

修士論文

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

大阪大学大学院 理学研究科物理学専攻
山中 卓研究室 博士課程前期2年

岩田 和志

2022年2月

概要

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) で行われている ATLAS 実験では、素粒子の性質の精密測定や、標準模型の枠組みを超える新物理の発見を目指している。この研究のさらなる発展のために 2027 年以降 LHC ビームの輝度を上げる High Luminosity LHC (HL-LHC) 計画がある。それに伴い検出器の最内層のピクセル検出器を全て新しいものに入れ替える。日本グループは新型ピクセル検出器のモジュール 2,000 個の量産に向けて準備を進めている。モジュールのセンサーと読み出し回路の間はバンプと呼ばれるハンダ球により接続されており、このバンプが剥がれているとセンサーからの信号を読み出すことができない。そこで量産の際に X 線によるヒット応答を利用したバンプの健全性試験が提案されている。しかし、データ送受信に用いるモジュール上の表面実装部品などにより、X 線が遮蔽される。そのため部品の下のヒット数が少なくなってしまう、統計のゆらぎの影響が大きくなりバンプ接続の評価が正確にできない。試験時間にも他の試験の兼ね合いから制限がある。またノイズ由来のフェイクヒットにより健全でないバンプを健全だと誤判定する可能性がある。本研究では、ノイズ測定を基に、バンプ健全性の評価基準を新たに提案した。また、実際に使用される部品に対し必要となる X 線の入射量を見積もった。そして、最終的に読み出し回路の動作を調査し、健全性試験のトリガーレートを上げることにより、短い試験時間でデータ量を増やし健全性試験の評価を正確に行えるようにした。

目次

第1章	序論	9
1.1	LHC ATLAS 実験	9
1.1.1	ATLAS 検出器	10
1.1.2	内部飛跡検出器	10
1.1.3	HL-LHC へのアップグレード計画	10
1.2	新型シリコンピクセル検出器	11
1.2.1	ピクセル検出器	11
1.2.2	読み出し ASIC	14
1.3	新型ピクセル検出器の量産計画	16
1.3.1	品質管理試験	16
1.3.2	X線を用いたバンプ接続評価試験	17
1.4	本研究の目的	17
第2章	ピクセル検出器の信号読み出しと X 線照射	19
2.1	プロトタイプモジュールの読み出し	19
2.2	Source Scan	19
2.2.1	X線照射装置	19
2.2.2	閾値	24
2.2.3	トリガーシステム	24
2.3	本研究で使用するモジュール	25
第3章	トリガーレートの限界の測定	28
3.1	測定の目的	28
3.2	トリガーレートと読み出しピクセル数の関係	28
3.2.1	測定手順	28
3.2.2	結果	29
3.3	1チップ読み出しでのトリガーレートの測定	32
3.3.1	測定手順	32
3.3.2	結果	33
第4章	ノイズ測定	35
4.1	目的	35
4.2	結果	35

第 5 章	表面実装部品の X 線遮蔽度合いの測定	38
5.1	測定の目的	38
5.2	部品を設置した状態での Source Scan	38
5.2.1	測定手順	40
5.2.2	部品のない領域でのヒット数分布	43
5.2.3	バイパスコンデンサ下の平均ヒット数	44
5.2.4	HV コンデンサ、データコネクタ、電源コネクタの遮蔽による X 線の減衰率の測定	47
5.2.5	電源コネクタ下の平均ヒット数	51
第 6 章	考察	54
6.1	バンプ接続の評価を誤る確率に対する要求	54
6.2	新たな評価基準の提案	54
6.3	新たな評価基準における Source Scan の評価	55
6.4	Source Scan の試験時間	56
第 7 章	結論	58
	参考文献	62
	付 録 A 平均ヒット数の閾値依存性	63
	付 録 B 温湿度センサーの X 線遮蔽度合いの測定	66

目次

1.1	LHC の簡略図 [1]。	9
1.2	ATLAS 検出器 [2]。	10
1.3	内部飛跡検出器 [3]。	11
1.4	陽子の衝突点を原点とした新型の内部飛跡検出器の断面図 [5]。ここでは陽子の衝突点を原点とし、検出器全体の 1/4 を示している。左図の赤色で示されている部分がピクセル検出器、青色で示されている部分がストリップ検出器である。	12
1.5	半導体検出器の模式図。	12
1.6	ピクセル検出器の概念図。センサーが格子状に区切られており、荷電粒子のヒットした位置を測定できる。	13
1.7	シリコンピクセル検出器の概念図。	13
1.8	左：4 枚の ASIC が搭載されたモジュールの写真。右：ASIC とセンサーとの位置関係。ASIC には左上から左回りに chip1, 2, 3, 4 と名前が定義されている。	14
1.9	RD53A のフロントエンド回路のデザイン。3 種類のフロントエンド回路が約 1/3 ずつ使用されている。	15
1.10	プロトタイプモジュールの読み出し可能領域。薄い青で覆われている領域がチップ毎の読み出し可能領域である。	15
1.11	モジュールの生産過程。赤丸で印のある段階でバンプ接続評価試験が行われる。	17
1.12	プロトタイプモジュールの 5 kHz 5 分の Source Scan の結果と読み出した場所の回路基板。Z 軸はヒット数。青く見えているヒットが少ない部分はコンデンサ、抵抗やハンダによる遮蔽の影響。	18
2.1	プロトタイプモジュールの読み出し機器の接続の様子。二種類の電源がモジュールに接続され、ASIC からの信号は FPGA を経由して PC に送られる。FPGA には YARR と呼ばれる ATLAS グループが開発したシステムのファームウェアが書き込まれており、PC では YARR のソフトウェアで解析が行われる。	20
2.2	X 線のエネルギースペクトラム [8]。	21
2.3	X 線照射装置の概要図。X 線はコリメーターによって 75 mm 先で 65 mm の広がりを持つ。	21

2.4	X線照射装置を実際に使用する際の様子。	22
2.5	Source Scan における1トリガーでヒットを記録したピクセル数の分布。DiffとLinのみ使用した使用している。	25
2.6	KEKQ16 モジュールでのトリガーレート5 kHz、5分のSource Scanの結果。	26
2.7	図2.6cのバンプが剥がれていると思われる部分のモジュール上の位置。この位置は図の右下隅の赤枠で囲んだ領域である。	27
3.1	Diffにおける読み出しピクセル数を変えた時のそれぞれのトリガーレートが100 kHz、30sのSource Scanの結果。	29
3.2	30秒のSource Scanでの予想トリガー数と取得トリガー数。赤色のプロットが取得トリガー数、青の直線で示したのが予想トリガー数である。	30
3.3	30秒のSource Scanでの予想トリガー数と取得トリガー数の比。	31
3.4	平均ヒット数を計算する際に使用したある領域。80から100列、300から350行の領域を使用した。	31
3.5	30秒のSource Scanでの取得トリガー数とある領域の平均ヒット数の関係。赤色のプロットが平均ヒット数、青のプロットが取得トリガー数である。	32
3.6	30秒のSource Scanでの予想トリガー数と取得トリガー数。チップ1枚に対する読み出しで、赤色のプロットが取得トリガー数、青の直線で示したのが予想トリガー数である。	33
3.7	30秒のSource Scanで取得されたトリガー数とある領域の平均ヒット数の関係。赤色のプロットが平均ヒット数、青のプロットが取得トリガー数である。	34
4.1	チップ1の全てのピクセルのノイズ量の分布。	36
5.1	最終版でのX線を遮蔽する可能性の高い表面実装部品。	39
5.2	X線遮蔽度測定に使用した電源コネクタ。実際に使用するケーブルにコネクタをはんだ付けし、コネクタにハンダ付けされている部分以外のケーブルを切断した。	40
5.3	X線遮蔽度測定に使用したデータコネクタ。ケーブルを差し込み、切断した。	40
5.4	モジュールに部品を固定した写真。	41
5.5	プロトタイプモジュールのチップ1の上の回路基板の拡大図。検出器構造体に設置していく際に、モジュールを真空吸着して保持するためのスペースとして部品を置かない領域が作られている。赤い領域は読み出しが可能な領域。	42

5.6	トリガーレート 200 kHz、60 秒の Source Scan の結果を表す z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。上部の長方形で濃い青色の部分はコンデンサとハンダによって X 線が遮蔽されヒットが少なくなっている部分。また、模様のように見えているのは PCB 基板のパターン。	44
5.7	図 5.6 の赤枠で囲まれた部分を 1 行毎に切りとったグラフ。それぞれのグラフは凡例で示されている行のデータに対応する。上にあるのは二次元ヒートマップから切り取った部分で x 方向は断面図と対応している。160 列以上の部分は PCB の電源供給用の銅レイヤーが 1 枚増えるのでヒット数は減っている。また、所々見えるヒット数が急激に減っている部分はデータ送受信信号線の影響である。	45
5.8	ヒット数分布を、ポアソン分布でフィットしたもの。	45
5.9	200 kHz、60 秒の Source Scan の結果を表す z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。	46
5.10	図 5.9 の赤枠で囲まれた部分を 1 行毎に切り取ったグラフ。それぞれのグラフは凡例で示されている行のデータに対応する。バイパスコンデンサによってヒット数が減少している部分が見える。青枠で囲んだ領域を平均ヒット数の計算に使う。	46
5.11	バイパスコンデンサのヒット数分布を、ポアソン分布でフィットしたもの。	47
5.12	HV コンデンサをモジュールの上に設置し、行った 200 kHz、60 秒の Source Scan の結果を表す z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。	48
5.13	図 5.12 の赤枠で囲まれた部分を 1 行毎に切り取ったグラフ。それぞれのグラフは凡例で示されている行のデータに対応する。この図の赤枠で囲んだ評価領域をのちに減衰率の計算で使用する。	48
5.14	データコネクタをモジュールの上に設置し、行った 200 kHz、60 秒の Source Scan の結果を表す z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。	49
5.15	図 5.14 の赤枠で囲まれた部分を 1 行毎に切り取ったグラフ。それぞれのグラフは凡例で示されている行のデータに対応する。この図の赤枠で囲んだ評価領域をのちに減衰率の計算で使用する。	49
5.16	HV コンデンサをモジュールの上に置いて行った 200 kHz、60 秒の Source Scan の結果を表す z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。	50
5.17	図 5.16 の赤枠で囲まれた部分を 1 行毎に切りとったグラフ。それぞれのグラフは凡例で示されている行のデータに対応する。この図の赤枠で囲んだ評価領域をのちに減衰率の計算で使用する。	50
5.18	安定して読みだせる領域のピクセルのヒット数分布を、ポアソン分布でフィットしたもの。	51

