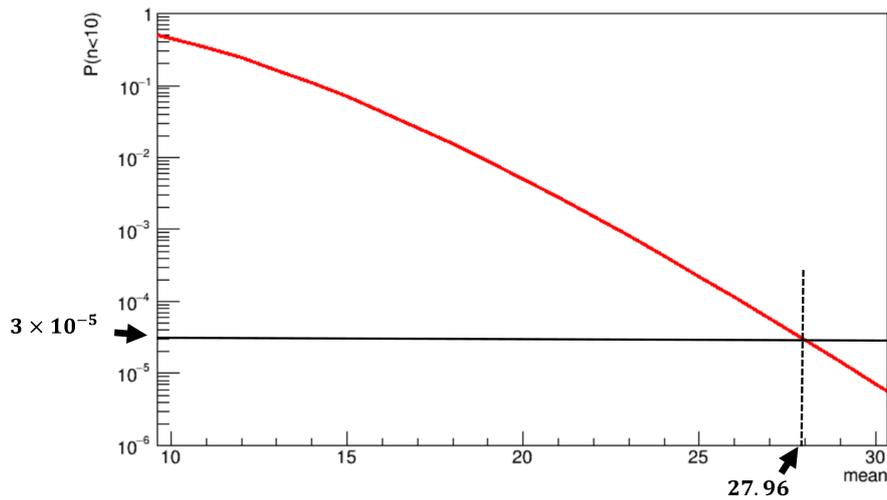


図 4.1: 期待値 mean のポアソン分布 $P(n)$ において $n < 10$ となる確率。横軸にポアソン分布の期待値、縦軸に $n < 10$ となる確率を示す。

4.3.1 見積もり方法

375s の X 線試験を行った際に得られたヒット数の二次元マップ (図 4.2) を例に必要試験時間の見積もり方法を説明する。図 4.2 において、100 ヒット未満のピクセルを示したものを図 4.3 に示す。この図から分かるように、ヒット数が少ないまとまったピクセル領域が存在する。その領域では、統計揺らぎによりヒット数に大小がある。その領域におけるヒット数の期待値を最小期待値と定義する。最小期待値が前節で導出したヒット数となる試験時間を必要試験時間とする。

まず、図 4.2 における最小期待値を求める。図 4.2 と図 4.3 に示す黒で囲まれた領域は、最小期待値を導出する際に選んだピクセル範囲*1である。この範囲は、モジュールの端にある大きな表面実装コンデンサの真下にある。この領域において、行の範囲は [-380,-370] で列の範囲は [-210,-170] である。図 4.4 に示すように、この領域にあるピクセルでのヒット数の分布をポアソン分布でフィットした。その際、この領域内の全てのピクセルでヒットの確率が一樣であることを保証するために、フィットの有意確率が 95% の有意水準の範囲内にあることを要求した。図 4.4 に対応するピクセルモジュールでは、フィットの有意確率が 56% であった。この図において、フィットパラメータ p_0 、 p_1 はそれぞれポアソン分布の期待値とコンスタントである。従って、 p_0 が最小期待値である。図 4.4 に対応するモジュール

*1 偽切断の評価に用いたすべてのデータに対して、最小期待値の見積もりにこの範囲のピクセルを用いた。以下に述べるプロセスで最小期待値を得るために得たフィットの結果を付録 B に載せた。

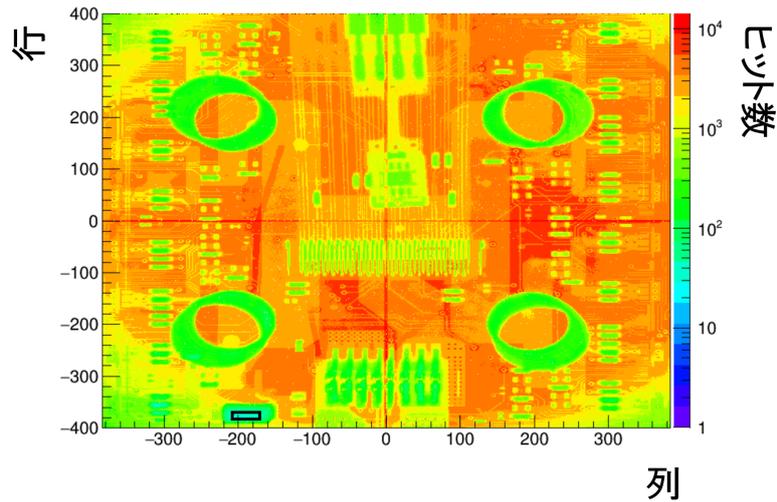


図 4.2: 375 s の X 線試験を行った際に得られたヒット数の二次元マップ。最小期待値の導出に使ったピクセル範囲を黒で囲んだ。

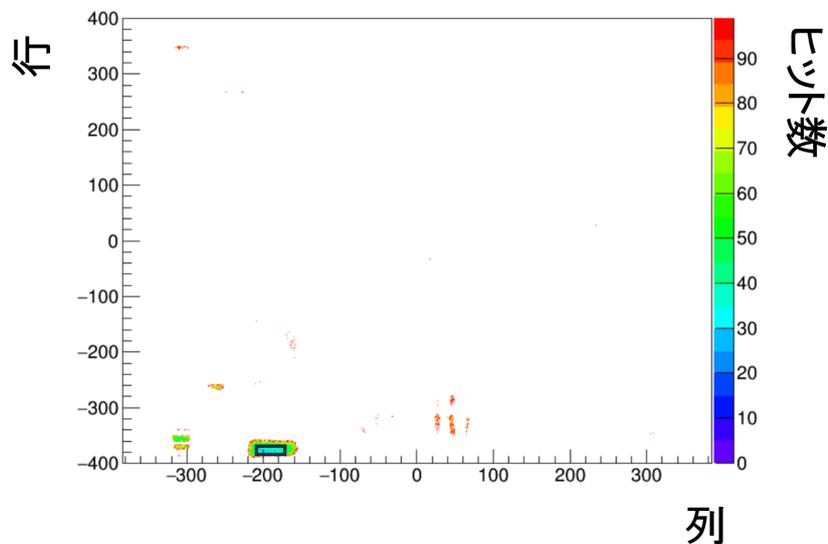


図 4.3: 図 4.2 において、ヒット事象数が 100 未満のピクセル。最小期待値の導出に使ったピクセル範囲を黒で囲んだ。

ルでは、最小期待値は 38.5 ± 0.3 である。

次に、必要試験時間を求める。図 4.2 を得る際に X 線の照射時間 (基準試験時間) を 375 s に設定したため、必要試験時間を

$$375 \text{ [s]} \times \frac{27.96}{38.5} = 272 \text{ [s]}$$

と見積もることができる。

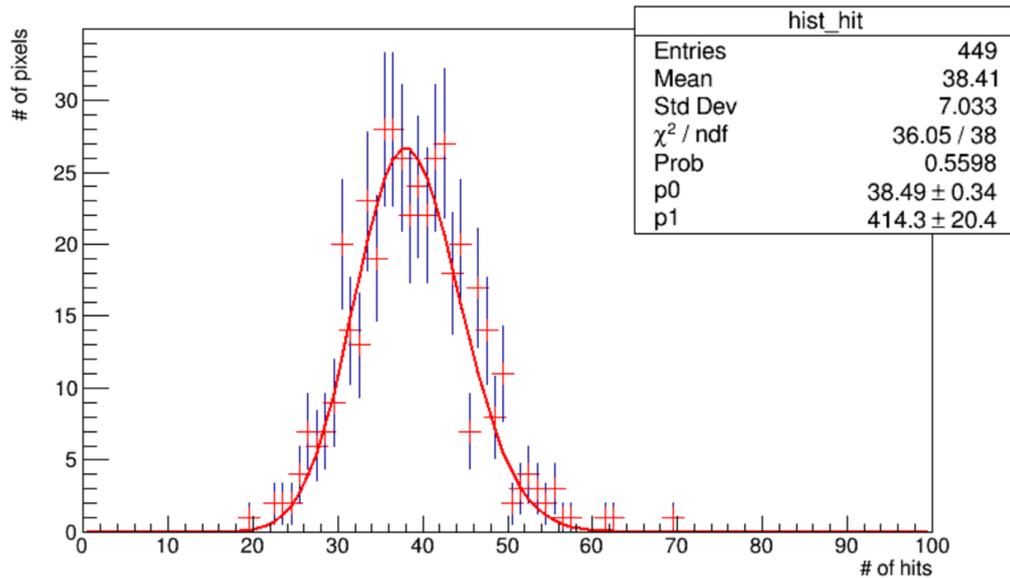


図 4.4: 図 4.2 におけるヒット数の最小期待値を導出する際に選んだピクセル領域におけるヒット数の分布をポアソン分布でフィットした結果。フィットパラメータ p0、p1 はそれぞれポアソン分布の期待値とコンスタントである。従って、最小期待値は 38.5 ± 0.3 である。

4.3.2 結果

必要試験時間の目安を知るために、X 線試験のデータを集めて必要試験時間を見積った。現段階では 18 個分のデータまでで必要試験時間の解析が終わった。その際、ピクセル毎のヒット数の期待値に対して、偽切断が発生する確率に対する要求を適用した。表 4.1 にデータ毎の基準試験時間、最小期待値、必要試験時間をまとめた。データ毎の必要試験時間を誤差付きで示したグラフを図 4.5 に示す。また、図 4.6 に必要試験時間の分布を示す。これらの図は、データ毎に異なる必要試験時間を示したことを意味する。また、同表から基準試験時間を 250s に規格化し、“基準 X 線試験” におけるヒット数の最小期待値を求めた。これにより得た最小期待値の分布を図 4.7 に示す。この図から分かるように、最小期待値にばらつきがある。このばらつきが必要試験時間の差異に寄与した。このばらつきの要因を第 6 章で議論する。X 線試験の測定時間に関する結論はこの議論から得る。

表 4.1: 各データにおけるデータ番号、基準試験時間、最小期待値、必要試験時間。

データ番号	基準試験時間 (s)	最小期待値	必要試験時間 (s)
1	150	22.8± 0.2	183.9± 1.6
2	150	17.2± 0.2	244± 3
3	150	28.5± 0.3	147.2± 1.5
4	375	39.9± 0.4	263± 3
5	375	48.5± 0.4	216.2± 1.8
6	375	38.5± 0.3	272± 2
7	375	50.4± 0.5	208± 2
8	375	53.2± 0.4	197.1± 1.5
9	375	39.7± 0.4	264± 3
10	375	37.1± 0.4	283± 3
11	375	40.2± 0.4	261± 3
12	375	37.2± 0.3	282± 2
13	250	41.4± 0.3	168.8± 1.2
14	250	27.6± 0.3	253± 3
15	250	42.9± 0.3	162.9± 1.1
16	250	40.1± 0.4	174.3± 1.7
17	250	40.6± 0.4	172.2± 1.7
18	250	39.3± 0.4	177.9± 1.8

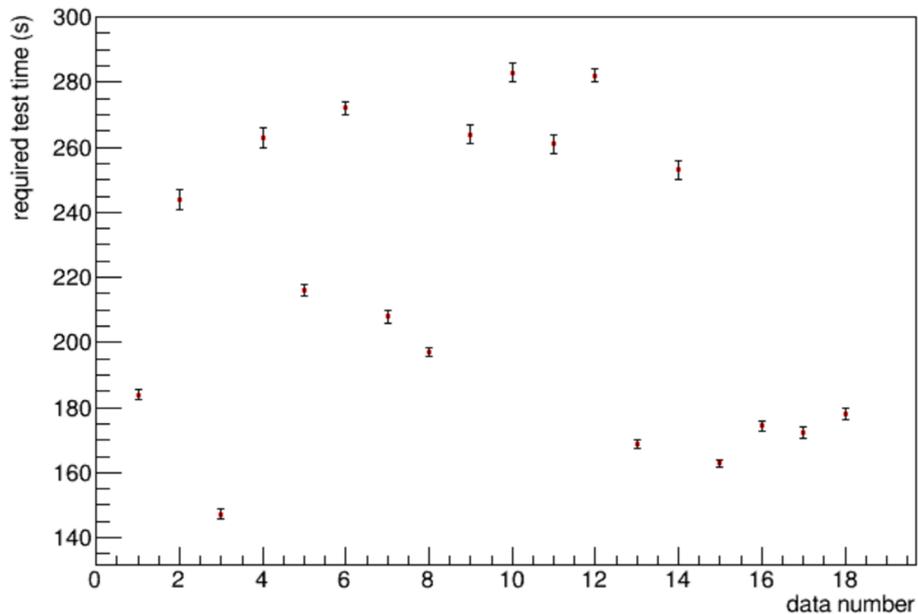


図 4.5: データ番号別の必要試験時間。

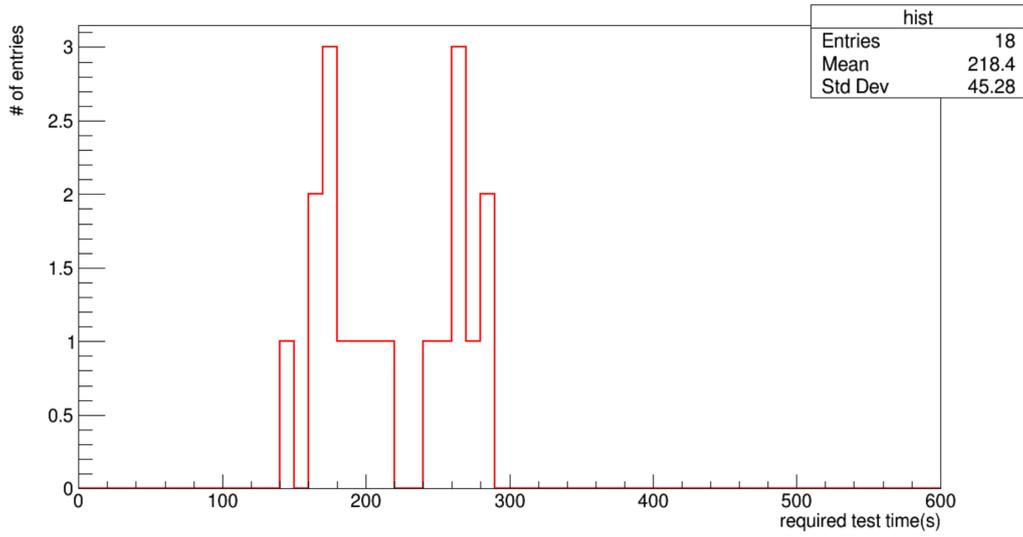


図 4.6: X 線試験における必要試験時間の分布。

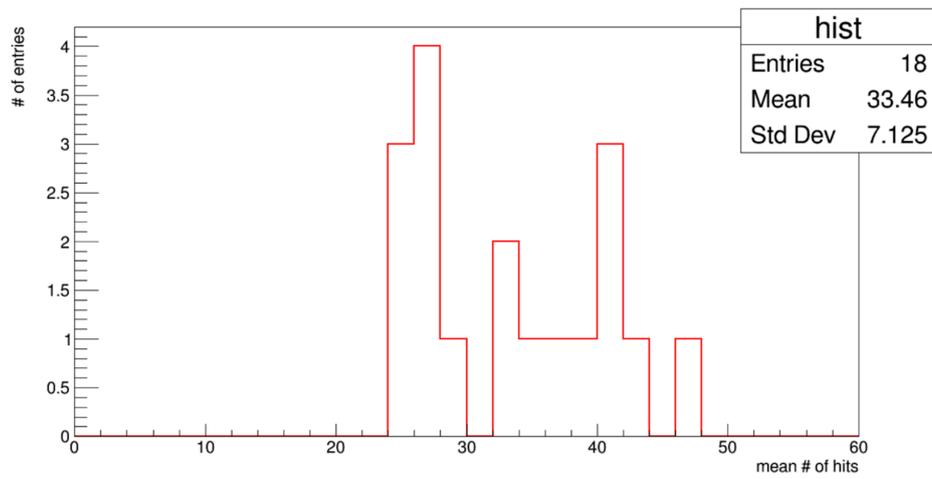


図 4.7: “基準 X 線試験” におけるヒット数の最小期待値の分布。

第 5 章

X 線を用いない不良ピクセル判定手法の正確性の検証

この章では、X 線試験とは異なる方法で不良なピクセルを評価する手法^{*1}の正確性を X 線試験の結果を基に検証する。

5.1 X 線を用いない不良ピクセル判定手法

5.1.1 低ノイズを用いた手法

ピクセルモジュールにおける電荷信号がガウシアンで揺らぐと仮定した際の標準偏差をノイズと定義する。ノイズは閾値調整の際に測定することができる [4]。図 5.1 はセンサーと ASIC のついたモジュールでピクセル毎に測定したノイズの分布の一例である。素電荷を $1e$ としてノイズの大きさを示した。図 5.2 は ASIC 単体でのノイズの分布の一例である。これらの図を見比べると、センサー-ASIC 間が切断されたピクセルのノイズが接続された時と比べて低いことが分かる。これは、センサー-ASIC 間が切断されたピクセルにおいて、センサー由来のノイズが効かないためである。

ノイズを用いてピクセル毎のセンサー-ASIC 間の切断を判定する方法を説明する。まず、この手法で用いる“低ノイズ”について説明する。“低ノイズ”とは、大きさが $(18.2e, 81.1e)$ の範囲^{*2}にあるノイズである。この手法において、センサー-ASIC 間の切断がバンプのまとまった剥離により引き起こされると想定する。評価対象のピクセルのノイズが“低ノイズ”でありそのピクセルの隣に“低ノイズ”のピクセルが 2 個以上ある場合、評価対象のピクセ

*1 今回紹介する 2 つの手法は、モジュールを検査する手法の候補として ATLAS 実験で提案されたものである。

*2 この基準は、本論文執筆時点で筑波大学素粒子実験研究室所属の柳瀬健太郎さんが、図 5.2 に示す ASIC 単体でのノイズの分布がガウシアンでばらつくとしたときの $\pm 3\sigma$ の誤差範囲として決めたものである [9]。