5.19	電源コネクタの減衰率の計算の際に使用した領域のヒートマップ。中心に縦に2本ヒットが少ない領域があるが、これはPCB基板のデータ送受信用の信号線である。	52
5.20	電源コネクタの減衰率の計算の際に使用した領域のヒット数分布をポアソン分布で部品あり、なしについてそれぞれフィットしたもの。なしの時は、ポアソン分布を2つ定義している。これは信号線の銅パターンがある場所とない場所に対応する。部品ありの方も同じ領域を使用しているため本来2つのポアソン分布になると考えるが、平均値が低いいため重なっているはずである。	53
6.1	評価基準で要求するヒット数を x 軸に、平均ヒット数の期待値を y 軸に表したグラフ。赤線はヒット数の期待値が 21 の時の直線。 . . .	56
6.2	最終版モジュールの表面実装部品の配置と各チップの位置。	57
A.1	閾値 1500e での 100 kHz、30 秒の Source Scan の結果を表す z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。赤枠で囲んだ領域を平均ヒット数の計算に利用する。	63
A.2	閾値に対する図 A.1 の赤枠で囲んだ領域の平均ヒット数の関係。誤差はヒット数に比べ小さいため誤差棒は表記していない。	63
A.3	評価基準で要求するヒット数を x 軸に、平均ヒット数の期待値を y 軸に表したグラフ。赤線はヒット数の期待値が 21 の時青線は 25 の時の直線。	65
B.1	モジュール読み出しの際の蓋に設置されている温湿度センサ。この図で使用されているのは Sensirion 社の SHT85。	66
B.2	モジュール読み出しの際の蓋にポリイミドテープを使用し、HYT271 を固定している様子。	67
B.3	トリガーレート 200 kHz、60 秒の Source Scan の結果を表す z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。HYT271 が Lin の読み出し領域だけでは読み出せなかったため、同じ条件で Diff と Syn の Source Scan も行い、そのデータを組み合わせた。	68
B.4	図 B.3 の赤枠で囲まれた部分を 1 行毎に切り取ったグラフ。それぞれのグラフは凡例で示されている行のデータに対応する。この図の青枠で囲んだ評価領域を減衰率の計算に使用した。	68

表 目 次

2.1	Mini-X2 X-ray Tube の性能。	20
2.2	線源からモジュールまでの間で X 線を遮蔽する物質。	23
5.1	それぞれの部品の X 線の減衰率	51

第1章 序論

1.1 LHC ATLAS 実験

欧州原子核研究機構（CERN）の Large Hadron Collider (LHC) はスイス・ジュネーブ近郊の地下に建設された周長約 21 km の陽子・陽子衝突型加速器である。LHC は陽子ビームをエネルギー 7 TeV まで加速できるように設計された。2015 年以降の運転で、陽子エネルギー 6.5 TeV まで上がり、重心系衝突エネルギーは 13 TeV に達した。図 1.1 のように、LHC には 4 つの陽子・陽子衝突点があり、それぞれに ATLAS、CMS、LHCb、ALICE 実験の検出器がある。そのうちのひとつである ATLAS 検出器は ATLAS (A TroidalaLHC ApparatuS) 実験に使用される。ATLAS 実験はヒッグス粒子の性質の精密測定や、標準模型の枠組みを超える新物理の発見などを目指している。

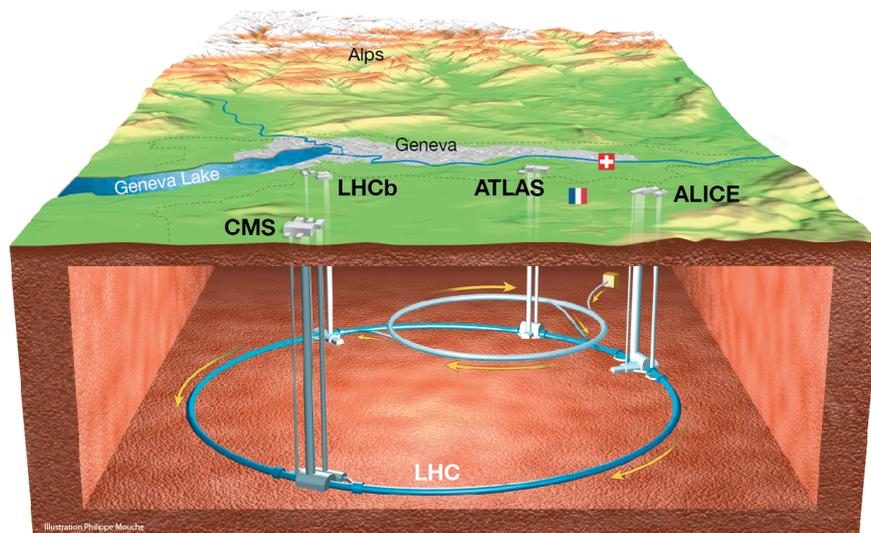


図 1.1: LHC の簡略図 [1]。

1.1.1 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は長さ 44 m、直径 25 m の、ビーム軸を中心とした巨大な円筒形の検出器である。図 1.2 に ATLAS 検出器の全体像を示す。検出器の中心にビームの衝突点があり、それを取り囲むように層状に複数の検出器がある。これらを組み合わせ、陽子・陽子衝突によって生じる粒子の飛跡、運動量、エネルギーなどを再構成する。

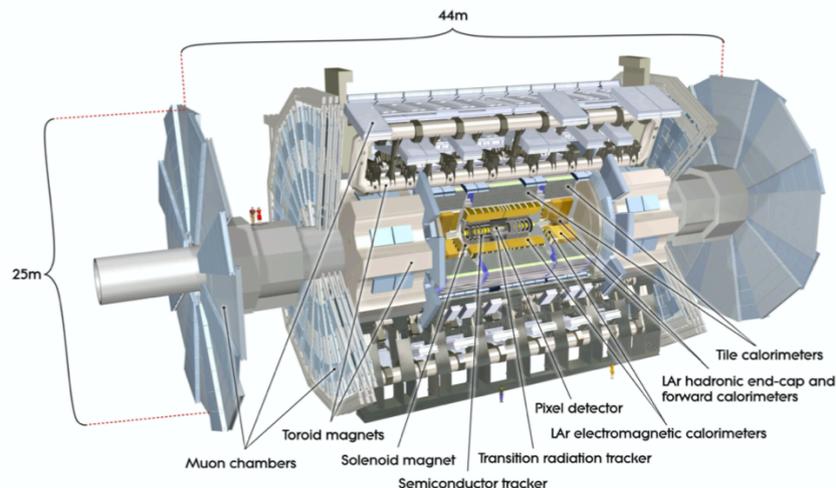


図 1.2: ATLAS 検出器 [2]。

1.1.2 内部飛跡検出器

本研究に関係する最内層の内部飛跡検出器について述べる。内部飛跡検出器は ATLAS 検出器の最内層に位置する、長さ 6.2 m、直径 2.1 m の検出器である。内部飛跡検出器の構造を図 1.3 に示す。内側からシリコンピクセル検出器、シリコンストリップ検出器 (SCT)、ガスワイヤ飛跡検出器 (TRT) の順に並ぶ。衝突点で生じた荷電粒子の飛跡は、外部のソレノイド磁石の磁場により曲がる。内部飛跡検出器ではこの飛跡を検出し、運動量を測定する。

1.1.3 HL-LHC へのアップグレード計画

2027 年以降さらなる陽子・陽子衝突の事象数の増加を目指し、LHC のビーム輝度を上げる High Luminosity LHC (HL-LHC) 計画がある。事象数の増加によりヒッグス粒子の性質の精密測定や、標準模型の枠組みを超える新物理の発見などの研究の進展が期待される。このアップグレードで、単位時間あたりに衝突する陽子数が増加する。それにより検出器の放射線損傷が大きくなり現行の検出器は

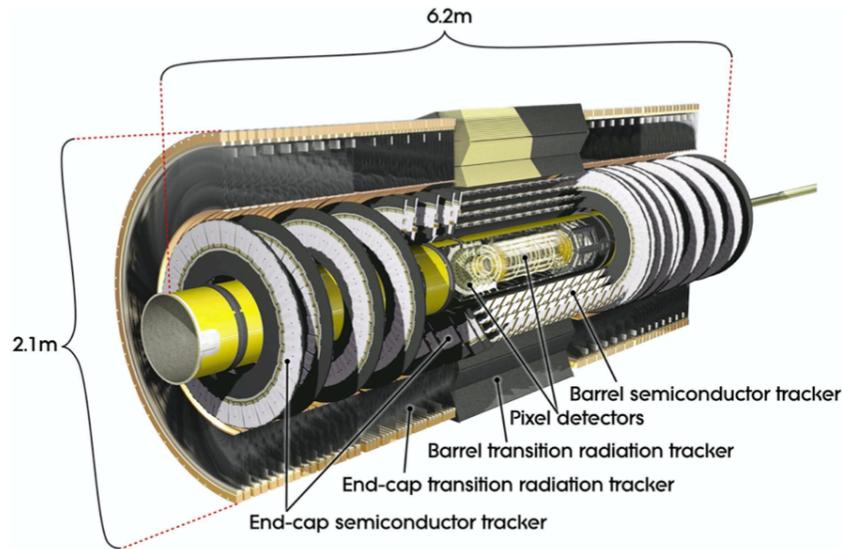


図 1.3: 内部飛跡検出器 [3]。

使えない。また、事象レートが増えるためデータ収集システムも耐えられない。そこで ATLAS 検出器も 2027 年以降の運転に向けてアップグレードする。

1.2 新型シリコンピクセル検出器

前項の ATLAS 検出器のアップグレードでは、現在の内部飛跡検出器を、新型のものへと入れ替える。図 1.4 に新型の内部飛跡検出器の断面図を示す。左図は陽子の衝突点を原点とし、検出器全体の 1/4 を拡大した模式図である。この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 (以下「ストリップ検出器」と呼ぶ) から構成される。この節では本研究に関係するピクセル検出器について説明する。

1.2.1 ピクセル検出器

まず、シリコンを用いた半導体検出器について簡単に説明する。ATLAS 実験で用いるピクセル検出器は p 型と n 型のシリコンによる pn 接合を用いている。図 1.5 に pn 接合の半導体検出器の模式図を示す。これに逆バイアス電圧を印加すると、空乏層がさらに広がる。広がった空乏層に荷電粒子が入射し、電子正孔対を生成する。逆バイアス電圧が作る電場により、電子と正孔がそれぞれ電極に移動する。これを信号として読み出す。

半導体検出器のひとつであるピクセル検出器は、その読み出し部分が図 1.6 のように格子状に細かく区切られているため、荷電粒子の通過した位置を測定できる。この格子状に区切られた部分をピクセルと呼び、ピクセルサイズで位置分解能が

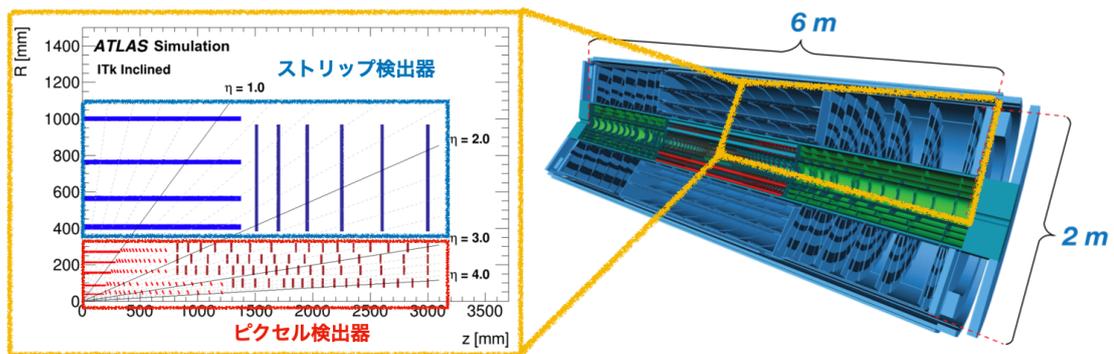


図 1.4: 陽子の衝突点を原点とした新型の内部飛跡検出器の断面図 [5]。ここでは陽子の衝突点を原点とし、検出器全体の 1/4 を示している。左図の赤色で示されている部分がピクセル検出器、青色で示されている部分がストリップ検出器である。

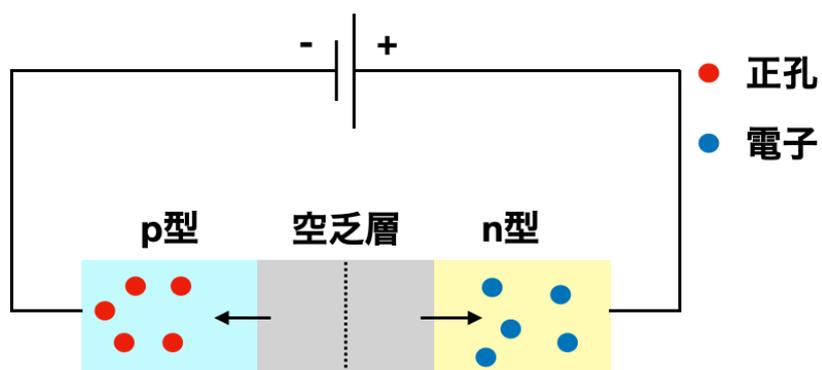


図 1.5: 半導体検出器の模式図。

決まる。現行の ATLAS 実験のピクセル検出器ではピクセルサイズは $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ であり、新型の検出器では $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ ^aになる。

ピクセル検出器

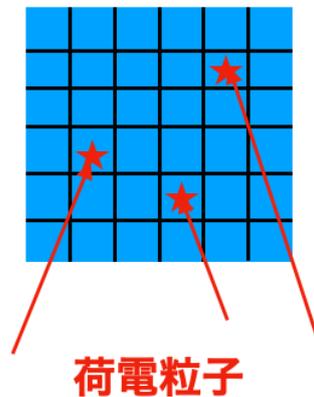


図 1.6: ピクセル検出器の概念図。センサーが格子状に区切られており、荷電粒子のヒットした位置を測定できる。

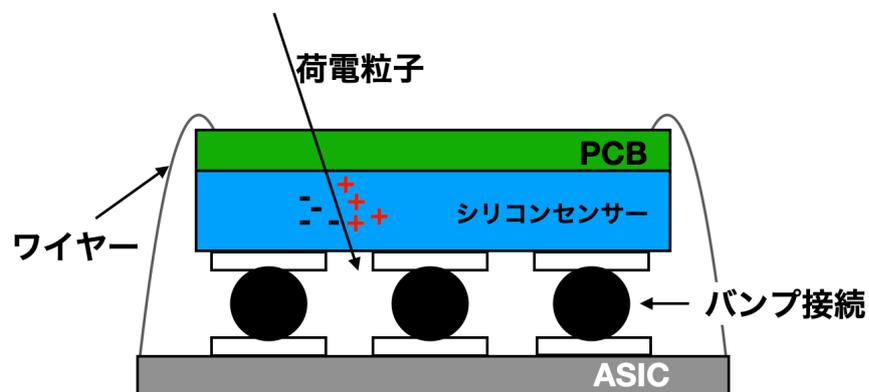


図 1.7: シリコンピクセル検出器の概念図。

ATLAS 実験で使用されるのはシリコンを用いたピクセル検出器であり、図 1.7 に示すようにデータの送受信を行うためのフレキシブル回路基板 (PCB)、荷電粒子を検出するシリコンセンサー、そしてデータを読み出すための集積回路 (ASIC) で構成されている。各ピクセルと読み出し ASIC の回路はバンプと呼ばれる小さなはんだ球を溶解させ、センサーと電氣的に接合している。この接続方法のことをバンプ接続 (バンプボンディング) と呼ぶ。また、ASIC と PCB はワイヤボンディングと呼ばれる手法で電氣的に接続されている。

^a一部の領域では $25 \times 100 \mu\text{m}^2$

1.2.2 読み出し ASIC

ピクセル検出器のデータ読み出し ASIC について説明する。各ピクセルセンサー個別に用意したアナログ回路で信号増幅や閾値をかけたヒット検出を行う。それらの情報をデジタル回路でまとめて、デジタル信号として読み出しシステムに送る。これらの機能をひとつのチップとしてまとめたデータ読み出し ASIC を用いる。この ASIC を 4 枚 1 組にして 1 つの検出器モジュールを構成する。この検出器モジュールは約 4 cm 角で、ASIC は約 2 cm 角である。ASIC とセンサーの位置関係を図 1.8 に示した。

この ASIC のプロトタイプとして開発されたのが RD53A である。RD53A では、最終版の ASIC で採用するアナログ回路の候補の性能を比較するために、Differential (以下 Diff)、Linear (以下 Lin)、Synchronous (以下 Syn) の 3 種類の読み出し回路が図 1.9 のように使われた。また、RD53A は回路の性能を比較するためのプロトタイプなので、ASIC のサイズも半分になっている。ピクセルの位置を示す列と行の定義も図 1.9 に示す。以下、RD53A が搭載された検出器モジュールのことをプロトタイプモジュールと呼ぶ。先ほど述べたように RD53A はサイズが半分なので、モジュールの全領域の半分しか読み出せない。図 1.10 の薄い青で覆われた部分がプロトタイプモジュールの読み出し可能領域である。

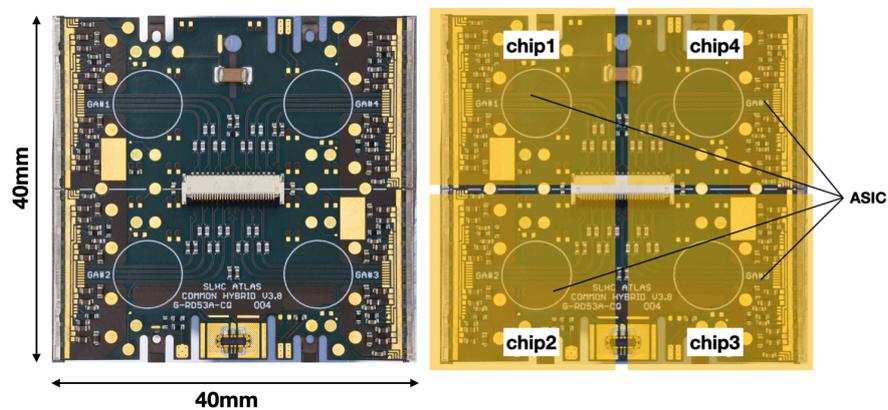


図 1.8: 左：4 枚の ASIC が搭載されたモジュールの写真。右：ASIC とセンサーとの位置関係。ASIC には左上から左回りに chip1, 2, 3, 4 と名前が定義されている。