ルにおいてセンサー-ASIC 間が切断されていると判定する。

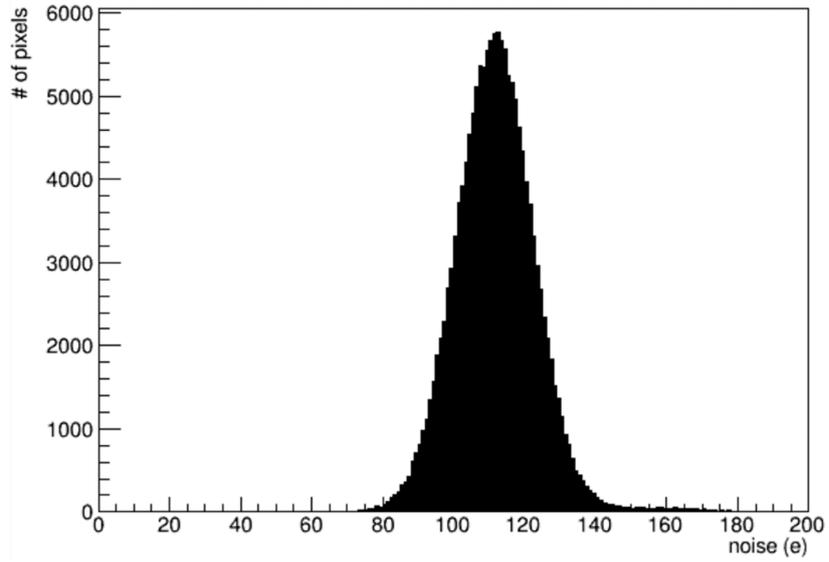


図 5.1: 1 枚の chip における全てのピクセルのノイズの分布の例。

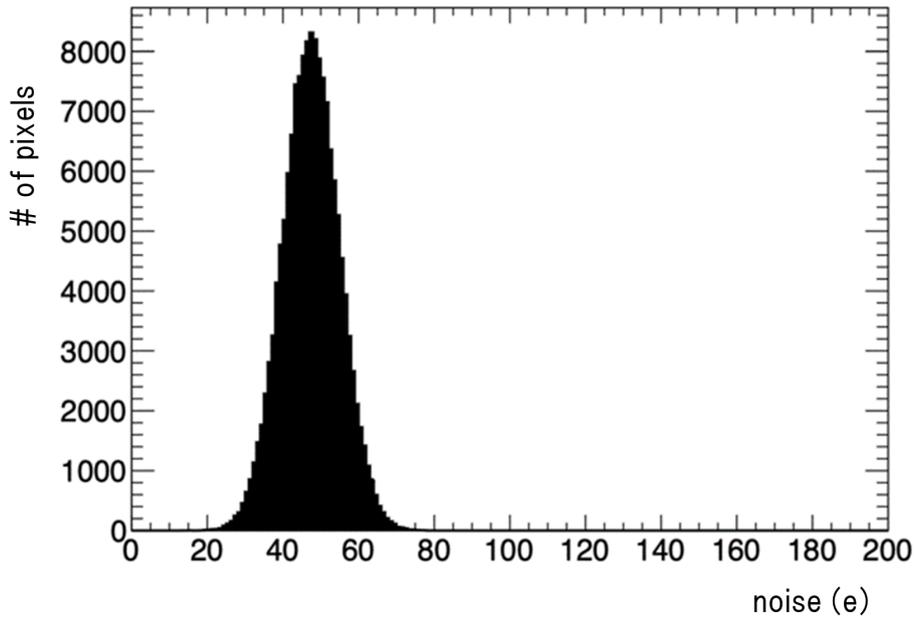


図 5.2: ASIC 単体でのノイズの分布の例 [9]。

5.1.2 クロストークを用いた手法

ピクセル間のクロストークは、センサーを経由して起こる。従って、センサー-ASIC 間が切断されたピクセルにおいて、隣のピクセルからのクロストーク信号を読み出すことはできない。

ASIC 内でおおよそ 40000e 分の量の電荷 (試験電荷) を生成する。同じ量の試験電荷を、評価対象のピクセルに隣接する全てのピクセルに同時に入射する。この時発生するクロストーク信号の流れを図 5.3 に示す。試験電荷を入力する操作を 100 回行った際に評価対象のピクセルにおいてクロストーク信号が閾値を超えた事象数 (以下、「クロストーク事象数」と呼ぶ) を測定する。クロストーク事象数が試験電荷を入力した回数の 5 割未満の場合、評価対象のピクセルにおいてセンサー-ASIC 間が切断されていると判定する。

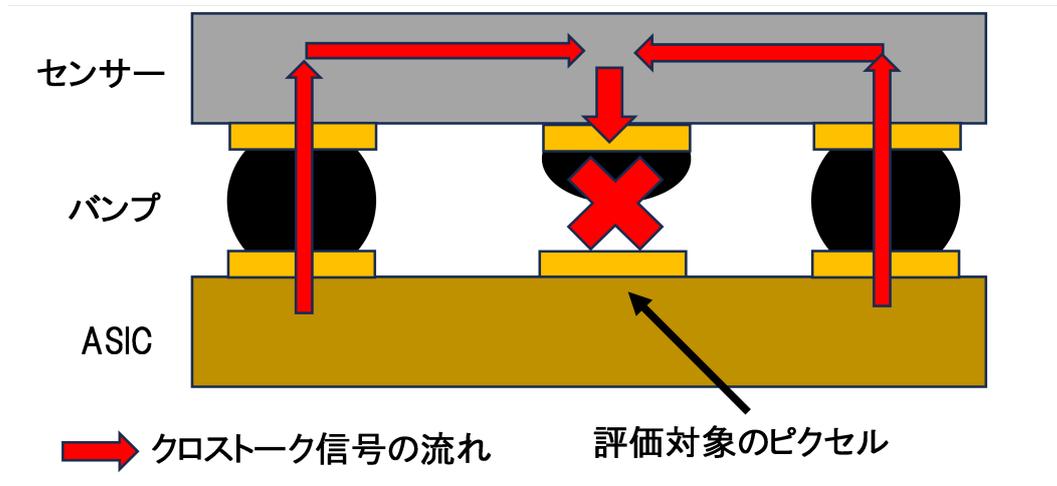


図 5.3: ピクセル間のクロストーク信号の流れ。

5.2 不良ピクセル判定の手法間の比較

ここでは、前節で紹介した 2 つの手法と X 線試験による不良ピクセル判定の手法間の比較について調べた結果を述べる。ハヤシレピック第 3 工場行われた 77 台分のピクセルモジュールの品質管理の結果を用いて 3 つの手法による不良ピクセル判定を行い、それらが一致するかどうかを確認した。その結果として、3 つの手法の間で判定結果が異なる場合が見られた。3 つの手法の間での判定結果の異なり方は以下の 4 つだった。これらの原因を追及する。

1. X 線試験のみ不良と判定する場合

表 5.1: X 線試験のみ不良と判定したピクセルにおけるノイズ、クロストーク事象数。

ノイズ (e)	クロストーク事象数
46.1117	100
46.4316	100
40.8199	100
37.7645	100
40.7987	100
48.3428	100
56.3762	100

2. クロストークを用いた手法のみ不良と判定する場合
3. 低ノイズを用いた手法のみ不良と判定する場合
4. 低ノイズを用いた手法のみ正常と判定する場合

5.2.1 X 線試験のみ不良と判定する場合

表 5.1 に X 線試験のみ不良と判定したピクセルにおけるノイズとクロストーク事象数をまとめた。この場合のピクセルで測定されたノイズは“低ノイズ”の範囲 (18.2e,81.1e) にある。これは、センサー-ASIC 間が切断されている場合のノイズと矛盾しないことを意味する。この点に加えて X 線試験で切断判定されたことを考えると、この場合のピクセルにおいてセンサー-ASIC 間が切断されていると評価できる。しかし、クロストーク事象数が 100 となることから、センサー-ASIC 間が接続されていると評価することもできる。ところで、クロストークを用いた手法において、クロストーク信号がセンサーを經由し、評価対象のピクセルで読み出されることを前提としていた。クロストーク信号がセンサーを通らずに伝わるかどうかは、ASIC 単体でクロストーク信号を読み出せるか試すことで検証できる。これにより、クロストーク事象数の信頼性を評価できる。この検証は今後の課題である。

5.2.2 クロストークを用いた手法のみ不良と判定する場合

表 5.2 に、クロストークを用いた手法のみ不良と判定したピクセルにおけるノイズとクロストーク事象数と閾値をまとめた。この場合においてクロストーク事象数が少なくなる要因を検討する。図 5.4 から、ノイズとクロストーク事象数に相関が無いことが分かる。これは、ノイズとクロストーク事象数の間でセンサー-ASIC 間の接続状態に対する振る舞いに一貫性が無いことを意味する。従って、この場合の少ないクロストーク事象数はセンサー-ASIC

間の切断を保証しない。また、図 5.5 から分かるように、閾値とクロストーク事象数に相関が無い。これにより、閾値が高いピクセルにおいてクロストーク事象数が少なくなるという可能性を否定できる。クロストーク事象数が少なくなるもう一つの要因として、評価対象のピクセルの周辺のピクセルが不良であることが挙げられる。この要因は、この場合のピクセル全てに対して、それらの周辺にあるピクセルでの X 線ヒット事象数やノイズ等を確認することにより検証できる。この検証を今後の課題とする。

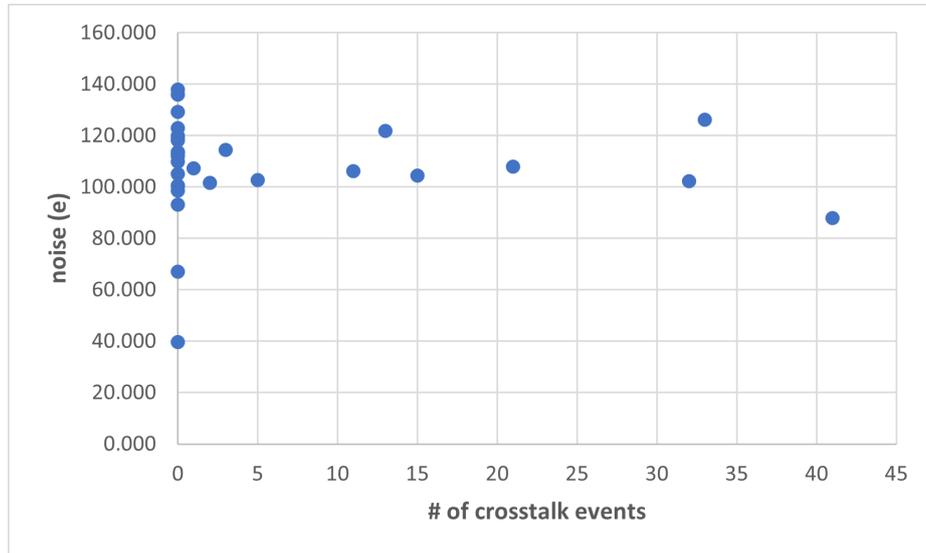


図 5.4: クロストークを用いた手法のみ不良判定したピクセルにおけるノイズとクロストーク事象数の相関。

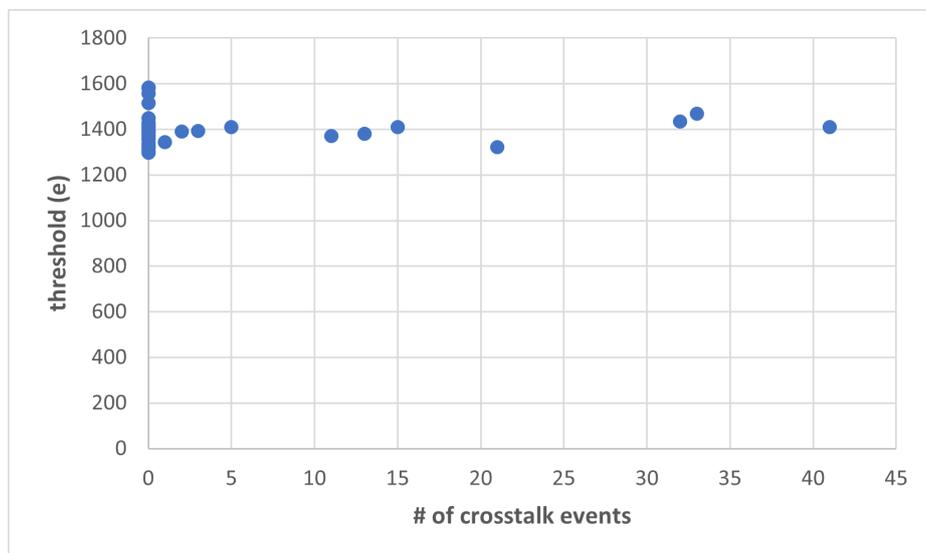


図 5.5: クロストークを用いた手法のみ不良判定したピクセルにおける閾値とクロストーク事象数の相関。

表 5.2: クロストークを用いた手法のみ不良と判定したピクセルにおけるノイズ、クロストーク事象数、閾値。

ノイズ (e)	クロストーク事象数	閾値 (e)
126.220	33	1467.67
39.7034	0	1336.84
102.242	32	1433.94
67.0916	0	1374.28
119.901	0	1425.95
119.087	0	1581.02
87.9486	41	1409.31
137.984	0	1326.58
107.956	21	1321.58
113.541	0	1450.00
121.892	13	1379.61
112.022	0	1304.84
105.049	0	1384.46
107.321	1	1343.01
135.955	0	1356.57
102.765	5	1409.52
100.551	0	1515.05
106.189	11	1370.72
98.6137	0	1369.34
118.087	0	1582.35
104.415	15	1410.17
114.344	3	1393.53
129.131	0	1555.64
112.904	0	1318.13
113.543	0	1389.10
101.558	2	1391.42
109.858	0	1420.45
123.009	0	1408.83
100.589	0	1298.52
93.1734	0	1394.41

5.2.3 低ノイズを用いた手法のみ不良と判定する場合

ある1台のピクセルモジュールにおいて、低ノイズを用いた手法のみ不良と判定したピクセルのノイズの分布を図5.6に示す。この図から分かるように、この場合のピクセルのノイズにおいてその平均値は70を超えており、“低ノイズ”の範囲(18.2e,81.1e)の上限側に偏っている。また、低いノイズの向きにテイルが伸びている。この傾向は、センサー接続されたピクセルでのノイズがばらつきにより“低ノイズ”の範囲に入ることにより起こる。

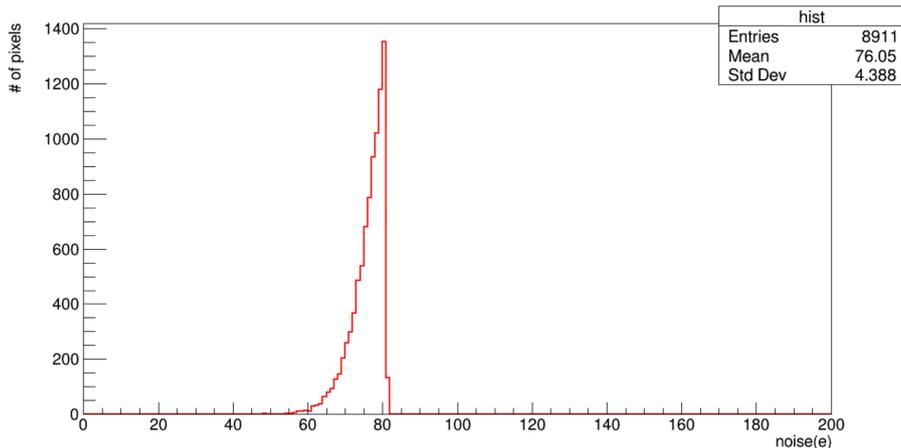


図 5.6: 低ノイズを用いた手法のみ不良と判定したピクセルにおけるノイズ分布の例。“低ノイズ”の範囲の上限 81.1 e 側に偏っており、ノイズが低い方にテイルが伸びている。

次に、この場合のピクセルに隣接する全ピクセルの内“低ノイズ”であるピクセルの数の分布を図5.7に示す。低ノイズを用いた手法における不良判定では、このようなピクセルの数が2以上であることを要求する。図5.7を確認すると、このようなピクセル数は2に偏る。これは、この場合のピクセルにおける不良判定がバンプのまとまった剥離とは無関係であることを示唆する。そこで、この場合のピクセルにおいて正しくバンプの剥離により不良判定されたかどうかを検討する。まず、この場合のピクセルの位置を調べた。その結果を図5.8に示す。バンプの剥離はセンサー-ASIC間の熱応力等により発生する。そのため、バンプの剥離はまとまったピクセルで起こる。しかし、図5.8より、不良判定されたピクセルはセンサー全体に広がる。これは、この場合のピクセルがバンプの剥離により不良判定されたという可能性を否定する。

以上の傾向は、実際にはセンサーと接続されているピクセルに対し、“低ノイズ”のピクセルが周囲に集まることで、不良と判定することを意味する。即ち、これらのピクセルにおいて、センサーと切断されているかは自明ではない。このことから、低ノイズを用いた手法による不良判定は正確ではない。

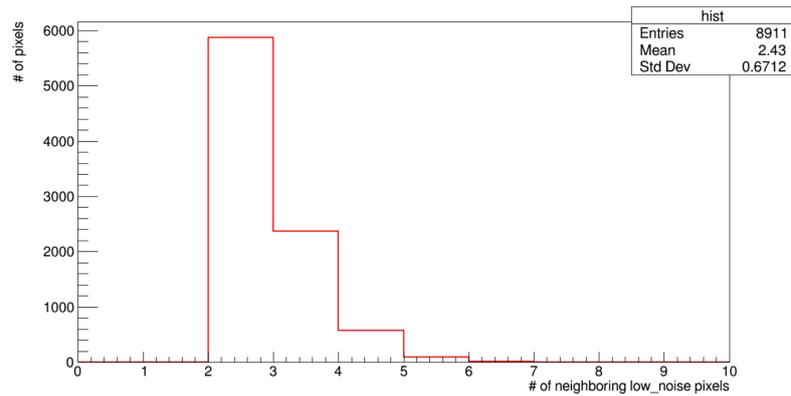


図 5.7: 低ノイズを用いた手法のみ不良と判定したピクセルに隣接する全ピクセルの内“低ノイズ”のピクセルの数の分布。

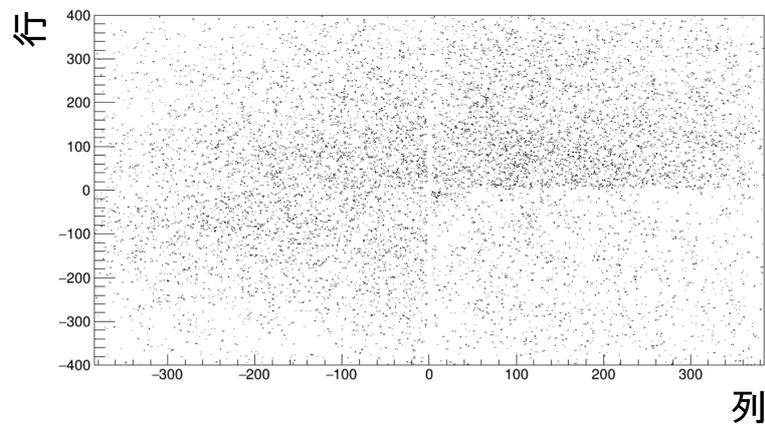


図 5.8: 低ノイズを用いた手法のみ不良と判定したピクセルのセンサー上での位置。

5.2.4 低ノイズを用いた手法のみ正常と判定する場合

図 5.9 から分かるように、この場合のピクセルにおけるノイズは“低ノイズ”の範囲内 (18.2e, 81.1e) にある。この場合で正常と判定する“低ノイズ”のピクセルにおいて、これに隣接する全ピクセルの内“低ノイズ”のピクセルの数は 1 以下である。これは、実際にはセンサー-ASIC 間が切断されているが周囲に切断が広がらなかったことを意味する。従って、この場合のピクセルに対する低ノイズを用いた手法による正常判定が間違いであると結論付けた。

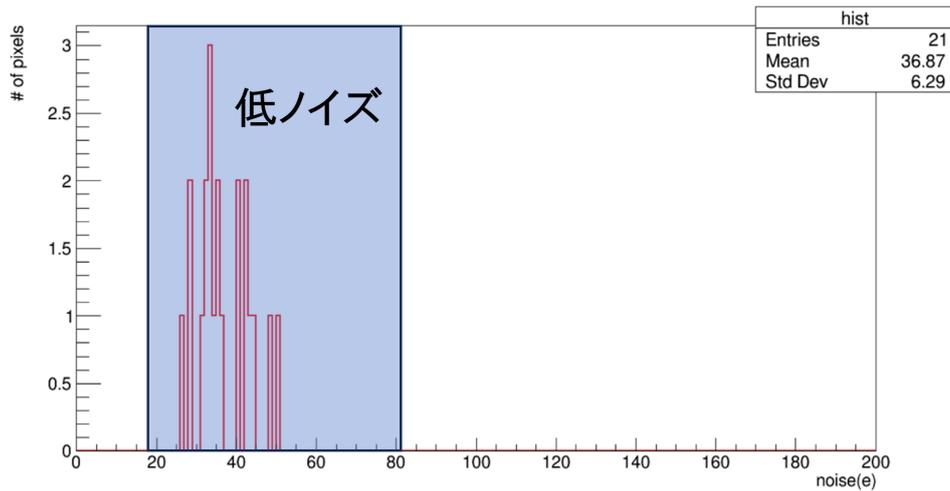


図 5.9: 低ノイズを用いた手法のみ正常と判定したピクセルにおけるノイズの分布の例。ノイズは全て“低ノイズ”の範囲内 (18.2e,81.1e) にある。

5.3 結果

この章では X 線を用いない不良ピクセル判定手法の正確性を評価した。クロストークを用いた手法が正確かどうかは、5.2.1 節と 5.2.2 節で述べたように、追求すべき課題が残っており、判断できない。一方、低ノイズを用いた手法に関しては、5.2.4 節で述べたように、バンプが剥離すること以外による不良ピクセルを正確に判別できない。これは、調査対象のピクセルが“低ノイズ”だとしても、それに隣接するピクセルの内同様に“低ノイズ”のものが 2 個以上無い限り不良と判定しないためである。また、5.2.3 節で述べたように、バンプの剥離が起こらなくても、“低ノイズ”のピクセルが広く分布することで、不良判定を出すことがある。これは、低ノイズを用いた手法の出す不良判定がバンプの剥離を保証しないことを意味する。以上のことから、この手法による不良判定は正確ではない。

第 6 章

議論

この章では、第 3 章で行った偽接続の評価と第 4 章で行った偽切断の評価について議論する。また、ピクセルモジュールの量産における X 線試験について議論する。

6.1 偽接続評価に関する議論

この節では、第 3 章で行った偽接続の評価の結果について議論する。

ここでは、図 3.1 に示すヒットの要因を検討する。

まず、ガウスノイズの要因を検討する。この議論では、5.1.1 節で定義したノイズをガウスノイズとして使う。

図 6.1 は、“基準 X 線試験”において、閾値を 1500e とした場合にガウスノイズ由来のヒットが起こる回数の期待値である。この期待値を導く際、式 6.2 で計算したヒットの確率と閾値をかける回数 (= $50000 \times 32 \times 250 = 4.0 \times 10^8$) を掛けた。ピクセル毎に測定されるガウスノイズは主に 100e から 200e の範囲にあるため、この図に示す期待値では、図 3.1 に示すヒット数を説明できない。従って、ガウスノイズは図 3.1 に示すヒットの要因ではない。

データ読出しにおいて閾値をかける操作を 1 回行う間にヒットが検出される確率を調べる。この確率の実測値 (P_{meas}) と予想値 (P_{exp}) はそれぞれ式 6.1 と式 6.2 から求まる。図 6.2 より、ヒットを検出する確率の理論値と実測値の間に相関が無い。これは、ヒットが起こる確率が高い時に多くのヒット事象が検出されるという予想に反する。この結果からもガウスノイズが図 3.1 に示すヒットにつながることを否定できる。

$$P_{meas} = \frac{\text{ヒット数}}{\text{データ読出し中に閾値をかけた回数}} \quad (6.1)$$

$$P_{exp} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\text{ノイズ [e]})^2} \int_{\text{閾値 [e]}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2(\text{ノイズ [e]})^2}} dx \quad (6.2)$$

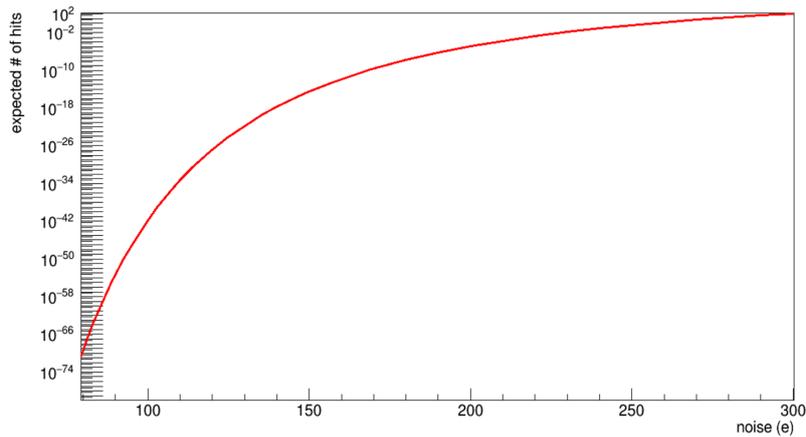


図 6.1: “基準 X 線試験”において、閾値が 1500 e の場合にガウスノイズ由来のヒットが起こる回数の期待値。

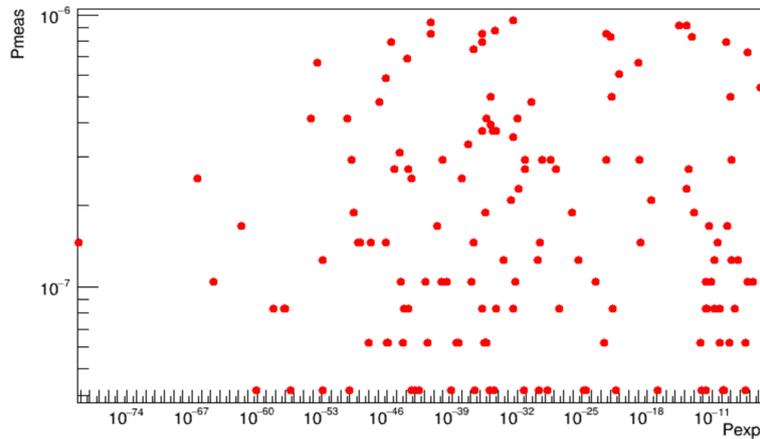


図 6.2: 閾値をかける操作 1 回当たりのヒットの確率の実測値 (Pmeas) と予想値 (Pexp) の相関。

次に、図 3.1 のヒットが宇宙線由来のヒット事象か検討する。図 3.1 を測定した実験はハヤシレピック第 3 工場の地下 1 階で行われたが、そこでの宇宙線レートは地表でのレート $1 [\text{hit}/\text{cm}^2/\text{min}]$ で代用できるとする。250 s 宇宙線にさらされた時、1 個のピクセルを通過する宇宙線の量の期待値は

$$1 [\text{hit}/\text{cm}^2/\text{min}] \times 2.5 \times 10^{-5} [\mu\text{m}^2] \times \frac{10 [\text{s}]}{60 [\text{s}/\text{min}]} = 4.2 \times 10^{-6}$$

である。偽接続が発生するためにはヒット事象数が 10 以上となる必要がある。1 個のピクセルを通過する宇宙線由来のヒットの数の期待値はせいぜい 4.2×10^{-6} であるため、これが 10 以上となることを棄却する。従って、宇宙線由来のヒットは図 3.1 に示すヒットの要因ではない。

続いて、電源等による特殊な周波数のノイズを受けている可能性を検討する。まず、単位時間当たりのヒット数 (これを「ノイズレート」と呼ぶ) を計算する。“基準 X 線試験”にお

いて、ヒットを検出する総時間は

$$800 \text{ [ns/trigger]} \times 50000 \text{ [triggers/s]} \times 250 \text{ [s]} = 10 \text{ [s]}$$

である。従って、図 3.1 に示すヒット数を 10 で割ることで、それに対応するノイズレートを求めることができる。求めたノイズレートの分布を図 6.3 に示す。この結果から、数ヘルツ程度のノイズレートが支配的である。また、特定のノイズレートに集中していることがないことから、特殊な周波数のノイズが原因で 3.1 に示すヒットが生じるという可能性を否定できる。

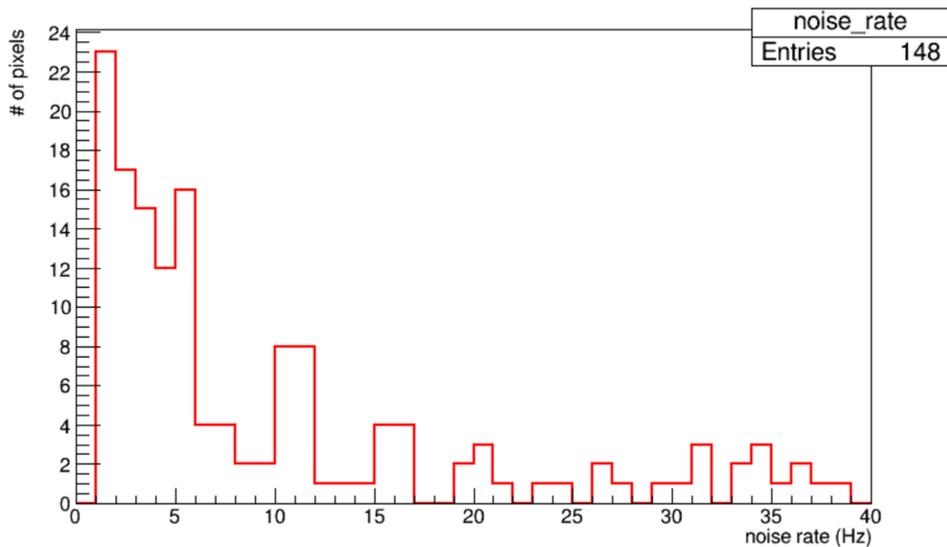


図 6.3: ノイズレートの分布

以上より、図 3.1 で見られるヒットがガウシアン雑音や宇宙線、電源等由来の特殊な周波数をもつノイズで説明できない。また、図 6.4 に示す閾値とヒット数の相関から、閾値が低いためにヒットが起きやすいという予想にも反する。図 3.1 に示すヒットの要因を検討する別の方法として、特定のトリガーの時間帯でヒットが多く検出されるかどうかを調べることが挙げられる。これにより、外部由来のサージノイズによる影響があるかどうかを検証できる。時間の都合上、これを今後の課題とする。

6.2 X線試験における必要試験時間のばらつきに関する議論

この節では、第 4 章で行った偽切断の評価で求めた必要試験時間のばらつきに関する議論を行う。

必要試験時間のばらつきの要因として以下の 3 つが挙げられる。

1. 最小期待値のばらつき

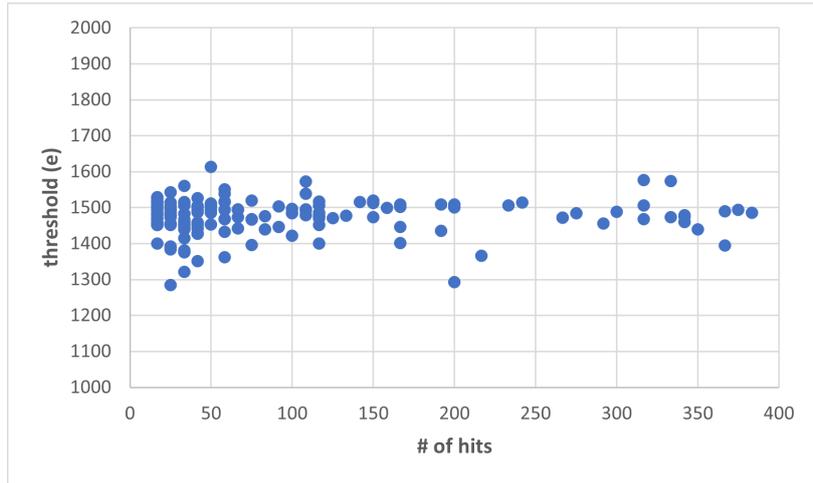


図 6.4: 閾値とヒット数の相関

2. 取得したデータ量のばらつき
3. ピクセルモジュールの設置位置の精度

まず、一つ目の要因について検討する。図 4.7 より、“基準 X 線試験”におけるヒット数の最小期待値についてその平均値 33.5 ヒットに対して 7.1 ヒットのばらつきをもつ。表 4.1 に示すように、ヒット数の最小期待値の誤差は 1 ヒット未満である。従って、この要因だけでは必要試験時間のばらつきを説明できない。

次に、二つ目の要因について検討する。必要試験時間を見積もる際に使用した 18 個のデータに対して、閾値をかけて検出したヒットを取得できた回数 (以下「イベント数」と呼ぶ) を数えた。データ読出し中に、この操作をソフトウェアを用いて個々の chip に対して行うことができる。イベント数はデータ読出しに用いる PC の性能により、閾値をかける操作を行った回数より少ない。閾値をかける操作を行った回数 (N_e) に対するイベント数 (N_r) の割合を chip1 に対して求めた結果を図 6.5 に示す。この割合は、その平均 0.95 に対して 0.01 ばらつく。これは、図 4.7 に示すヒット数の最小期待値の平均値 33.5 ヒットに対して $33.5 \times 0.01 / 0.95 = 0.4$ ヒットのばらつきを生む。一つ目の要因に加えてこの要因を考慮しても図 4.7 に示す最小期待値のばらつきを説明できない。

最後に三つ目の要因である。この要因は、図 4.1 に示す必要試験時間の最大値 283s と最小値 147.2s の導出に用いた X 線試験の二次元マップを比較することにより検証できると考える。そこで、閾値を掛ける操作を行う際にヒットを検出する確率が 4×10^{-6} 未満のピクセルをそれぞれの場合で示したものを図 6.6a と図 6.6b に示す。これらの図において、X 線中心から離れることで全体的にヒットの確率が 4×10^{-6} 未満となるピクセルがセンサーの隅付近に集まる。図 6.6a と図 6.6b を比較すると、ヒット数の最小期待値をもつピクセル領

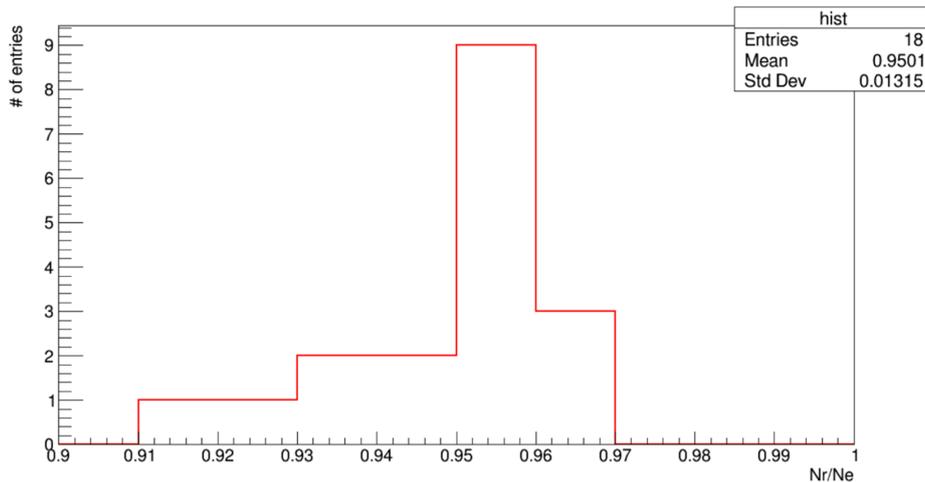


図 6.5: 閾値をかける操作を行った回数 (Ne) に対するイベント数 (Nr) の割合を chip1 について求めた結果。他の chip についても概ね同じ結果を示した。