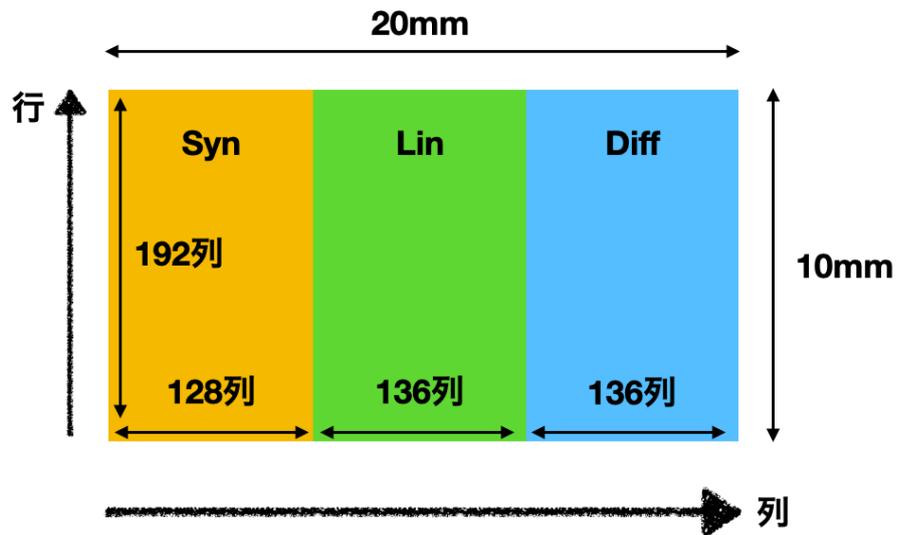


図 1.9: RD53A のフロントエンド回路のデザイン。3 種類のフロントエンド回路が約 1/3 ずつ使用されている。

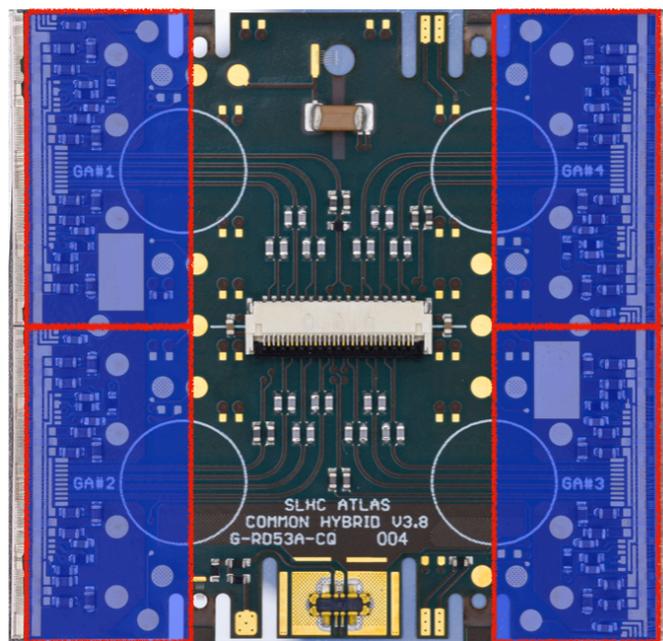


図 1.10: プロトタイプモジュールの読み出し可能領域。薄い青で覆われている領域がチップ毎の読み出し可能領域である。

1.3 新型ピクセル検出器の量産計画

新型ピクセル検出器は約 10,000 個のモジュールで構成される。日本ではそのうちの約 2,000 個を生産する。ここではその生産過程で行われる品質管理試験の概要と、その中の X 線を用いたバンパ接続評価試験について説明する。

1.3.1 品質管理試験

図 1.11 にモジュールの製造組み立てフローを示す。生産過程の各工程を説明する。

- ベアモジュールと PCB の接着 (Bare Module to PCB Assembly)^b
センサーと ASIC がバンパ接続されたものであるベアモジュールと PCB の接着。
- ワイヤーボンディング (Wirebonding)
ASIC と PCB をアルミワイヤーで接続する。
- パリレンコーティング (Parylene Coating)
センサーに印加する高電圧によって放電することを防ぐため、パリレンと呼ばれる高分子でモジュールをコーティングする。
- ワイヤーボンディング保護 (Wirebond Protection)
ワイヤーボンディングを保護するため、ワイヤーの上を覆い保護する樹脂をつける。
- 温度サイクル試験 (Thermal Cycling)
高温環境と、低温環境を繰り返した際の耐久性を確認する試験。
- 長時間耐久性試験 (Burn-In)
長時間の動作時に、不安定になる初期不良がないか確認する試験。

これらの生産工程や品質保証試験のそれぞれの工程では初期不良や、人為的なミスによるモジュールの不具合を発見するための品質管理試験を行う。例えば、モジュールの外観を写真を使って目視で確認する試験や、センサーの電流電圧特性の測定、テスト電荷を入射し応答を調べる試験などがある。この一連の試験を全モジュールに対して行うので、モジュールを大量に生産することを考えると、試験時間は可能な限り短縮することが望ましい。その試験のひとつであるバンパ接続評価試験は、組み立てる際にバンパが剥がれていないか、また、初期のバンパ不良がないかを確認するための試験である。これは、パリレンコーティングの前に 1 回、温度サイクル試験でモジュールが熱により歪みバンパが剥がれていないかを確認するために温度サイクルの前後で 1 回ずつ、出荷前に 1 回の、計 4 回行われる。

^bカッコ内は図 1.11 での試験名。

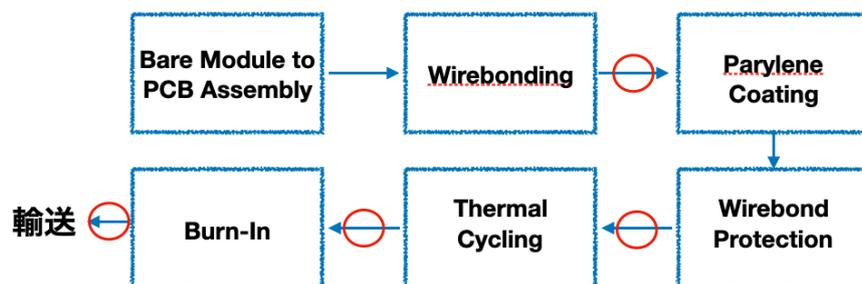


図 1.11: モジュールの生産過程。赤丸で印のある段階でバンプ接続評価試験が行われる。

1.3.2 X線を用いたバンプ接続評価試験

前節で説明した品質管理試験のうち、本研究の目的に関わるバンプ接続評価試験について説明する。1.2.1項で述べたように、各ピクセルとASICの読み出し回路はバンプと呼ばれるハンダ球によって接続される。しかし、このバンプが剥がれたり、完全に接合されていない場合、センサーからの信号を読み出すことができない。こういったバンプ不良がなく接続できているかどうかを、本論文ではバンプ接続の健全性と表現する。そこで、センサーに対して荷電粒子を入射するなどしてセンサー内に信号を生成し、読み出せたヒット事象数から健全性を評価するバンプ接続評価試験が提案された。バンプ接続評価試験において、バンプが繋がっていると判定するヒット数の基準は「各ピクセルに50ヒット以上^cと提案されている。これは50ヒットあれば実際にはバンプが繋がっていないにも関わらずノイズなどによって誤って繋がっていると判定することはないという考えに基づく。センサーに対してヒット信号を与える方法として、日本グループではX線を使う。この際使用するX線照射装置は一般的なβ線源などより高いフラックスでX線を入射できる。以下X線を用いたバンプ接続評価試験のことをSource Scanと呼び、詳しい説明は2.2節で行う。

1.4 本研究の目的

本研究の目的は、新型ピクセル検出器量産時の品質管理試験で行われるSource Scanでバンプ健全性を、限られた試験時間の中で正確に評価できるようにすることである。

Source Scanにおいてバンプ接続の健全性を評価する際、誤判定してしまう要因は以下の2つである。

^cバンプ接続評価試験の試験時間は線源や環境によるため決まっていない。

1. バンプは繋がっていないが、ノイズによる偽のヒット情報により繋がっていると判定。これを偽接続と定義する。
2. バンプが繋がっているが、ヒット数が少なく、統計的揺らぎにより評価基準を超えることができないため、繋がっていないと判定。これを偽剥がれと定義する。

X線照射装置はすでに開発され、試運転もされた。これを用いた Source Scan もされた。この先行研究の際の Source Scan の結果のヒートマップ^dを図 1.12 に示す。この図を見ると、コンデンサ、抵抗やハンダにより X 線が遮蔽されヒット数が周りより少ない。このヒット数の減少は偽剥がれを招く。また、ノイズ由来の偽のヒット情報により偽接続となる可能性もあるが、どの程度結果に影響を与えるかは調べられていない。さらに、現在提案されている評価基準に関しても図 1.12 の部品の下が数ヒットしかないことから、50 ヒット以上という基準は厳しいと考える。そこで、本研究では高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にてプロトタイプモジュールを使用し、ノイズの寄与、X 線の遮蔽度合いを調べる。これらを行うことで限られた試験時間の中で、バンプ健全性の正確な評価をえるようにする。

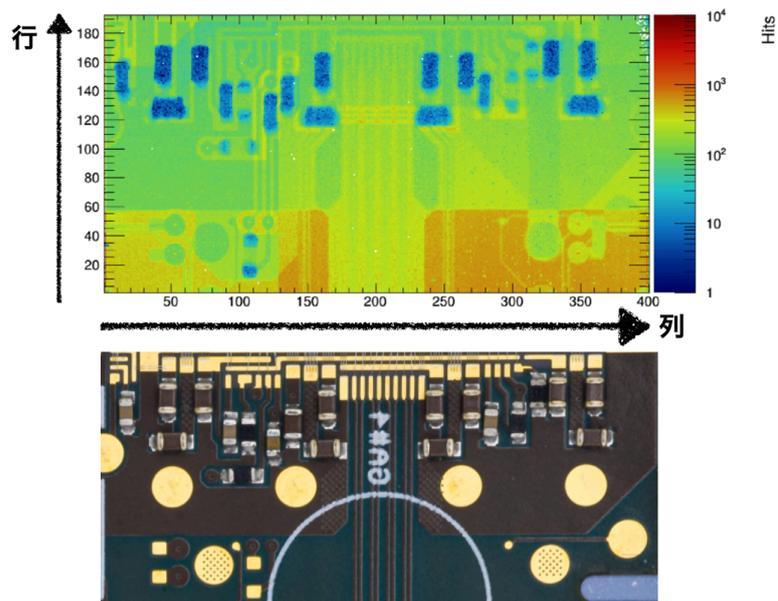


図 1.12: プロトタイプモジュールの 5kHz5 分の Source Scan の結果と読み出した場所の回路基板。Z 軸はヒット数。青く見えているヒットが少ない部分はコンデンサ、抵抗やハンダによる遮蔽の影響。