域がこの領域に入る割合が異なる様子が見られる。これらの様子^{*1}から、最小期待値をもつピクセル領域と X 線中心の距離が前後することでヒットの確率が変わることにより必要試験時間が変わるという予想が立つ。そこで、二つの図上に黒い線で囲んだ 2 つの範囲でのヒット数の非対称度により、X 線中心のずれの度合いを評価する。この度合いと必要試験時間に相関があれば、前述の予想を検証できる。この検証を今後の課題の一つとする。X 線試験における試験時間の判断はこの検証の結果に基づく。

6.3 量産における X 線試験

高輝度 LHC ATLAS 実験で使うために量産するピクセルモジュールの性能を評価する必要がある。この評価は図 6.7 に示す各量産過程の前後で行われる。評価項目は、ピクセルモジュールの外観検査や質量測定、ピクセルモジュールのサイズの計量、周囲の温度を変化させた場合のピクセルモジュールの動作の評価、検出器の閾値の評価や信号読み出し試験等である。これらの評価は、2024 年初期からおよそ 2 年間かけて 2800 台量産されるピクセルモジュール全てに対して行う必要があり、一つの評価項目に掛ける時間を可能な限り短くしたい。そこで、量産するすべてのピクセルモジュールに対して全ての評価項目を完了するために必要な作業者の人数や物資の数等を評価するシミュレーションが行われた [8]。このシミュレーションでは、X 線試験による不良ピクセル評価に対して 10 min 以内の試験時間を想定する。現在ハヤシレピック第 3 工場で行っている量産に割り当てられた作業者の人数や資材数等はこのシミュレーションに基づく。

^{*1} 偽切断の評価に用いたすべてのモジュールについて同様にヒットの確率を 4×10^{-6} 未満に制限した図を付録 C に示す。X 線中心のずれの向きと必要試験時間に相関が見られる。

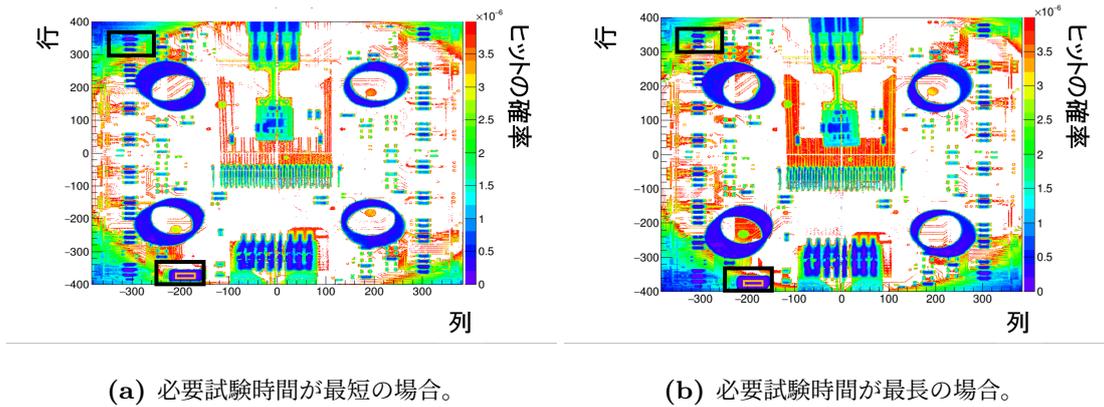


図 6.6: ヒットの確率が 4×10^{-6} 未満のピクセル。センサーの隅付近に集まったピクセルでは、X 線
 の中心から離れているためにヒット数が減った。黒で囲んだ部分を異なる必要試験時間をも
 つデータ間で比較すると、隅に現れるピクセル領域のサイズが異なる様子を確認できる。左
 下の部分には最小期待値を見積もる際に用いたピクセル領域がある。この領域を薄い橙で囲
 んだ。

X 線試験に必要な試験時間はまだ調査中である。10 min 以内の試験時間を実現できた場
 合、X 線試験は量産に影響しない。

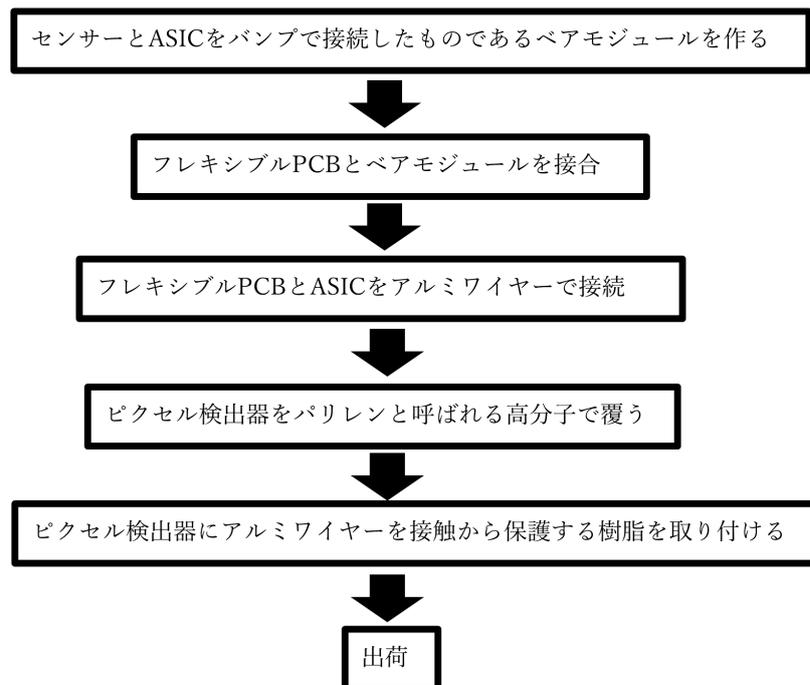


図 6.7: ピクセルモジュールの生産過程。

第7章

結論

X線試験の偽接続の評価の結果、“基準 X 線試験”において偽接続が起こる確率が現在のデータの統計の範囲内では許容範囲内にあることを示した。しかし、偽接続が不良ピクセル判定の正確性に与える影響に関してはまだ検証中である。偽切断の評価の結果、X線試験の必要試験時間がデータ毎にばらつくことが分かった。そのため X 線試験により不良ピクセルを正確に判定できる測定条件の確立には至らなかった。X 線試験に必要な測定時間を決めるためには、必要試験時間のばらつきの原因を特定する必要がある。

X線を用いない不良ピクセル判定手法の正確性を X 線試験を基に評価した。低ノイズを用いた手法において、バンプの剥離により複数まとまったピクセル不良がある場合以外は、センサー-ASIC 間の切断を正確に判定できないことが分かった。また、“低ノイズ”のピクセルがセンサー上に広く分布することにより、バンプの剥離が起これなくても不良判定を出すことも分かった。このような要因により、低ノイズを用いた手法においてピクセルが正常かどうかを正確に判定できない。一方で、クロストークを用いた手法についてはその正確性に関わる知見が得られなかった。

謝辞

博士前期課程入学から修士論文執筆までにいろいろな方々の支援を頂きました。

指導教員の南條創教授には、勉強や研究のやり方だけでなく研究に対する向き合い方を教わりました。研究に行き詰まったり進路に悩んだりしたときによく話を聞いてくださいました。また、ミーティングでの議論中には回答に困って悩んでいる間も自分の状況を聞くまで辛抱強く待ってくださいました。研究室では、進捗に応じたアドバイスを誰よりも早くしてくださいました。学会発表前には概要やスライドに関する有益なアドバイスを誰よりも多くしてくださいました。

廣瀬穰助教にはよく発表用のスライドを論理的に作成するようにと辛口コメントをいただきました。自分がまだ M1 だった時、ミーティング中に順序を特に考えずに発表していた時、意図を明確に伝えるコツを教えてくださいました。また、どのような実験をすると良さそうかについて一緒に考えてくださいました。出張中に実験が進まず次の一手に悩んだ時、リモートで実験に付き合ってくださいました。

KEK の山中卓名誉教授は、自分が旧山中研究室に所属していた時の指導教員でした。研究を遂行する上で必要な知識と考え方をたくさん教わりました。精神的に追い詰められて研究室にしばらく行かなかったとき、「何か悩んでいるみたいだけど、話を聞きますよ。」と退職直前にわざわざメールを送ってまで話を聞いてくださいました。その時の印象が大きく、山中さんには今でも頭が上がりません。

KEK の生出秀行助教は、本研究の実験用セットアップの仕組みやソフトウェアの中身について詳しく教えてくださいました。研究遂行中に実験用の装置関連で悩んだ時はよく相談にのってくださいました。毎週のミーティングでは、実験に関するアドバイスをたくさん頂きました。

KEK の中村浩二助教は、X 線試験関連の先行研究について教えてくださいました。実験遂行中にトラブルを起こした時も的確な指示を頂き、何とか大事に至りませんでした。

KEK のポスドク研究員の板橋浩介さんとは、KEK 出張時に一緒に作業することが多かったです。本研究で解析作業を遂行している間も、実験装置周りの疑問に教えてくださいました。本研究の解析の都合上、ハヤシレピックで作業している間も可能な限り時間を確保して追加のデータを取得してくださいました。

筑波大学の比江森友太さん、柳瀬健太郎さんは、本研究の遂行に必要な情報を共有してくださいました。

阪大 ATLAS グループの先輩である Lakmin Wickremasinghe さんは、ピクセルモジュール周りの原理や実験の状況について詳しく教えてくださいました。ミーティング中も、研究テーマが違うにもかかわらず、積極的にアドバイスをしてくださいました。

同グループの同期である久郷莉奈さんに関しては、研究テーマは違いますが、一生懸命実験に打ち込む姿には刺激を受けました。

同グループの後輩である泉尾翼さんは、まだ M1 の段階でわからないことも多いはずなのにまっすぐな精神で研究を遂行していました。その姿を見て、自分も負けられないなと思いました。

阪大 KOTO グループに所属する白石諒太さん、Mario Gonzalez さん、小野啓太さん、北川歩さん、川田悠統さん、柴田哲平さん、森岡樹さん、片山舞さんとは、研究以外の話題でよく話をしました。柴田哲平さんとは日常的に話をすることが多く、退屈せずに研究を遂行できるきっかけを下さいました。川田悠統さんの独特な個性には、刺激を受けることが多かったです。二人とも何のしがらみ無く話せる良き仲間です。

研究室の後輩である安藤彰洋さんは、M1 の頃に初めてできた後輩の一人です。彼のまじめで勉学や研究に熱心な姿は今でも印象に残ってます。

研究室の B4 である小川大樹さん、北野至さん、住村明紀さんが勉学と研究に励む姿には刺激を受けました。

研究室の秘書である前田純子さんには、事務関連の手続きでお世話になりました。出張や物品の購入の際はその手続きの詳細について丁寧に教えてくださいました。

そして、M2 になるまで学業だけでなく生活面でも多大の支援をしてくださった家族には頭が上がりません。深く感謝申し上げます。

最後に、今までの学業や研究の中で関わってきた全ての方々に感謝の意を表します。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 et al 2008 JINST 3 S08003, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider
- [3] 岩田和志, HL-LHC ATLAS 実験ピクセル検出器量産時の X 線を用いたバンプ接続の評価, 2022,
https://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/theses/master/2021/MasterThesis2021_Iwata.pdf.
- [4] 荒久田周作, 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, 2023,
https://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/theses/master/2022/MasterThesis2022_Arakuta.pdf
- [5] AMETEK, Mini-X2 X-Ray Tube, <https://www.amptek.com/products/mini-x2-x-ray-tube>
- [6] <https://gitlab.cern.ch/YARR/YARR>
- [7] https://sensirion.com/media/documents/4B40CEF3/61642381/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT85_Datasheet.pdf
- [8] 鈴木淳博, HL-LHC ATLAS 実験のためのピクセルモジュールの量産工程フローの予測と設計, 2022,
<https://kds.kek.jp/event/41394/contributions/209397/attachments/154320/195957/16pA562-6.pdf>
- [9] 柳瀬健太郎, HL-LHC ATLAS 実験に向けたワイヤプロテクション付き ITk ピクセルモジュールの熱サイクルおよび放射線耐性評価, 2023,
<https://kds.kek.jp/event/48246/contributions/249410/attachments/171442/225539/17pRC21-06.pdf>

付録 A

データ化けによる偽のヒットとデータ転送量の関係

この章では、3.3 節で述べたデータ化け由来の偽接続のデータ転送量に対する依存性について調べた結果を述べる。

まず、図 3.3a に示すようにピクセルモジュールの内側半分の領域のピクセルをディセイブルにした。次に、60s の X 線試験を行った際に、ディセイブルにした領域のピクセルにおいてソフトウェアが誤ってヒット判定した回数を数えて、それをトリガーレート [kHz] で割った。これを、トリガーレートを 10 kHz、20 kHz、30 kHz、40 kHz、50 kHz と変えながら行った。さらにこの操作を、管電流を 10 μ A、20 μ A、30 μ A、40 μ A、50 μ A、60 μ A、70 μ A、80 μ A と変えながら繰り返した。その結果を図 A.1 に示す。この結果から、トリガーレートが高くなるにつれて 1 回のトリガーあたりにソフトウェアで偽のヒットを認識する確率が高くなるのが分かる。またこの確率は、管電流が大きくなるにつれて高くなることも分かる。これは、単位時間中に検出した X 線由来のヒットの量 (データ転送量) が多いほどデータ化けによる偽接続が起りやすいことを意味する。

この実験を行った時に使用したファームウェアは一つ古いバージョンのものである。最新版のファームウェアにおけるデータ転送量の限界 (データ転送容量) はこの実験で用いたファームウェアにおけるデータ転送容量の二倍となっている。そのため最新版のファームウェアを用いることで、さらに多くのデータ転送量に対応できるようになるべきである。しかし、最新版のファームウェアで信号読み出しを正常に完了するためには、50 kHz のトリガーレートに対して 40 μ A までしか管電流を上げられない。この原因の追究は今後の課題である。

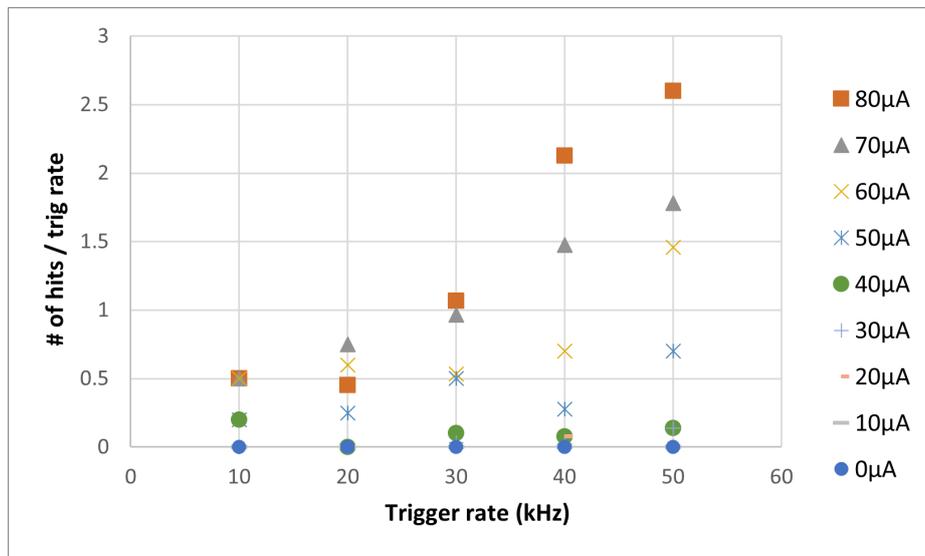


図 A.1: 1回のトリガーあたりの偽のヒット事象数。異なる凡例は異なる管電流に対応する。

付録 B

偽接続の評価に用いた各データにおけるフィットの結果

この章では、偽切断の評価で行った最小期待値の見積もりに使ったフィットの結果を示す。

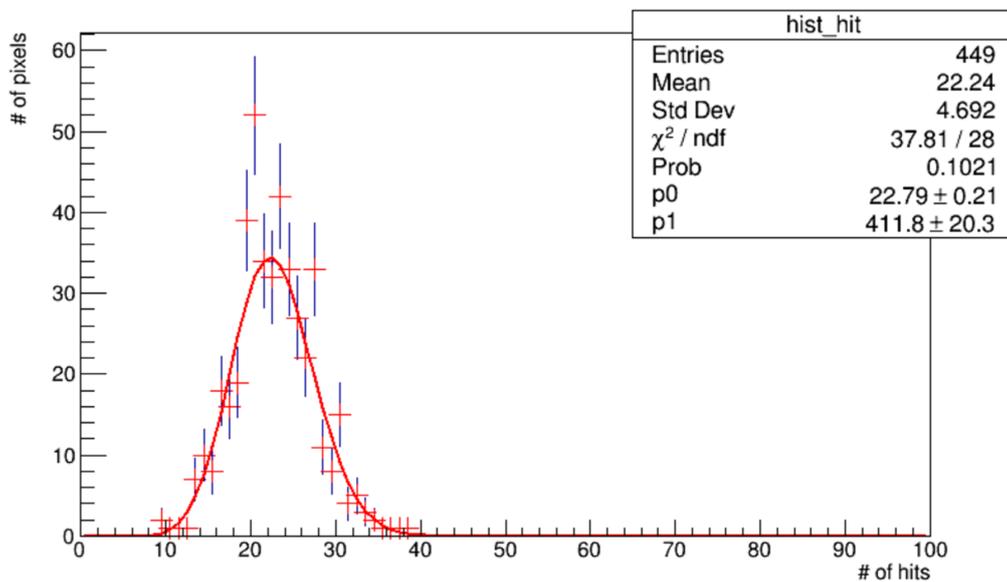


図 B.1: データ番号 1 でのフィットの結果。

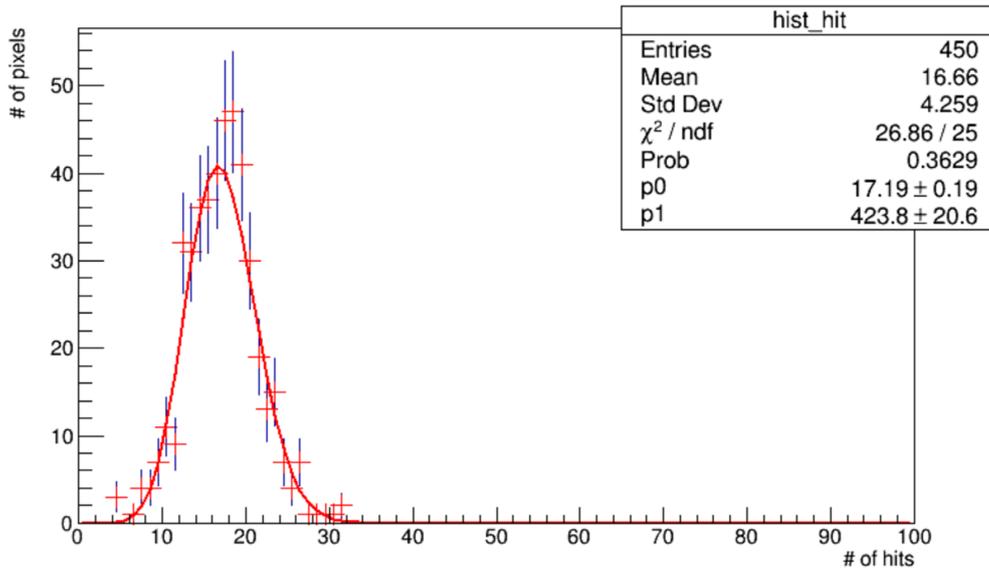


図 B.2: データ番号 2 でのフィットの結果。

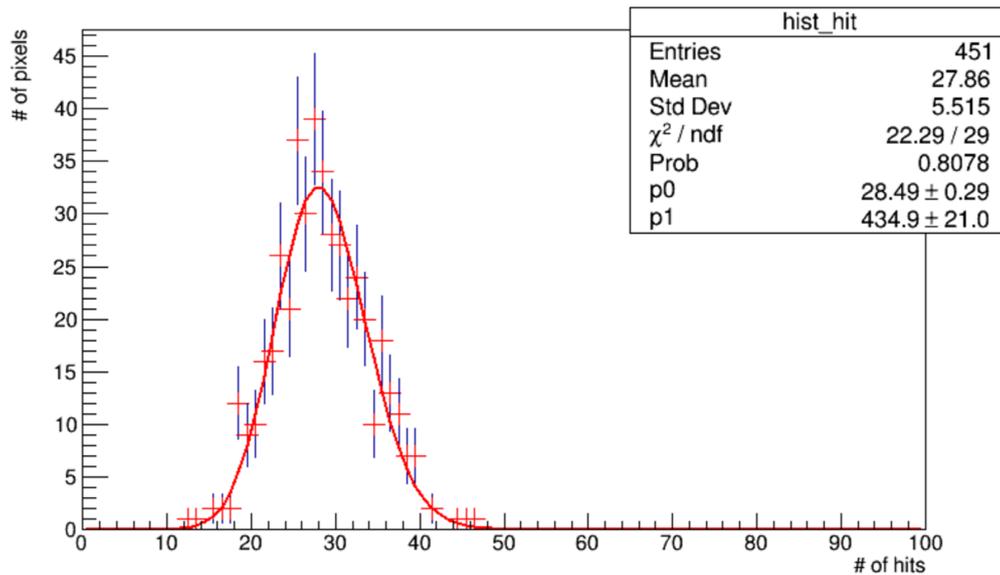


図 B.3: データ番号 3 でのフィットの結果。

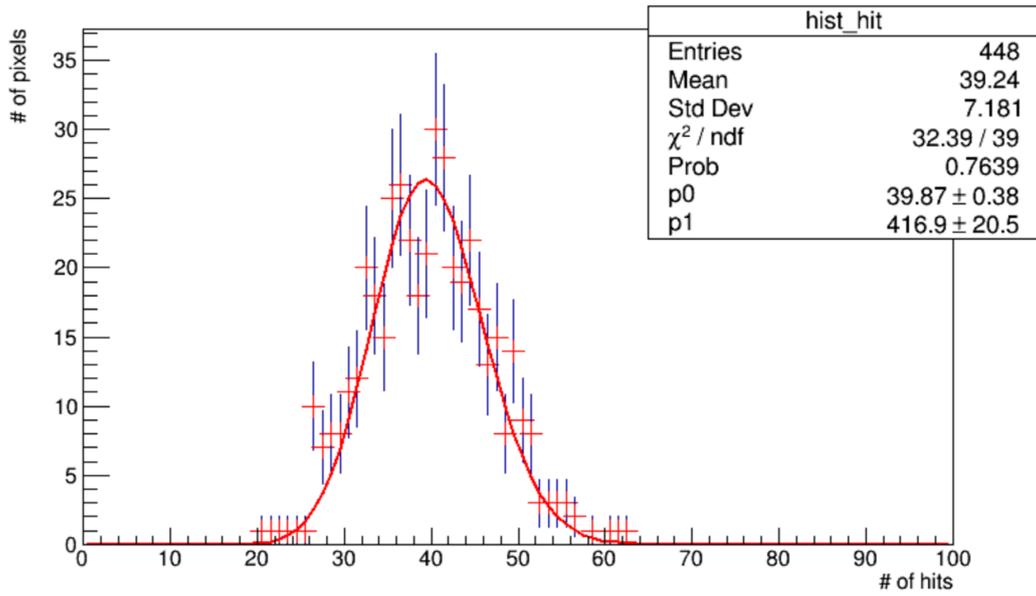


図 B.4: データ番号 4 でのフィットの結果。

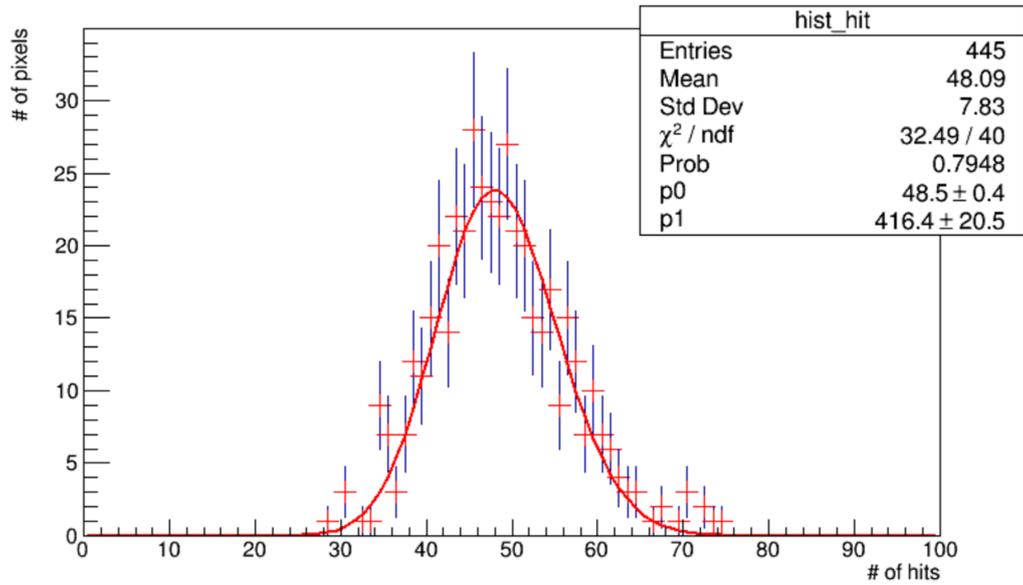


図 B.5: データ番号 5 でのフィットの結果。

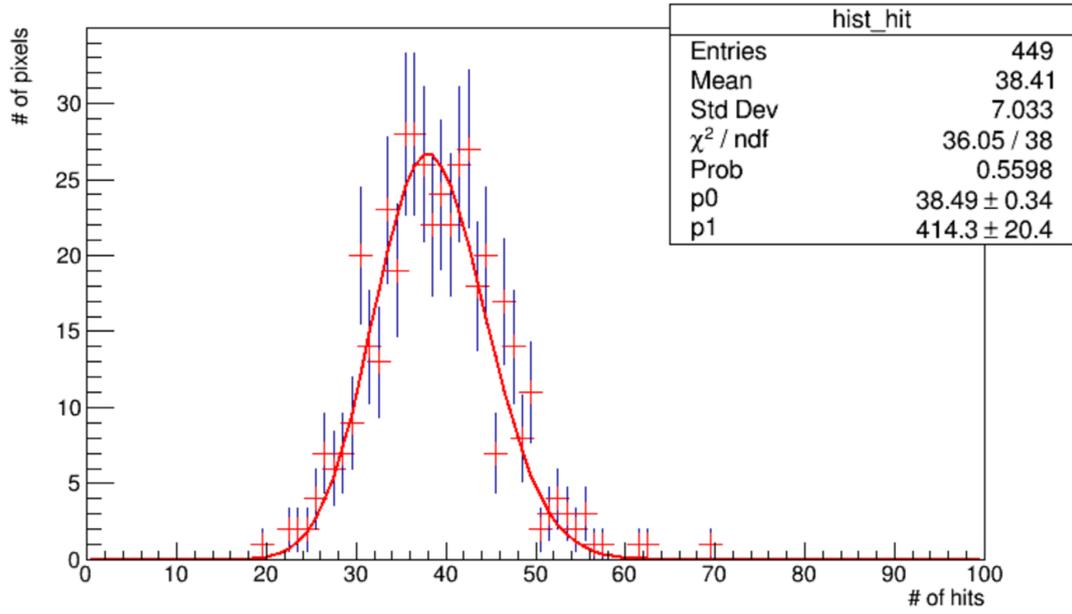


図 B.6: データ番号 6 でのフィットの結果。

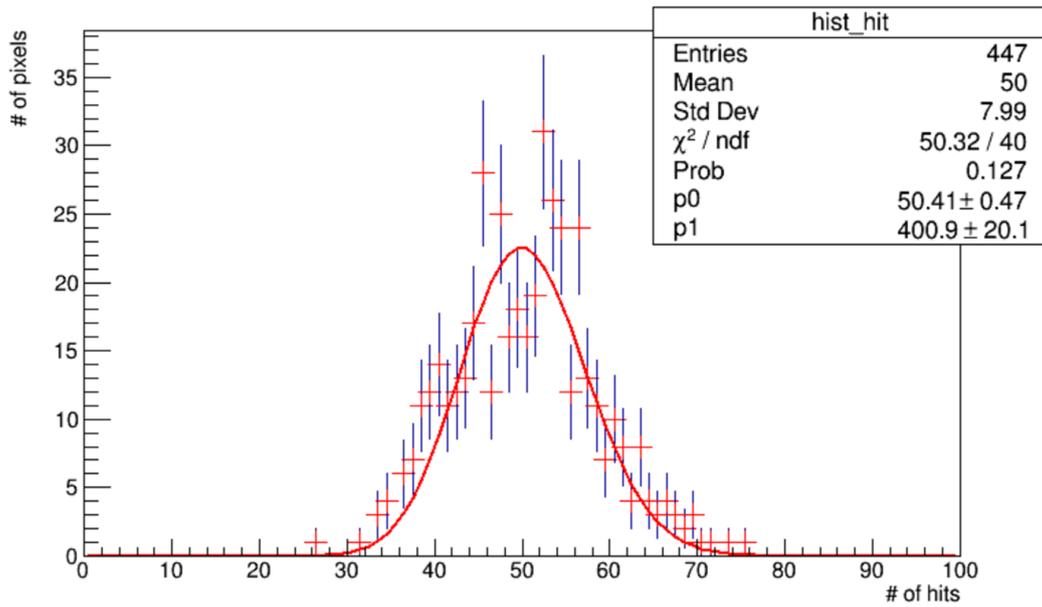


図 B.7: データ番号 7 でのフィットの結果。

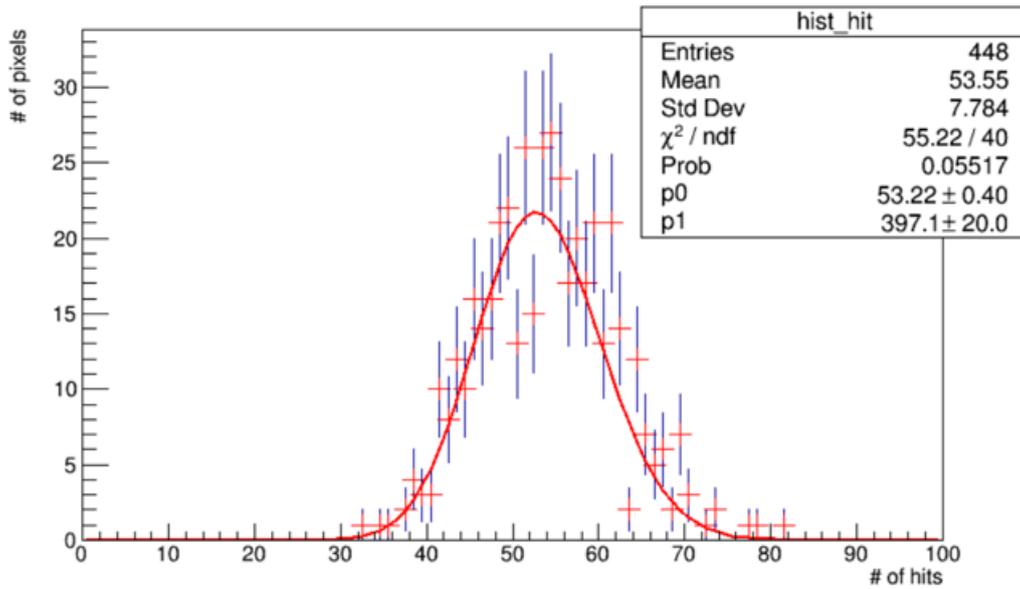


図 B.8: データ番号 8 でのフィットの結果。

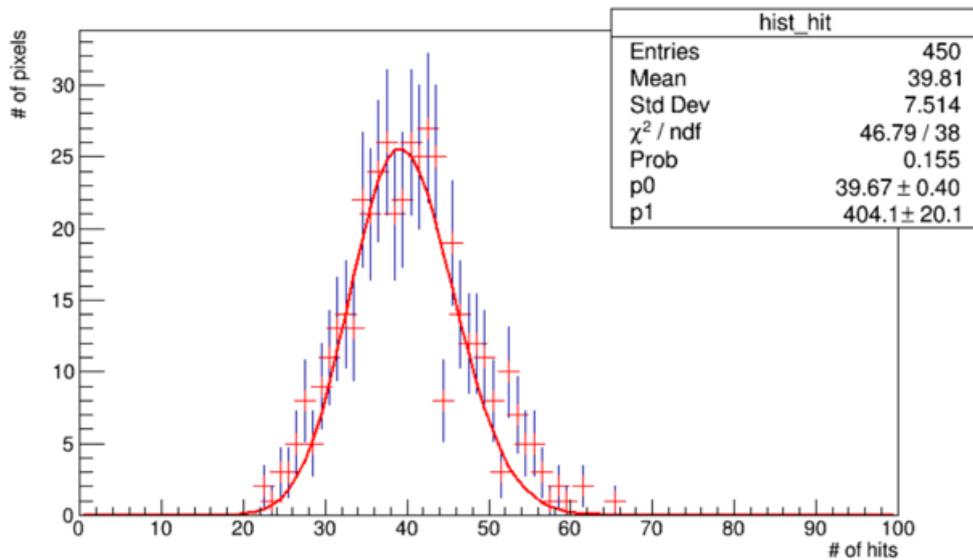


図 B.9: データ番号 9 でのフィットの結果。