^d二次元データの個々の値を色や濃淡で表した可視化グラフ。

第2章 ピクセル検出器の信号読み出しとX線照射

この章では茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行った実験の装置や、Source Scan について説明する。まず、2.1 節でプロトタイプモジュールの読み出し方法について説明し、2.2 節で現在提案されている Source Scan に使用する装置や試験の内容について説明する。最後に、2.3 節で本研究で使用したピクセル検出器モジュールについて説明する。

2.1 プロトタイプモジュールの読み出し

本実験は KEK でプロトタイプモジュールを用いて行った。その際のプロトタイプモジュールの読み出し機器の接続の様子を図 2.1 に示す。モジュールは読み出し ASIC を動作させる低圧電源とセンサーに逆バイアス電圧を印加する高圧電源に接続される。ASIC から出力されるデジタル信号は FPGA という、プログラムにより内部の回路構成を書き換えることが可能な素子を経由して PC へと送られる。FPGA 内部の回路情報をファームウェアと呼ぶ。このファームウェアと、PC で使用されているソフトウェアには、ATLAS グループがピクセル検出器読み出し用に開発している YARR[7] というシステムを使用する。このシステムは、ヒットと判定するための閾値をピクセル毎に個別調整する機能や、データ取得の時間やトリガーの周波数を変更する機能なども備えている。

2.2 Source Scan

Source Scan を行う際の X 線照射装置と X 線源の仕様について説明する。本研究に使用したピクセルのヒット判定閾値と、Source Scan におけるデータ取得方法について説明する。

2.2.1 X 線照射装置

Source Scan を行う際、モジュールに対して X 線を照射する。その X 線を発生させる装置は AMPTEK 社の Mini-X2 X-ray Tube[8] を使用しており、表 2.1 にその

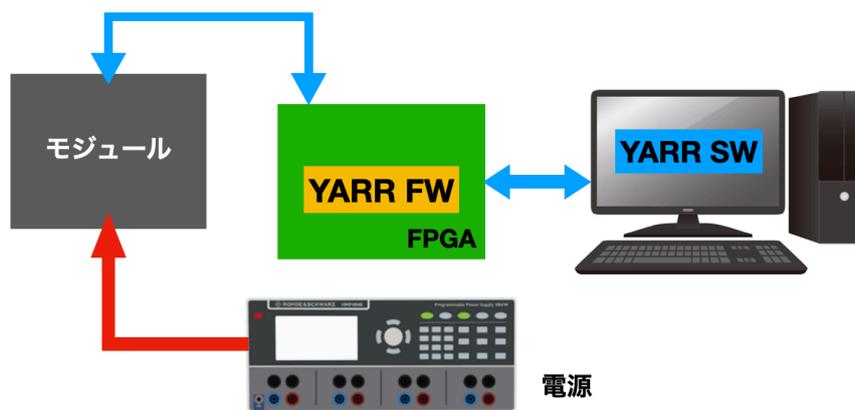


図 2.1: プロトタイプモジュールの読み出し機器の接続の様子。二種類の電源がモジュールに接続され、ASIC からの信号は FPGA を経由して PC に送られる。FPGA には YARR と呼ばれる ATLAS グループが開発したシステムのファームウェアが書き込まれており、PC では YARR のソフトウェアで解析が行われる。

仕様を、図 2.2 に X 線のエネルギースペクトラムをそれぞれ示す。この装置は、加速した電子を銀の標的に高速で衝突させ、標的から X 線を発生させる。その際の最大加速電圧が 50 kV、最大出力が 4 W なので 50 kV 印加時の最大管電流は $80 \mu\text{A}$ である。この加速電圧と管電流はソフトウェアで自由に変更することが可能であり、加速電圧 50 kV、管電流 $80 \mu\text{A}$ で実験を行った。エネルギースペクトラムから分かるように、銀標的の主な特性 X 線のエネルギーは 22 keV と 25 keV である。

表 2.1: Mini-X2 X-ray Tube の性能。

X 線生成標的	銀
最大加速電圧	50 kV
最大管電流	$200 \mu\text{A}$
最大出力	4 W
フラックス	$6 \times 10^4 / \text{s} / \text{mm}^2$ ^a

^a照射軸上 300 mm の距離、加速電圧 50 kV、管電流 $1 \mu\text{A}$

次にこの装置を使い Source Scan を行う際の X 線照射装置のセットアップを図 2.3 に、実際に使用する様子を図 2.4 に示す。モジュールの 75 mm 上から X 線を照射し、モジュール上で一様な照射となるようにする。この X 線はコリメーターにより 75 mm 先で 65 mm の広がりを持ち、40 mm 角のセンサーを十分に覆う。KEK の放射線管理の内規を満たすように十分な遮蔽体で全体を覆った。

各ピクセルに単位時間あたりに入射する X 線の数 (X 線の入射レート) を簡単に計算する。仕様より、軸上 300 mm、加速電圧 50 kV、管電流 $1 \mu\text{A}$ でのフラックスは 6×10^4 [$1/\text{s}/\text{mm}^2$] である。実際のモジュールまでの距離は 75 mm なので、モジュール表面でのフラックスは、