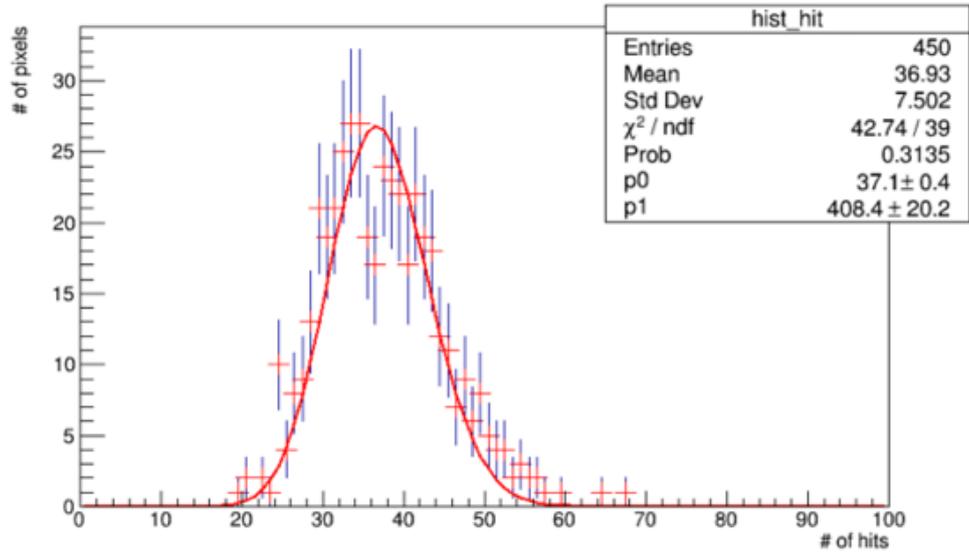


図 B.10: データ番号 10 でのフィットの結果。

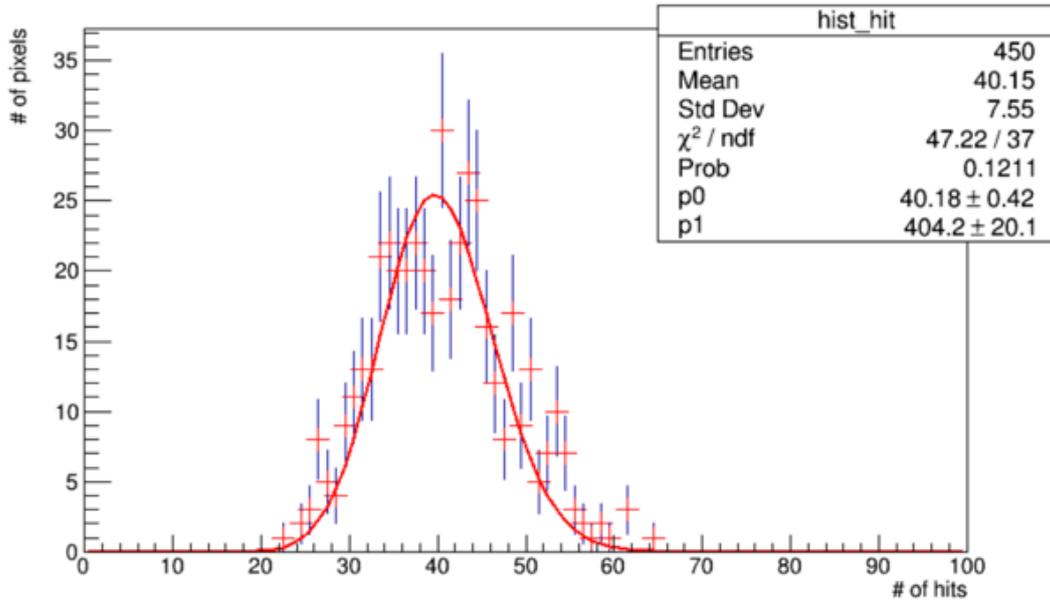


図 B.11: データ番号 11 でのフィットの結果。

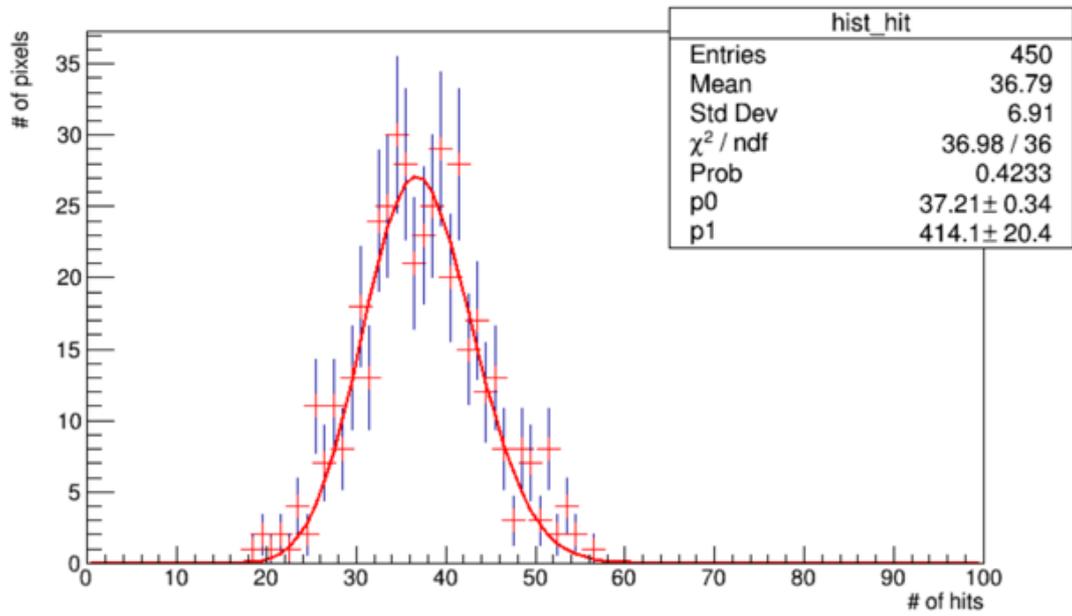


図 B.12: データ番号 12 でのフィットの結果。

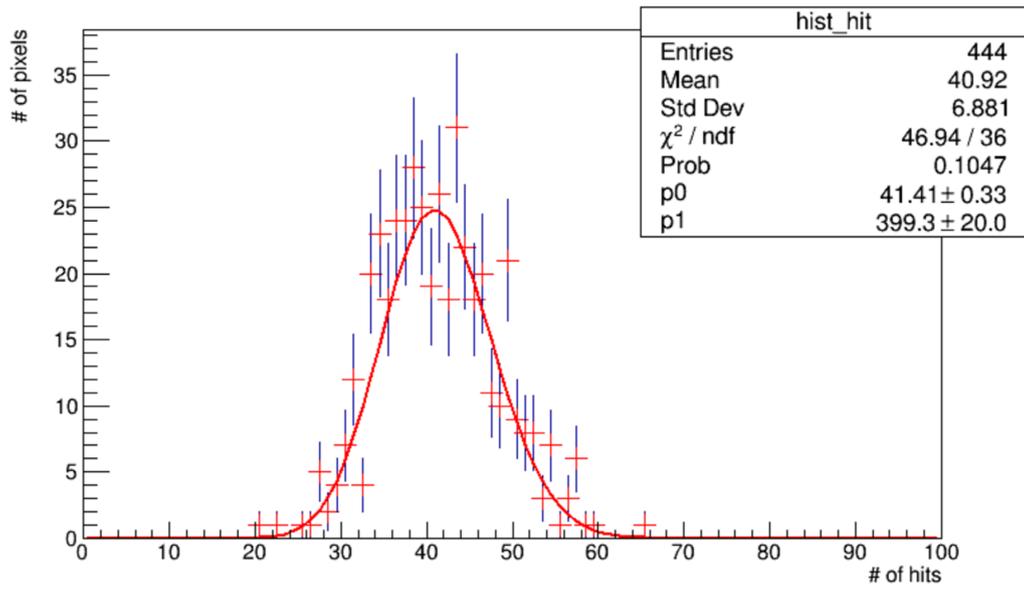


図 B.13: データ番号 13 でのフィットの結果。

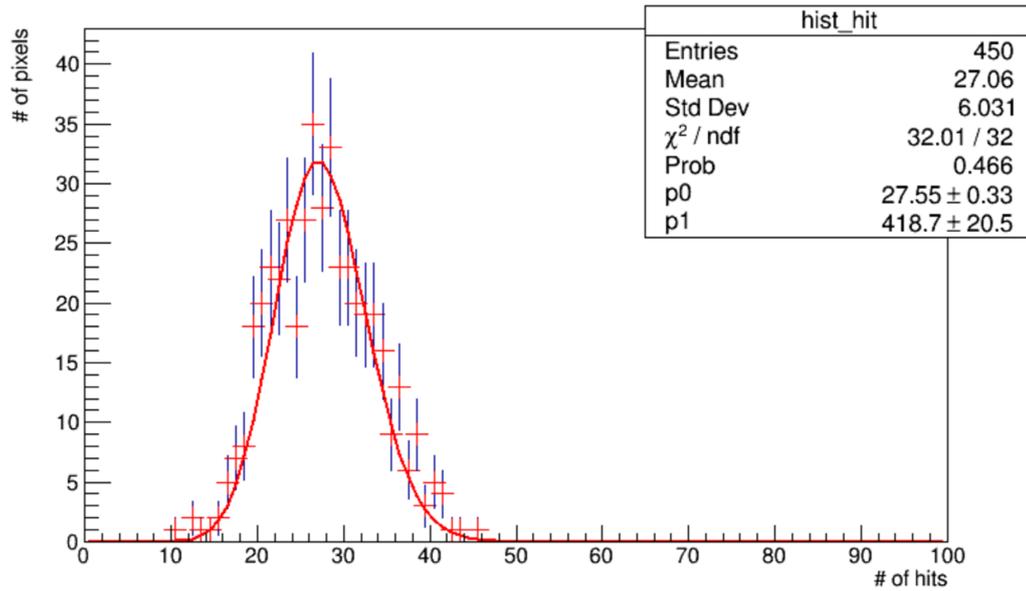


図 B.14: データ番号 14 でのフィットの結果。

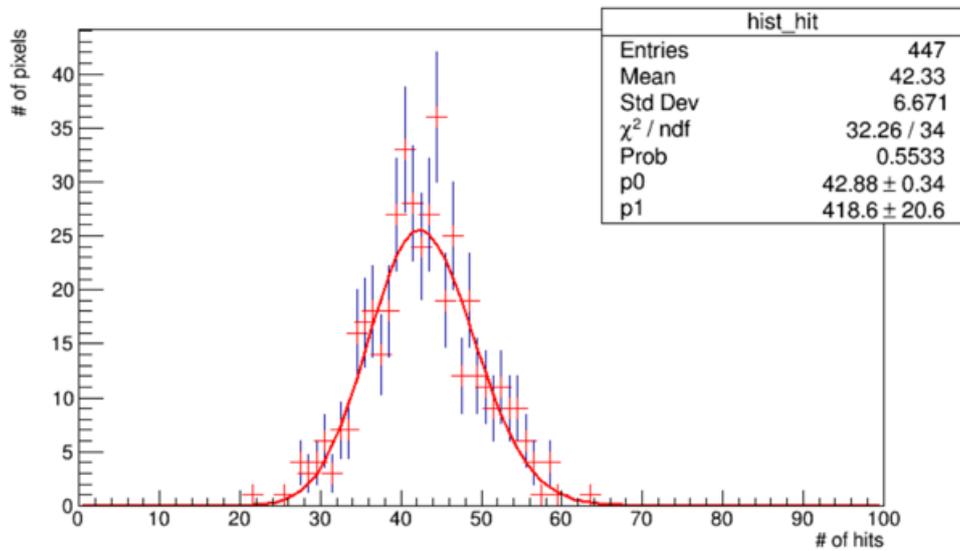


図 B.15: データ番号 15 でのフィットの結果。

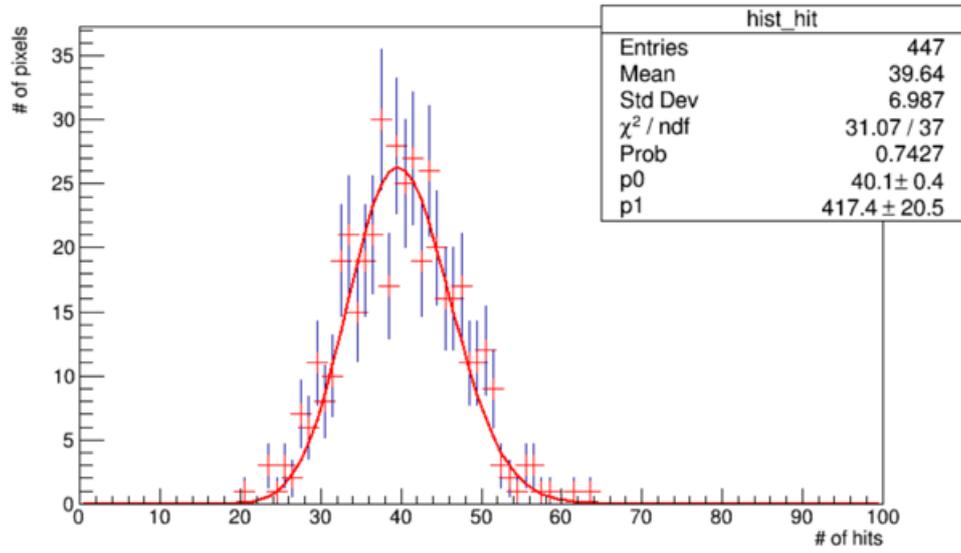


図 B.16: データ番号 16 でのフィットの結果。

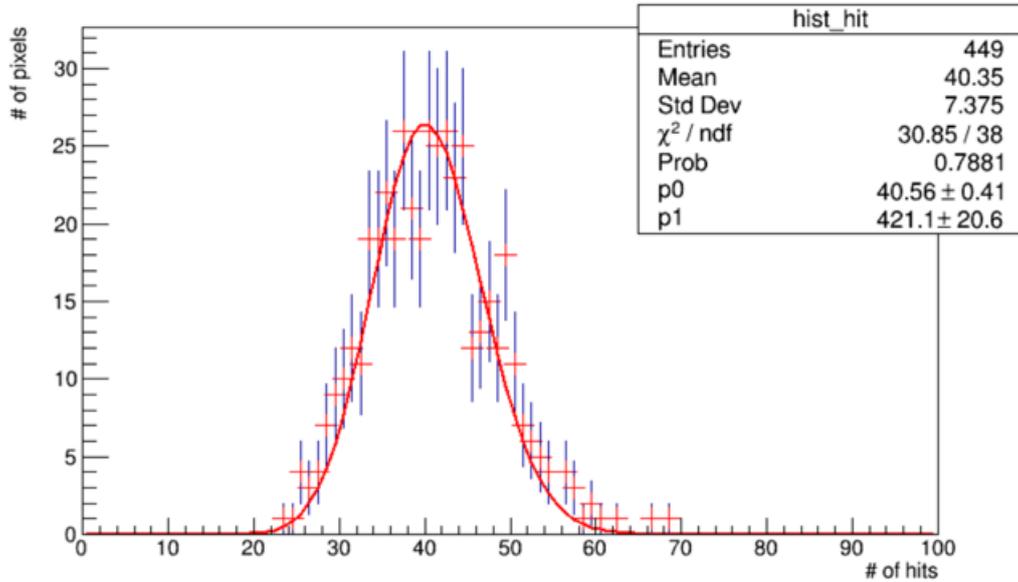


図 B.17: データ番号 17 でのフィットの結果。

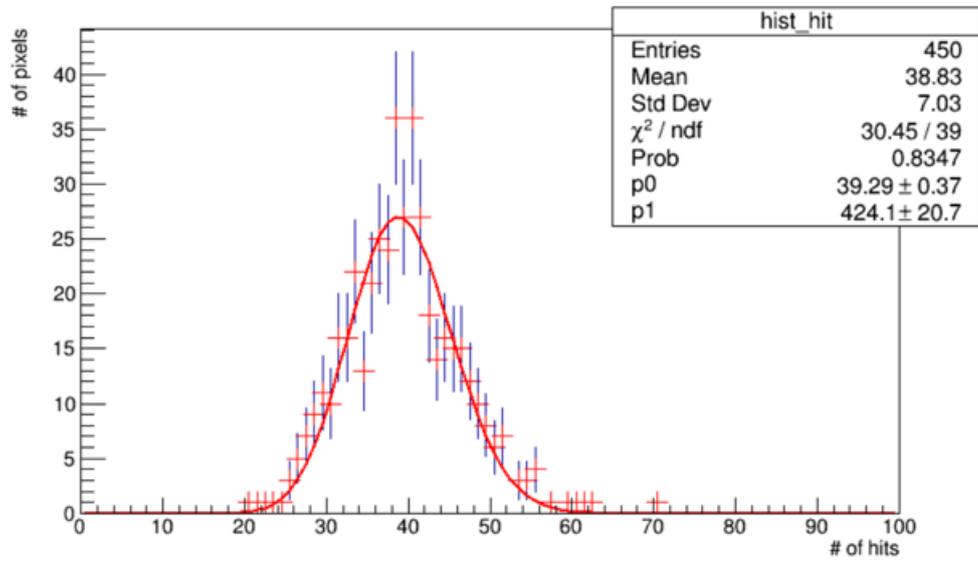


図 B.18: データ番号 18 でのフィットの結果。

付録 C

モジュールの位置精度が X 線ヒット 事象数に与える影響

この章では、6.2 節で X 線ヒット中心と必要試験時間の関係を議論した際に用いた図を、偽切断の評価に用いたすべてのデータについて作ったものを示す。

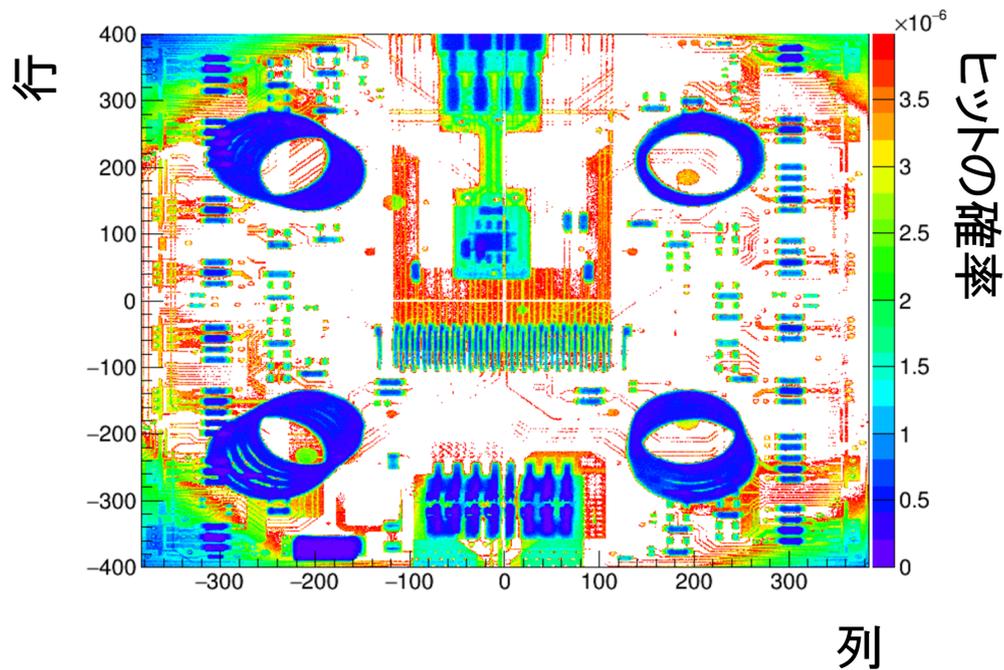


図 C.1: データ番号 1 での様子。この場合の必要試験時間は 183.9 s である。

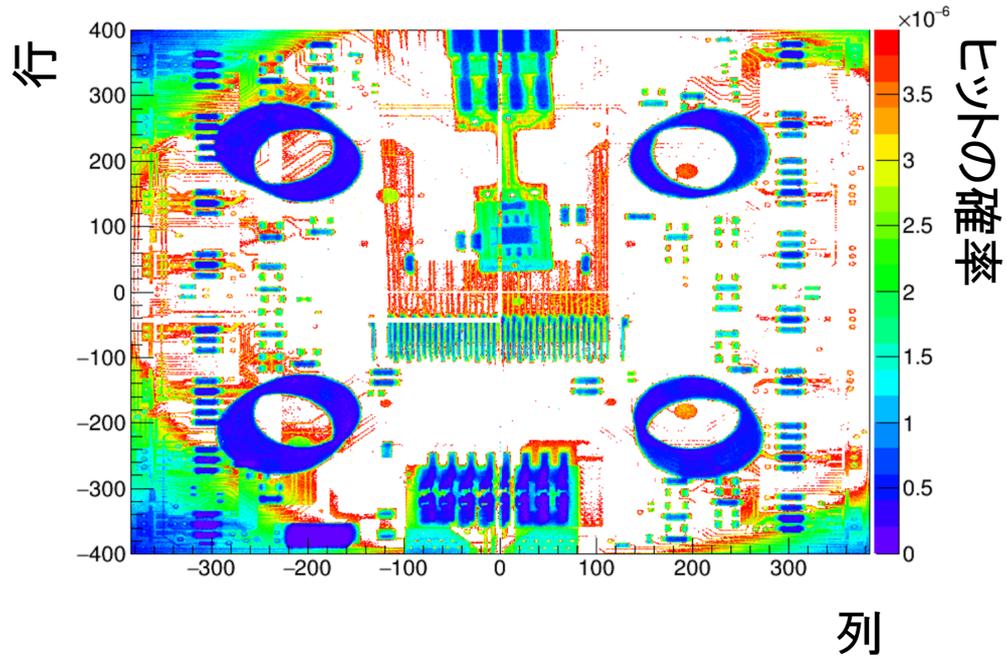


図 C.2: データ番号 2 での様子。この場合の必要試験時間は 244 s である。

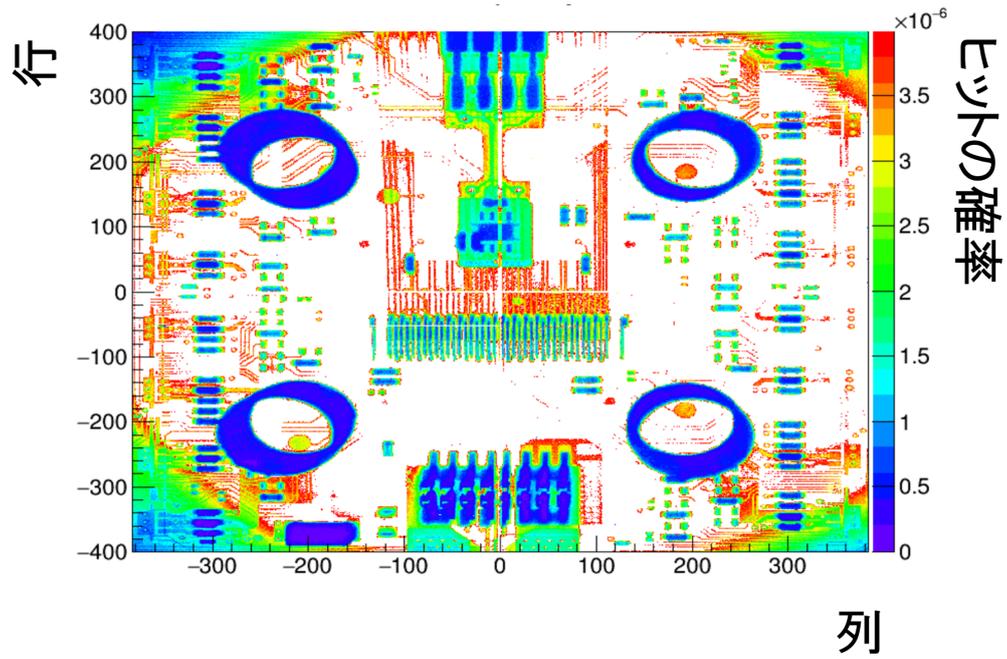


図 C.3: データ番号 3 での様子。この場合の必要試験時間は 147.2 s である。

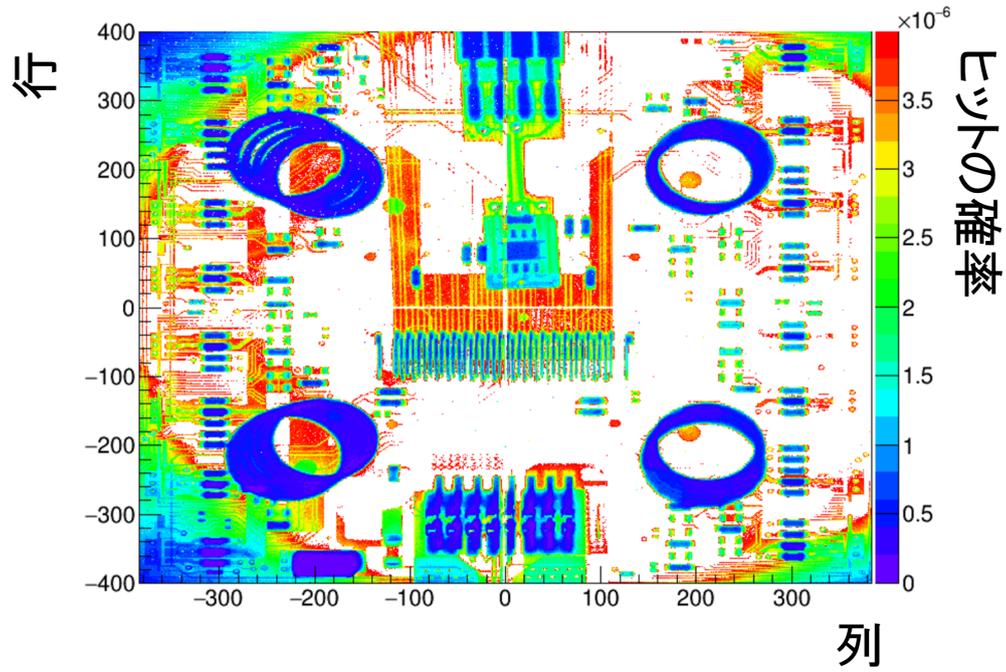


図 C.4: データ番号 4 での様子。この場合の必要試験時間は 263 s である。

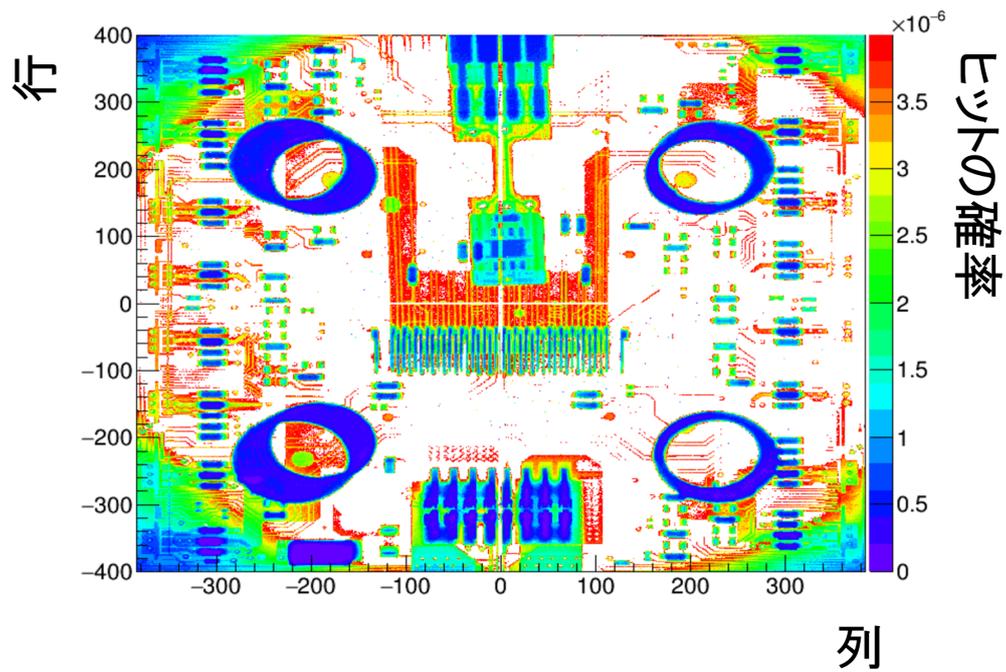


図 C.5: データ番号 5 での様子。この場合の必要試験時間は 216.2 s である。

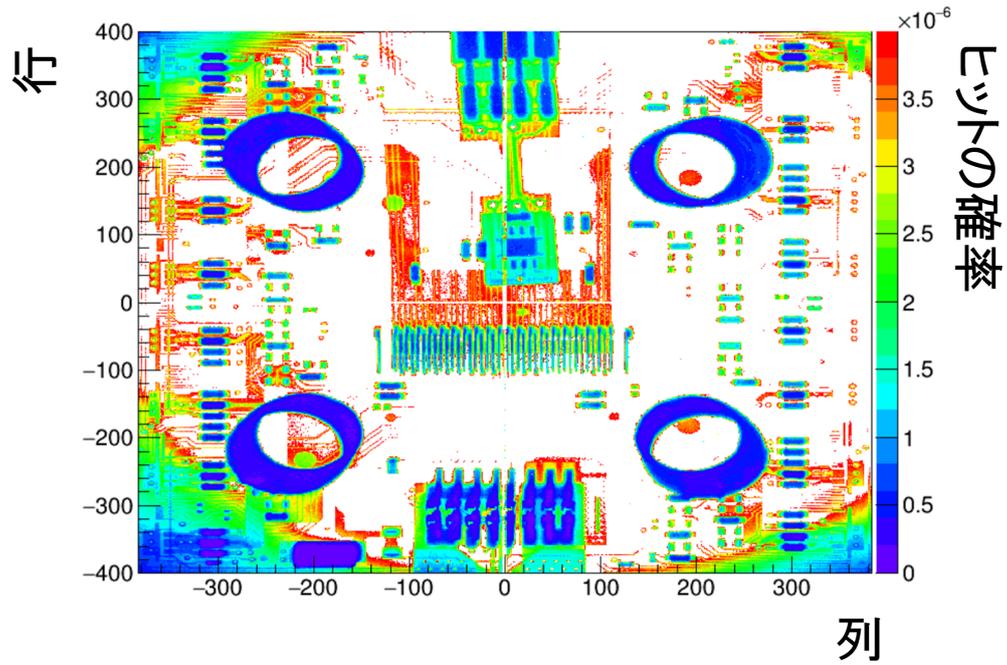


図 C.6: データ番号 6 での様子。この場合の必要試験時間は 272 s である。

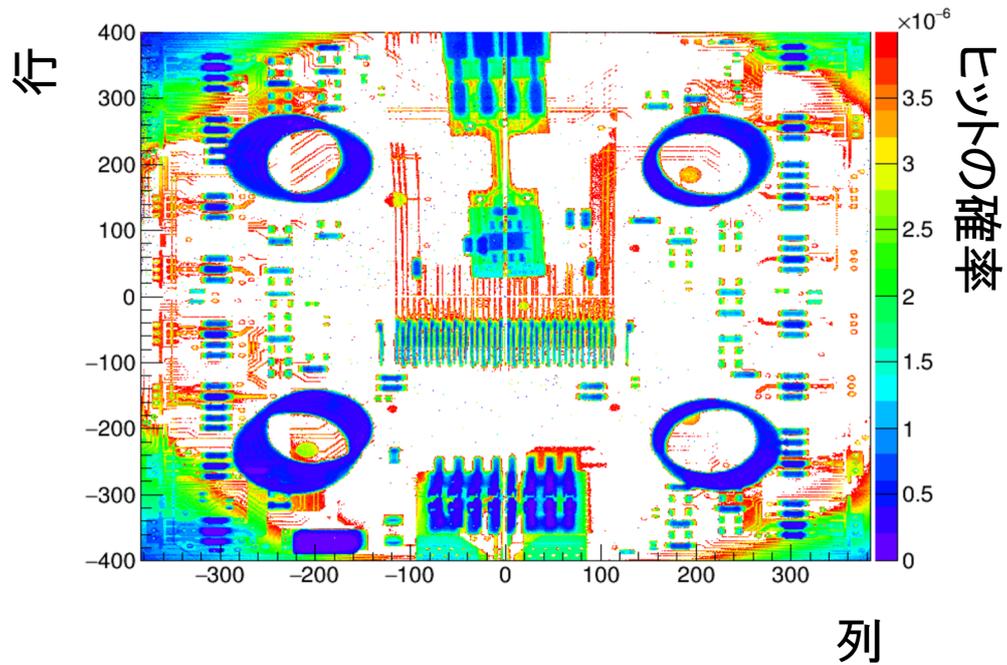


図 C.7: データ番号 7 での様子。この場合の必要試験時間は 208 s である。

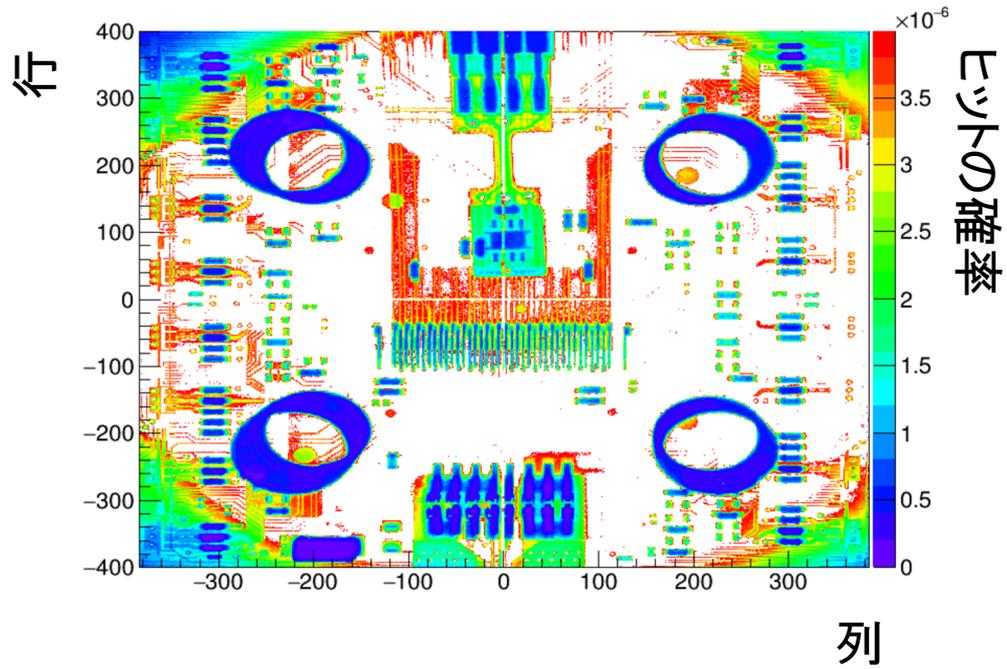


図 C.8: データ番号 8 での様子。この場合の必要試験時間は 197.1 s である。

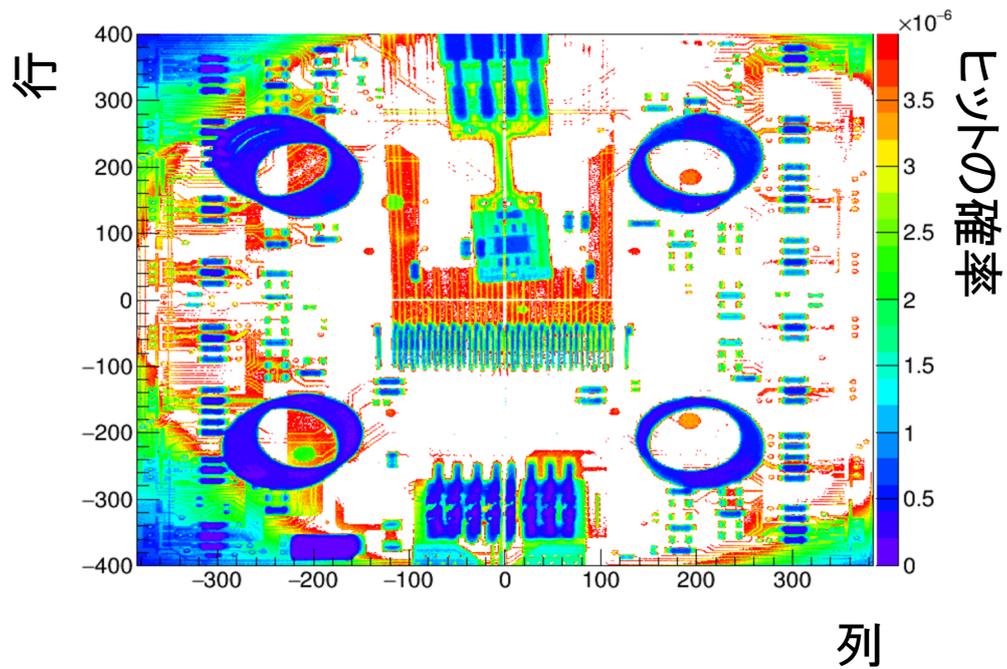


図 C.9: データ番号 9 での様子。この場合の必要試験時間は 264 s である。