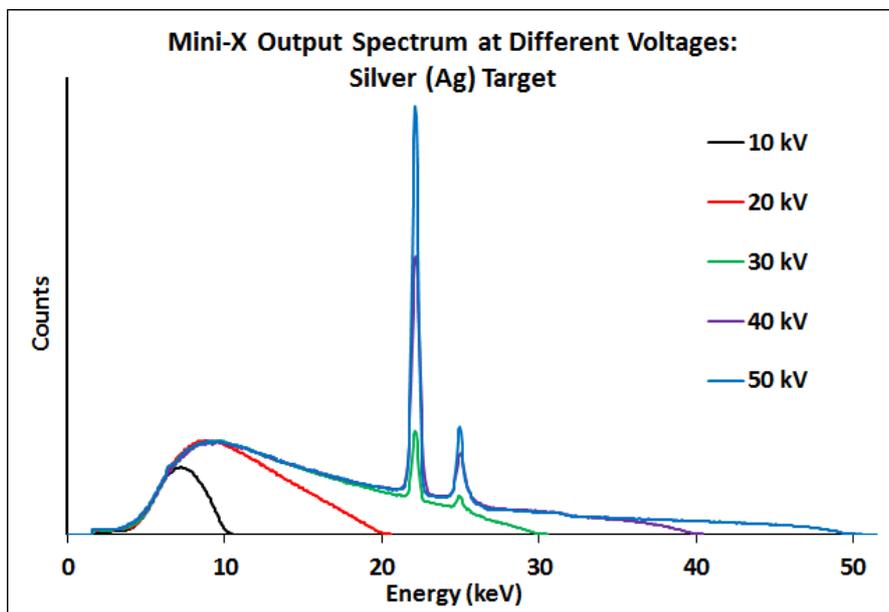


図 2.2: X線のエネルギースペクトラム [8]。

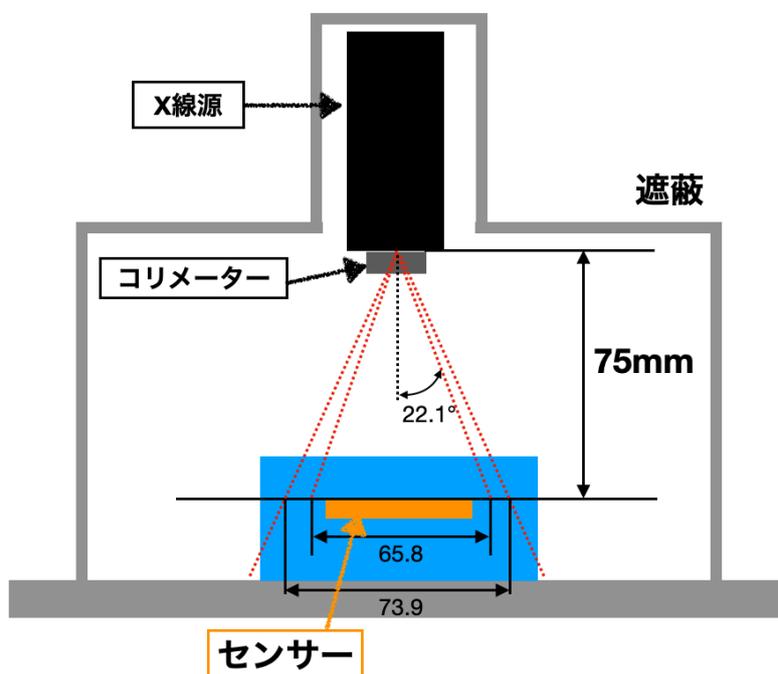


図 2.3: X線照射装置の概要図。X線はコリメーターによって75 mm先で65 mmの広がりを持つ。

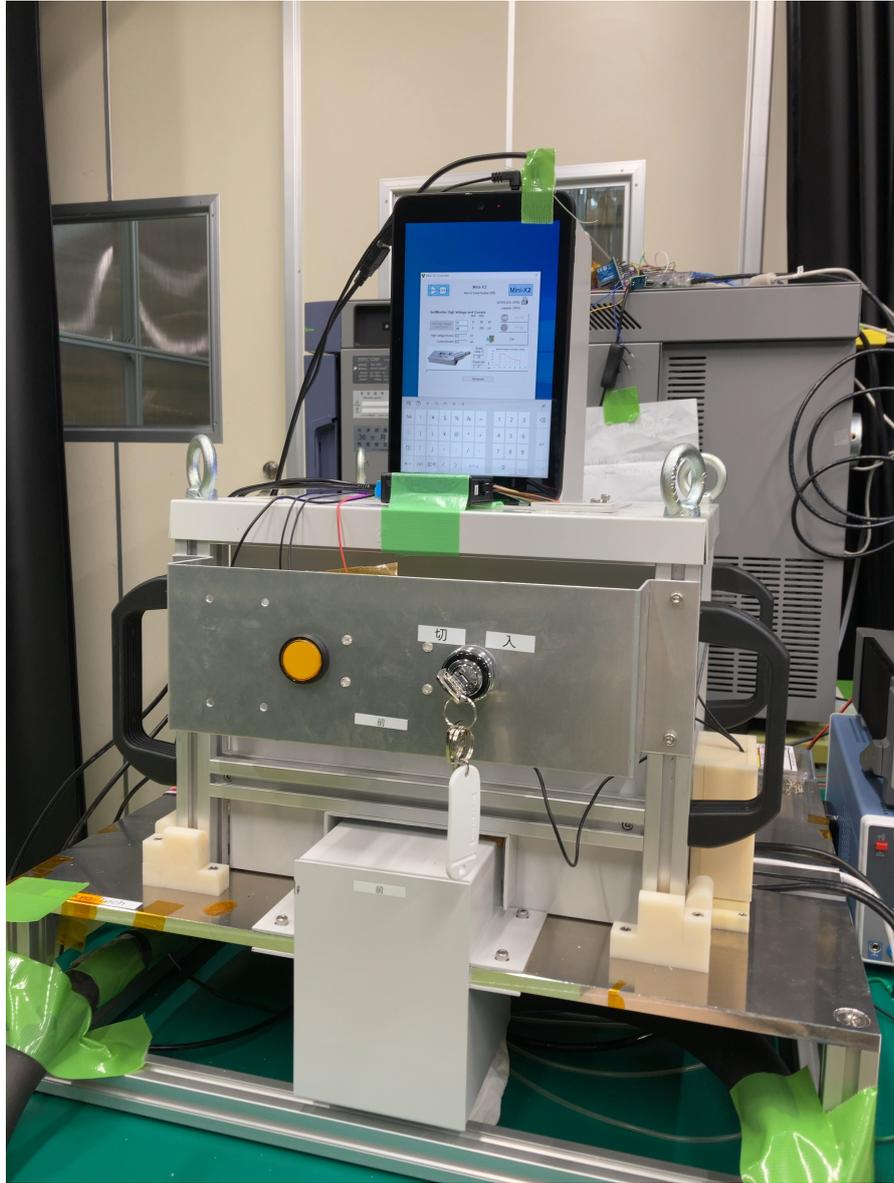


図 2.4: X 線照射装置を実際に使用する際の様子。

$$6 \times 10^4 \text{ [s/mm}^2\text{]} \times \left(\frac{300}{75}\right)^2 \times \left(\frac{80\mu\text{A}}{1\mu\text{A}}\right) = 7.68 \times 10^7 \text{ [s/mm}^2\text{]}. \quad (2.1)$$

1 ピクセルの面積は $50 \times 50 = 250 \mu\text{m}^2$ なので、センサーと線源の間に遮るものが何もない時、1 ピクセルあたりの X 線入射数は、

$$7.68 \times 10^7 \text{ [s/mm}^2\text{]} \times 2.5 \times 10^{-3} \text{ [mm}^2\text{]} = 1.92 \times 10^5 \text{ [s]}. \quad (2.2)$$

しかし、実際には、X 線がセンサーに入射するまでいくつかの物質により遮蔽される。その物質と X 線が通過する厚みを以下に示した。

- 冷却のための断熱材のスタイロフォーム。28 mm。
- 冷却のためのデルリン。7 mm。
- モジュールを動作させる際に冷却装置に押しつける役割のあるアルミ蓋。0.5 mm。
- PCB 基板中の銅レイヤー。0.035 mm。

この4つの物質による X 線の減衰を計算するため、それぞれの密度、20 keV の X 線に対する質量減衰係数^a、平均自由行程を、表 2.2 に示す。質量減衰係数の計算には NIST XCOM[9] を使用した。

表 2.2: 線源からモジュールまでの間で X 線を遮蔽する物質。

物質	密度 (g/cm ³)	質量減衰係数 (cm ² /g)	平均自由行程 (cm)
スタイロフォーム	0.03	0.376	88.7
デルリン	1.41	0.584	1.21
アルミ板	2.7	3.24	0.113
銅	8.96	33.2	3.36×10^{-3}

X 線の減衰率は物質の厚みを z 、平均自由行程を λ とすると、

$$\exp\left(-\frac{z_{\text{SF}}}{\lambda_{\text{SF}}}\right) \times \exp\left(-\frac{z_{\text{Del}}}{\lambda_{\text{Del}}}\right) \times \exp\left(-\frac{z_{\text{Al}}}{\lambda_{\text{Al}}}\right) \times \exp\left(-\frac{z_{\text{Cu}}}{\lambda_{\text{Cu}}}\right), \quad (2.3)$$

$$= 0.97 \times 0.56 \times 0.66 \times 0.35 = 0.13. \quad (2.4)$$

下付きの SF、Del、Al、Cu はそれぞれスタイロフォーム、デルリン、アルミ、銅を指す。1 ピクセルあたりの X 線入射レートは式 (2.2) から $1.92 \times 10^5 \text{ [s]}$ なので 1 ピクセルあたりの物質の遮蔽も考慮した X 線入射レートは、

$$1.92 \times 10^5 \times 0.13 = 2.5 \times 10^4 \text{ [s]}. \quad (2.5)$$

^a本研究で使う X 線源の代表的な X 線エネルギー、22keV、25keV に近い、20keV を用いた。コヒーレント散乱は減衰に大きく寄与しないと考える質量減衰係数からコヒーレント散乱の寄与を除いた。

2.2.2 閾値

X線がピクセル検出器のセンサー部分に入射し、主に光電効果により電子が生成される。その電子を1.2.1項で説明した原理で読み出す。その時、電極から読み出された電荷量が設定された閾値を超えると1ヒットとしてカウントされる。この閾値はそれぞれのピクセル毎に調整でき、本研究では閾値は各フロントエンド毎に、DiffとLinは1500 e^b、Synは2500 eに設定した。ここで、X線によって生成される電荷量を計算する。入射するX線のエネルギーを図2.2から22 keVが主だと考える。シリコンのセンサー内でこのエネルギーを全て落とすと考えるとシリコンの電子正孔対生成エネルギー3.66 eVから、X線により生成される電荷量は単位をeとして計算すると、

$$\frac{22 \text{ [keV]}}{3.66 \text{ [eV]}} = 6000 \text{ [e]}. \quad (2.6)$$

X線の生成する電荷量が6000 eであり、設定している閾値は1500 eか2500 eなのでこのX線を検出できる。

2.2.3 トリガーシステム

Source Scanを行う際、X線照射装置から常にX線を照射し続ける。そして、一定の周波数でファームウェアからASICへトリガーが送られ、データを取得する。その周波数はソフトウェアから変更可能である。この周波数毎に、400 nsのデータ取得を行い、この期間を16個に分けて、25 nsの間にヒットがあったかどうかを判定する仕組みになっている。以下、この400 nsのデータ取得1回を1トリガーと呼び、1トリガーが送られる一定の周波数のことをトリガーレートと呼ぶ。また、このように一定のトリガーレートでトリガーを送りデータを取得する手法をランダムトリガーと呼び、本研究で行ったプロトタイプモジュールを用いたSource Scanではこれを使用している。図2.5にSource Scanを行った際の1トリガーでヒットを記録したピクセル数の分布を示す。この図から、1トリガーあたり50ヒットほどを記録したことがわかる。そこで、実際に先ほど計算した、1ピクセルあたりのX線の入射数から、1トリガーあたりのX線がヒットするピクセルの数を計算する。1ピクセルあたりの通過する物質も考慮したX線の入射レートは式(2.5)から、 2.5×10^4 [/s]である。X線が厚さ150 μm のシリコンセンサーに入射し相互作用する確率は、平均自由行程とセンサーの厚みから計算すると、

$$1 - \exp\left(-\frac{Z_{\text{Si}}}{\lambda_{\text{Si}}}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{0.015}{0.1}\right) = 0.14. \quad (2.7)$$

つまり、シリコンセンサーにヒットするX線の入射レートは 2.5×10^4 [/s] \times 0.14 = 3500 [/s]である。1トリガーあたりの時間幅は400 nsであり、Source Scanには

^b1eは電子1つ分の電荷量。

52224°ピクセル使用されたので、1トリガーでX線がヒットするピクセルの数は、

$$52224 \times 3500 \text{ [1/s]} \times 4 \times 10^{-7} = 73. \quad (2.8)$$

主に銅でX線が遮られていると考えているが、PCB基板中の銅レイヤーの枚数が場所によって違い、2枚重なっている部分もあるので、この73という数字は多く見積もられていると考えられる。測定値がおよそ50ピクセルなので概ね予想通りの結果が実機を用いても得られる。

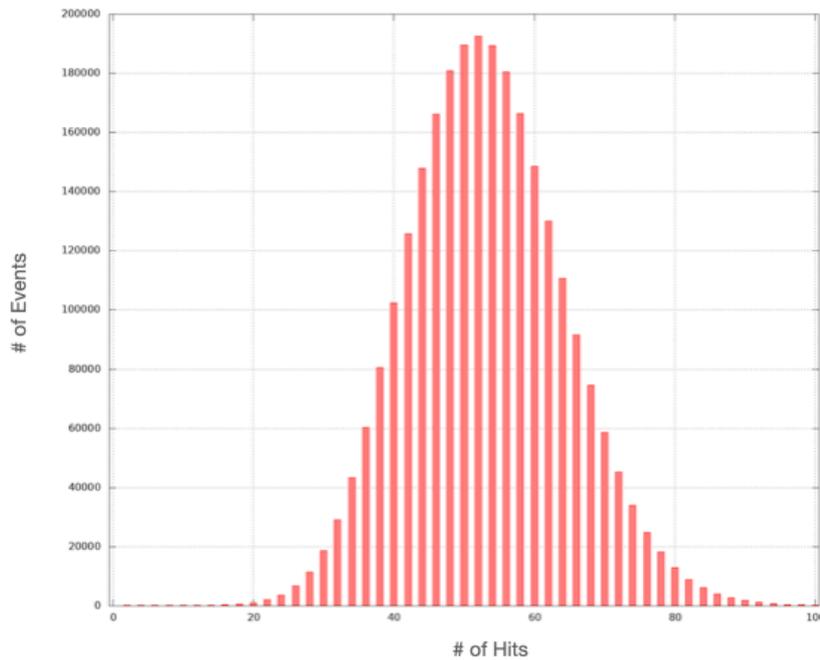


図 2.5: Source Scan における 1 トリガーでヒットを記録したピクセル数の分布。Diff と Lin のみを使用した使用している。

2.3 本研究で使用するモジュール

KEK で作られたプロトタイプモジュールにはニックネームが割り当てられており、本研究で主に使用したのは KEKQ16 である。実際に KEKQ16 のトリガーレート 5 kHz、5 分の Source Scan の結果を z 軸をヒット数としたヒートマップとして表したものを図 2.6 に示す。このモジュールのチップ 3 (図 2.6c) の左上の領域では複数ピクセルまとめてヒット応答がない。この部分に対応するモジュール上の場所を図 2.7 に示す。この領域はモジュールの端の部分であり、ここに何らかの力が

°この測定の際には不具合により、3つのフロントエンドを同時に読み出すことができなかったため3つあるフロントエンドのうち Diff と Lin を使用した。そのため、検出に使用されたピクセル数は 272 列 × 192 行 = 52224 ピクセルである。

加わりバンプがまとめて剥がれていると考える。生産過程でこのようなモジュールを発見し、除外するため、バンプ接続評価試験は行われる。また、バンプが剥がれている部分以外は正常であるためこのモジュールを使用した。

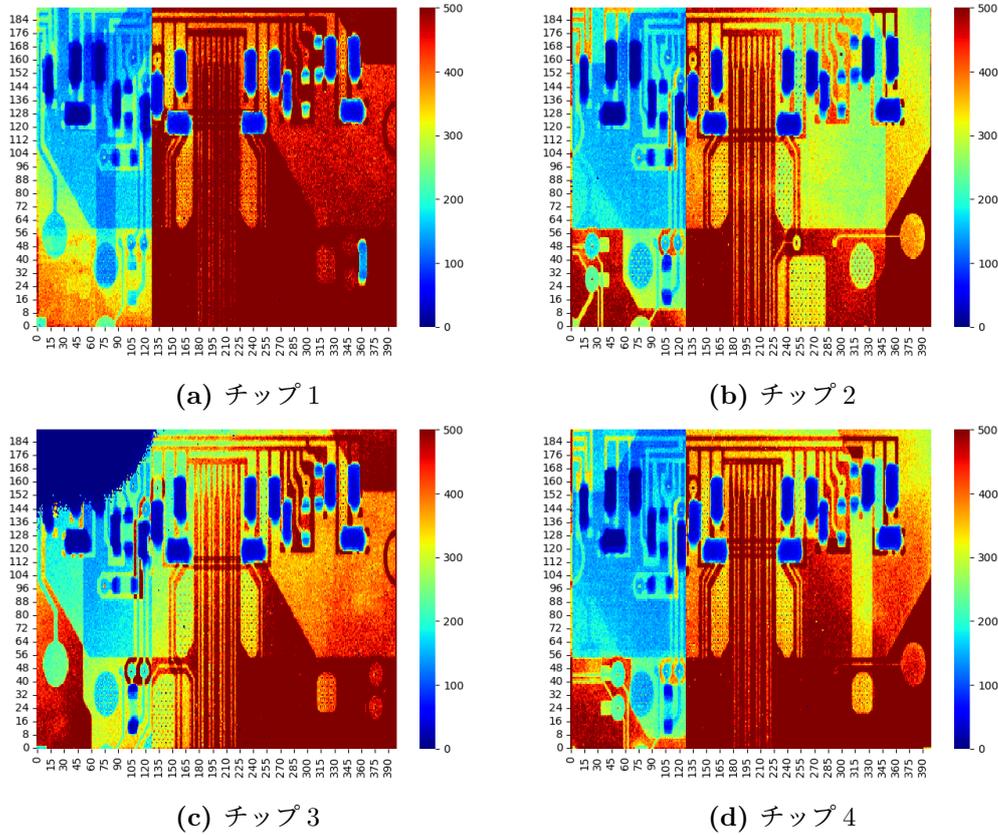


図 2.6: KEKQ16 モジュールでのトリガーレート 5 kHz、5 分の Source Scan の結果。

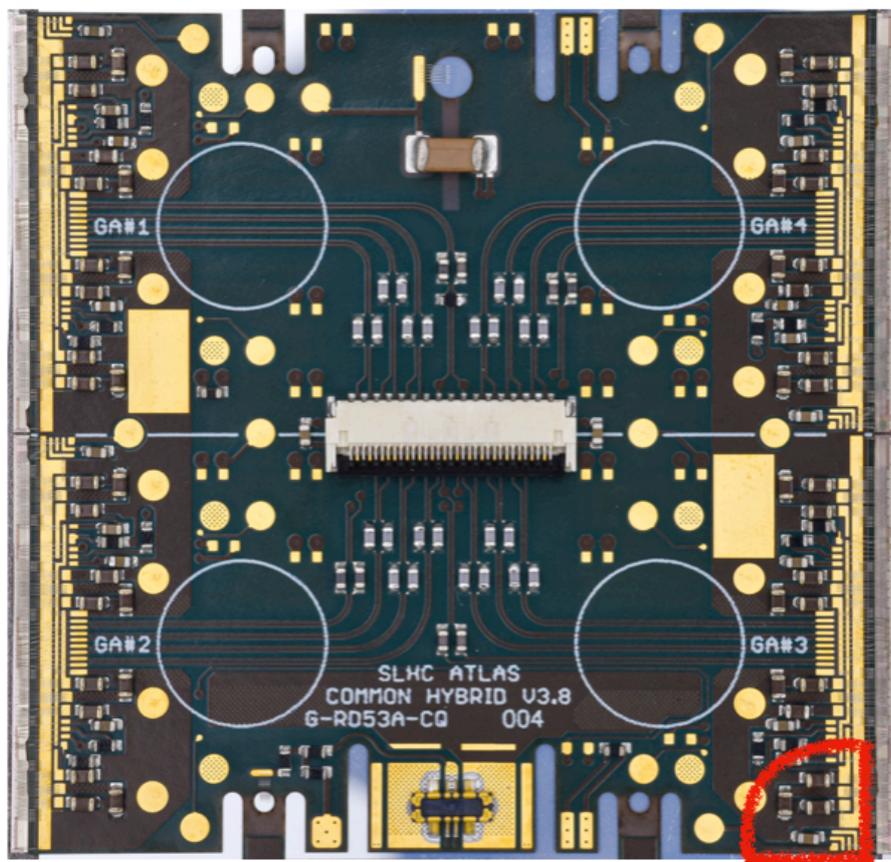


図 2.7: 図 2.6c のバンプが剥がれていると思われる部分のモジュール上の位置。この位置は図の右下隅の赤枠で囲んだ領域である。

第3章 トリガーレートの限界の測定

この章では、Source Scan のトリガーレートの測定と、その結果について述べる。3.1 節でこの測定の目的について説明し、3.2 節でトリガーレートと読み出しピクセル数の関係を調べるため行った測定の手順と結果について、3.3 節で1チップ読み出しでのトリガーレートの測定の手順と結果についてそれぞれ述べる。

3.1 測定の目的

表面実装部品による X 線の遮蔽でヒット数が減るという Source Scan の課題に対し、限られた試験時間の中で評価するためには、トリガーレートを上げることが解決策の一つではないかと考えた。この章での測定の目的は、実際のシステムを用いて、データが正常に取得できるトリガーレートの限界を調べることである。デザインや読み出し回路の実装方法などから計算される最大のトリガーレートは、375 kHz である。この測定では、データ読み出しが正常に動作しているかを判断するために実際に取得したイベント数を取得トリガー数と定義し、トリガーレートとデータ取得時間から得られる予想トリガー数と一致するかを確かめる。また、イベント数が正常でも、Source Scan のデータが正常に取得できていない可能性があるがあるので、ある領域の平均ヒット数をトリガーレートごとに計算し、取得トリガー数に比例するかを確かめることでデータの正常性を確認する。

3.2 トリガーレートと読み出しピクセル数の関係

データサイズのトリガーレートへの影響を調べるために設定を変更し、トリガーレートと読み出しピクセル数の関係について測定をした。読み出すピクセル数を変えると受け取るヒット情報のデータサイズが変わる。読み出しピクセル数を全ピクセル、半分のピクセル、1/3 ピクセルの3パターンに変え、それぞれに対してトリガーレートをどこまで上げることができるか調査した。

3.2.1 測定手順

この測定ではフロントエンドは新型モジュールで使用される Diff のみを使用し、ASIC の4つのチップを同時に読み出した。Diff は136列あり、読み出しピクセル

数を図 3.1 のように、全ピクセル (136 列)、半分 (64 列)、1/3 (48 列) の 3 パターンに変えた。200 kHz まで 10 kHz 刻みでトリガーレートを変えて、30 秒の Source Scan を行った。