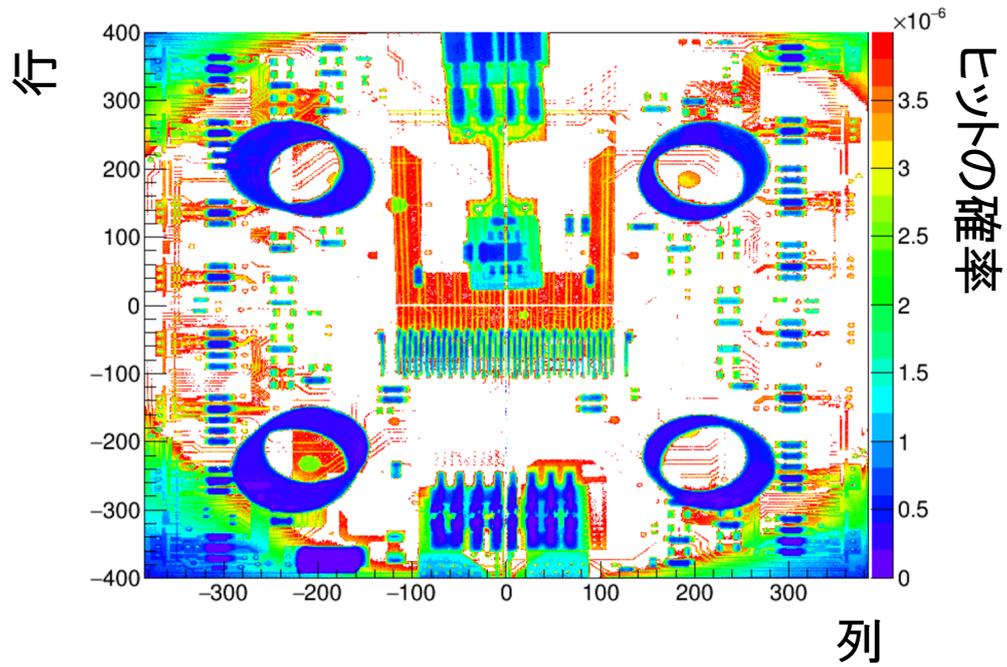


図 C.10: データ番号 10 の様子。この場合の必要試験時間は 283s である。

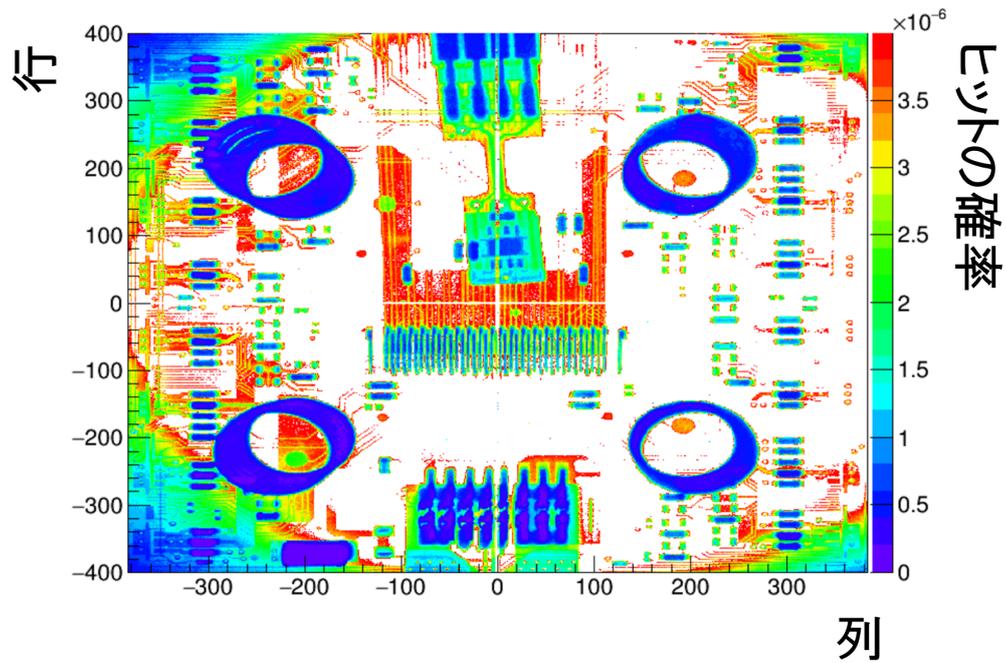


図 C.11: データ番号 11 の様子。この場合の必要試験時間は 261s である。

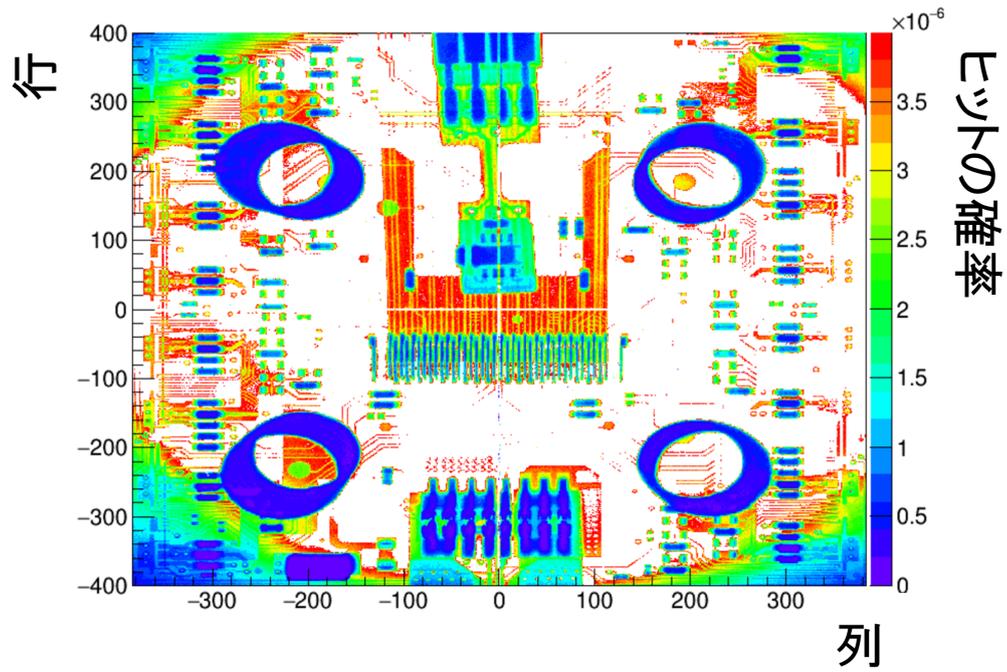


図 C.12: データ番号 12 の様子。この場合の必要試験時間は 282s である。

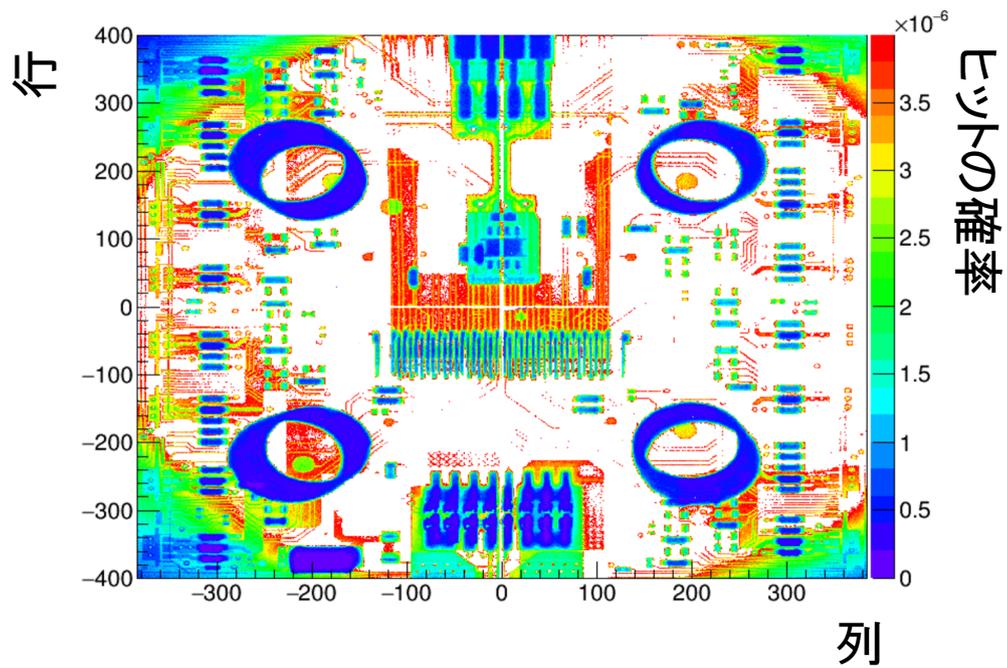


図 C.13: データ番号 13 の様子。この場合の必要試験時間は 168.8s である。

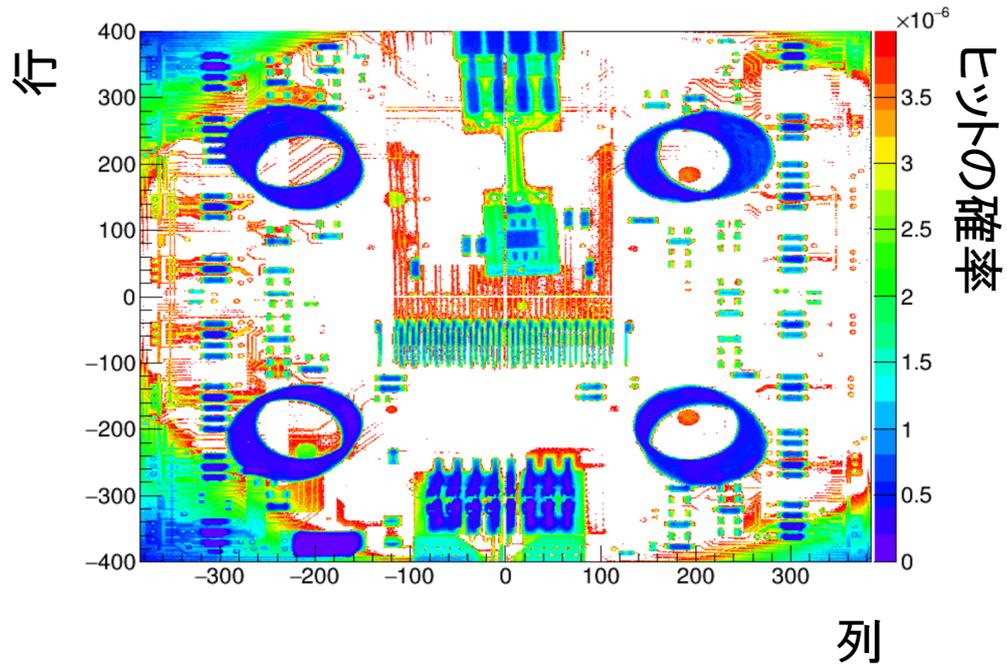


図 C.14: データ番号 14 での様子。この場合の必要試験時間は 253s である。

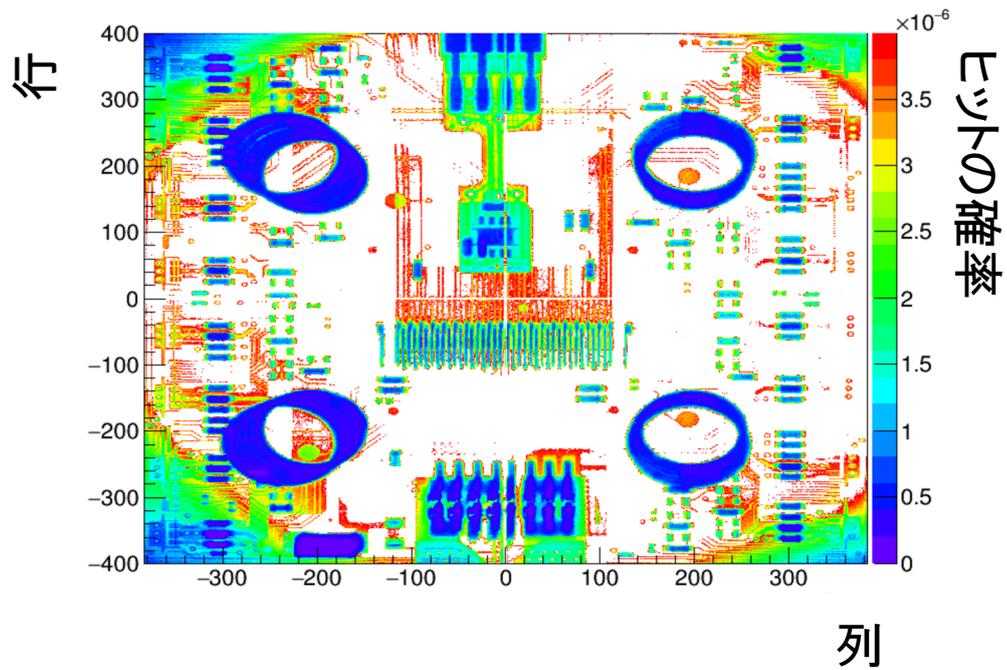


図 C.15: データ番号 15 での様子。この場合の必要試験時間は 162.9s である。

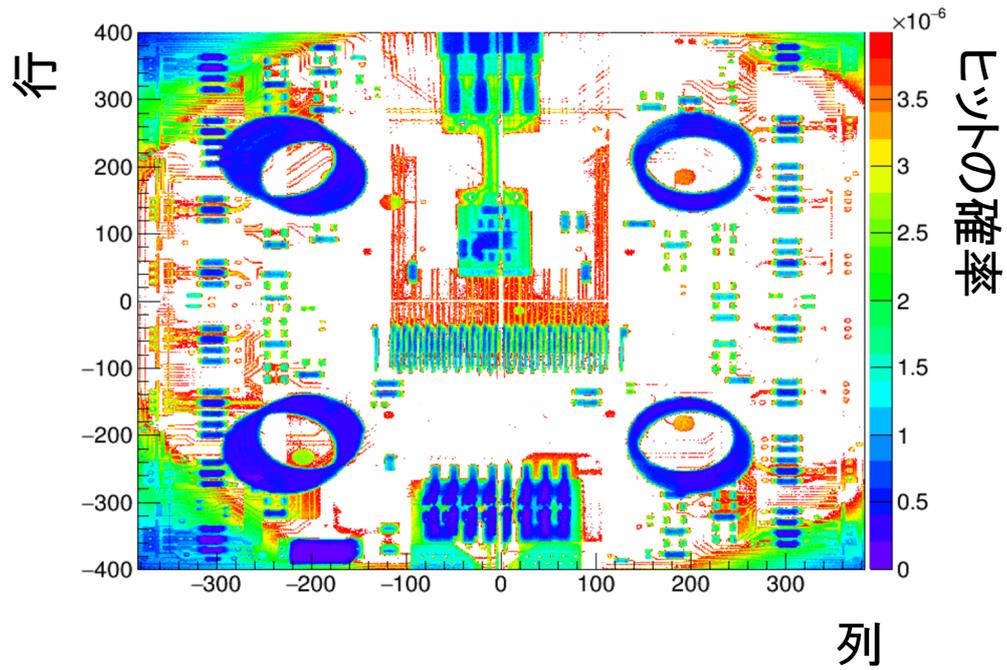


図 C.16: データ番号 16 での様子。この場合の必要試験時間は 174.3s である。

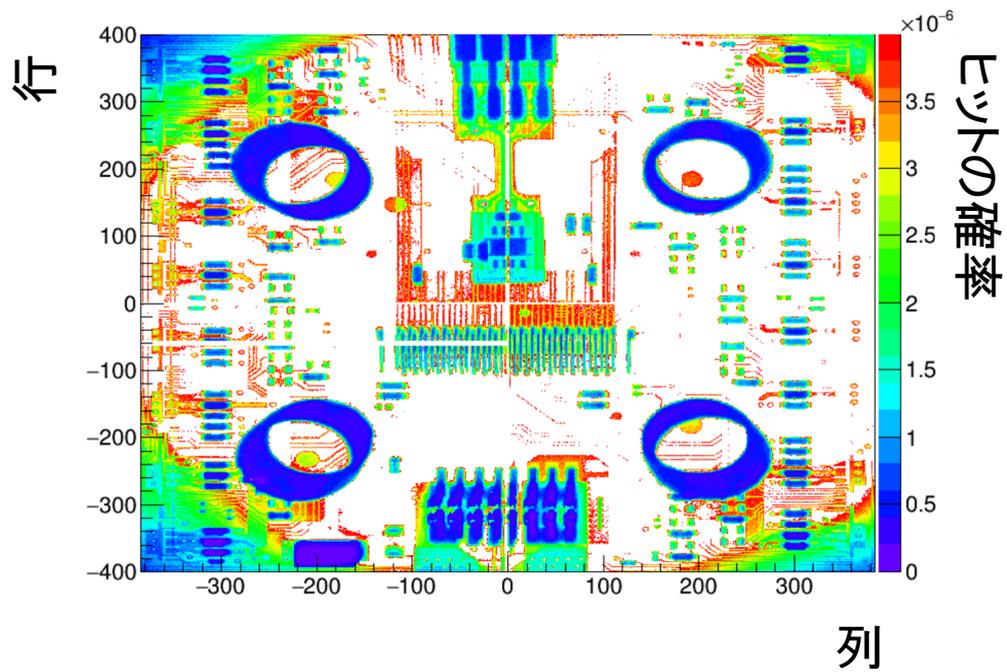


図 C.17: データ番号 17 での様子。この場合の必要試験時間は 172.2s である。

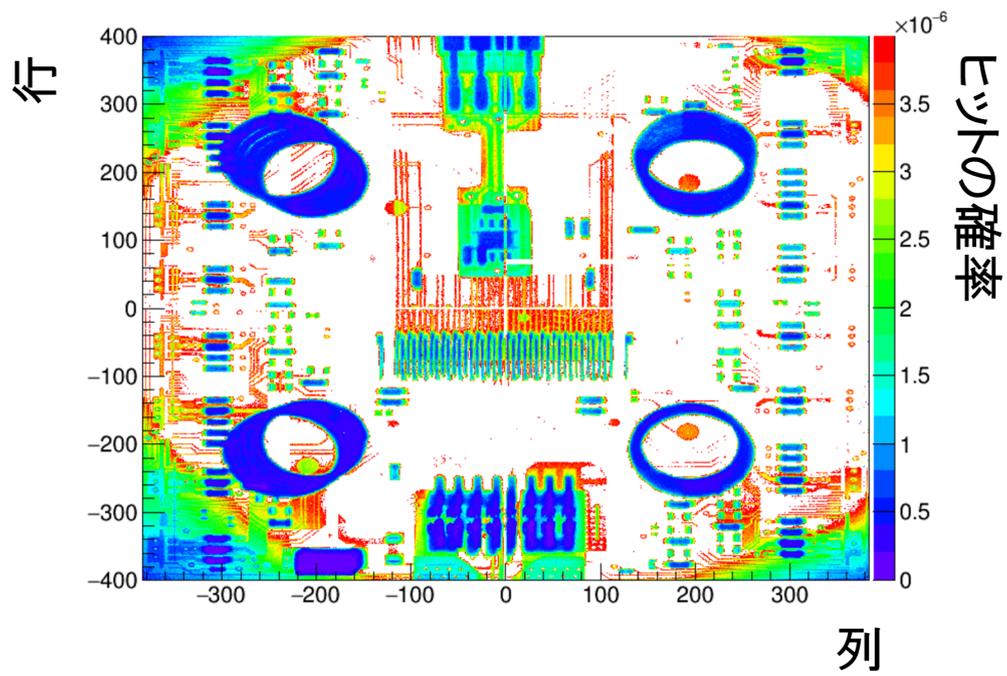


図 C.18: データ番号 18 での様子。この場合の必要試験時間は 177.9s である。