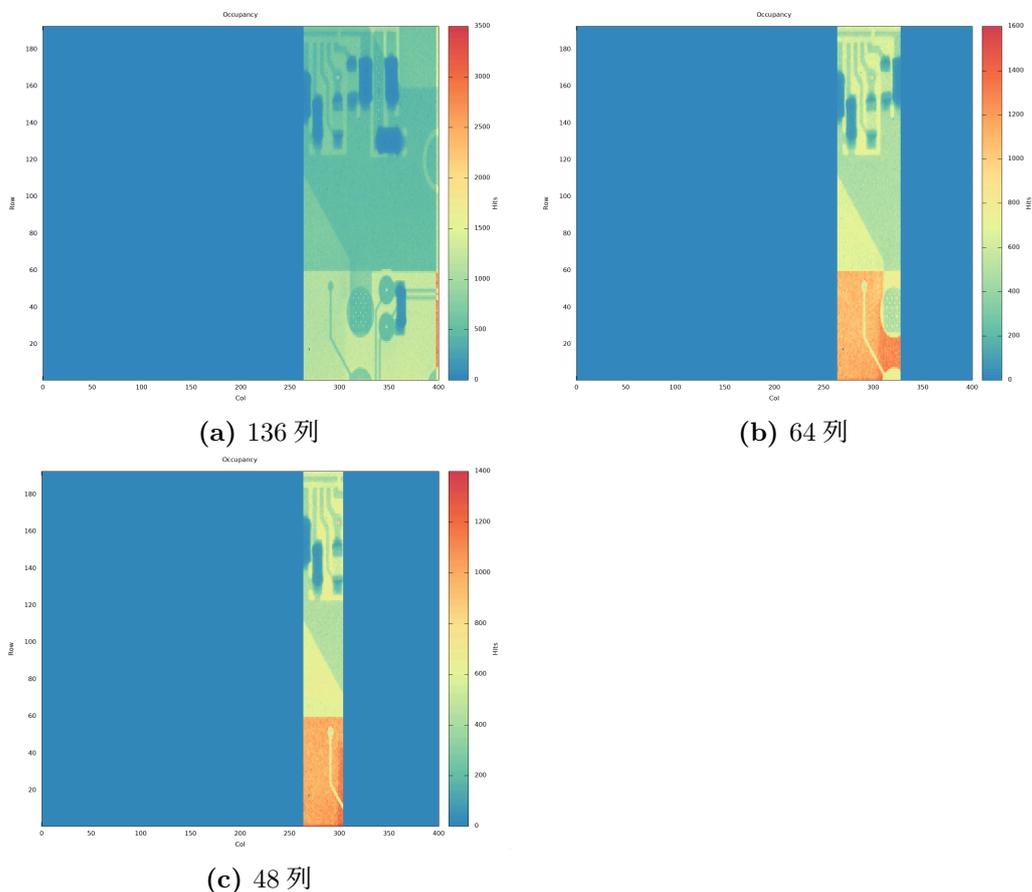


図 3.1: Diff における読み出しピクセル数を変えた時のそれぞれのトリガーレートが 100 kHz、30 s の Source Scan の結果。

3.2.2 結果

図 3.2 に測定結果を示した。赤色のプロットが取得トリガー数であり、青色の直線はトリガーレート \times 30 s (測定時間) で計算した予想トリガー数である。100 kHz を超えたあたりからどの読み出しピクセル数でも測定値が予想トリガー数より少なくなり、およそ 4×10^6 イベントに落ち着いている。また、図 3.3 に予想トリガー数と測定値の比を示したが、この結果から、4 チップを同時に読み出しの際に Diff のトリガーレートを上げていくと、100 kHz までは数%ほどの欠損はあるが、取得トリガー数はほぼ正常である。取得トリガー数は正常だが、Source Scan のデータ自体が正常に取得できているかを確認めるために図 3.4 に赤枠で示した領域の平均ヒット数をトリガーレートごとに計算し、取得トリガー数と比較した。その結果

を図 3.5 に示す。この結果から平均ヒット数は取得トリガー数の推移とほとんど一致しており、Source Scan のデータも正常に取得できていることがわかる。読み出しピクセル数が増加しても、トリガーレートの上限が大きく変化しなかった。この結果からトリガーレートを制限している原因がデータサイズではないことが分かった。

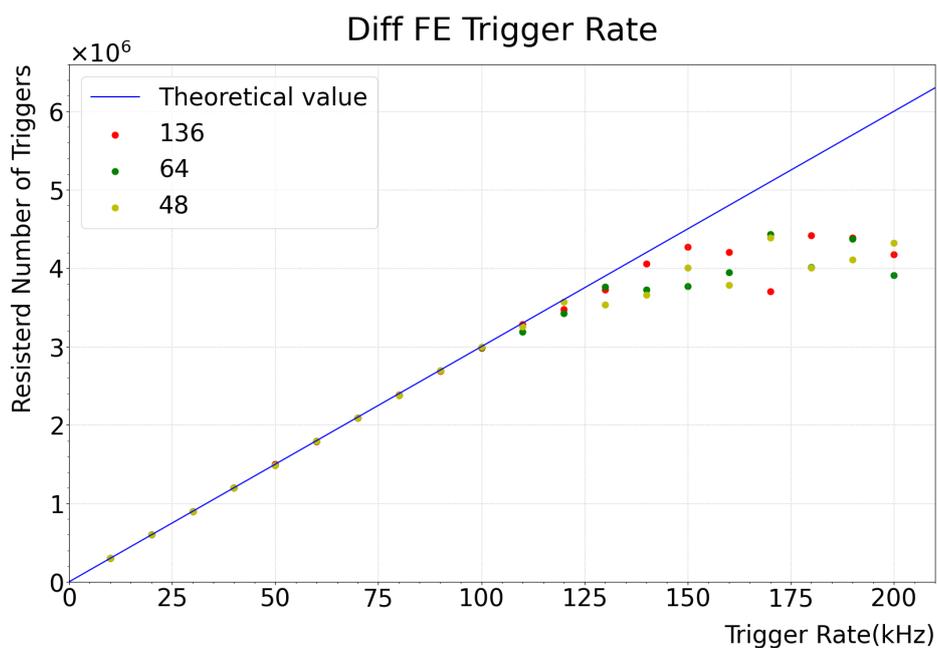


図 3.2: 30 秒の Source Scan での予想トリガー数と取得トリガー数。赤色のプロットが取得トリガー数、青の直線で示したのが予想トリガー数である。

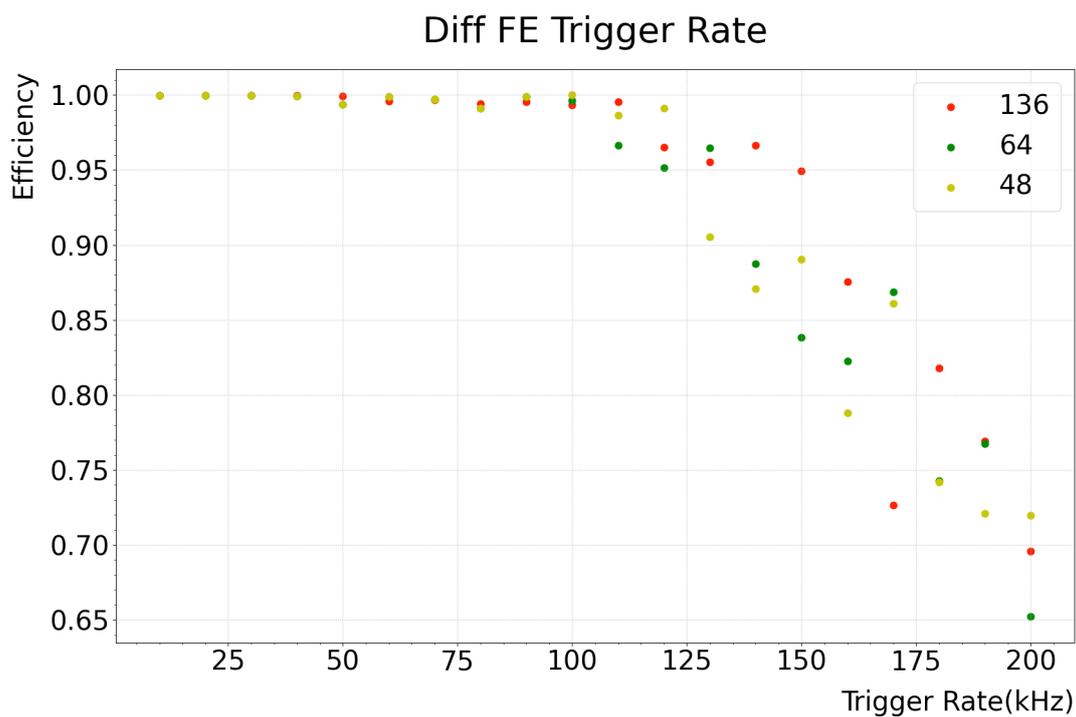


図 3.3: 30 秒の Source Scan での予想トリガー数と取得トリガー数の比。

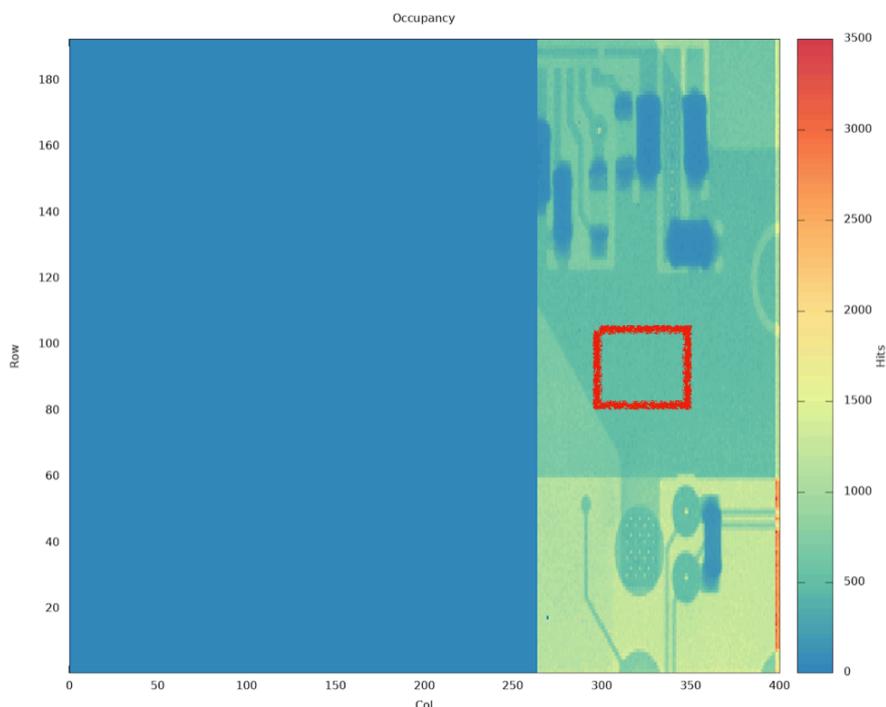


図 3.4: 平均ヒット数を計算する際に使用したある領域。80 から 100 列、300 から 350 行の領域を使用した。

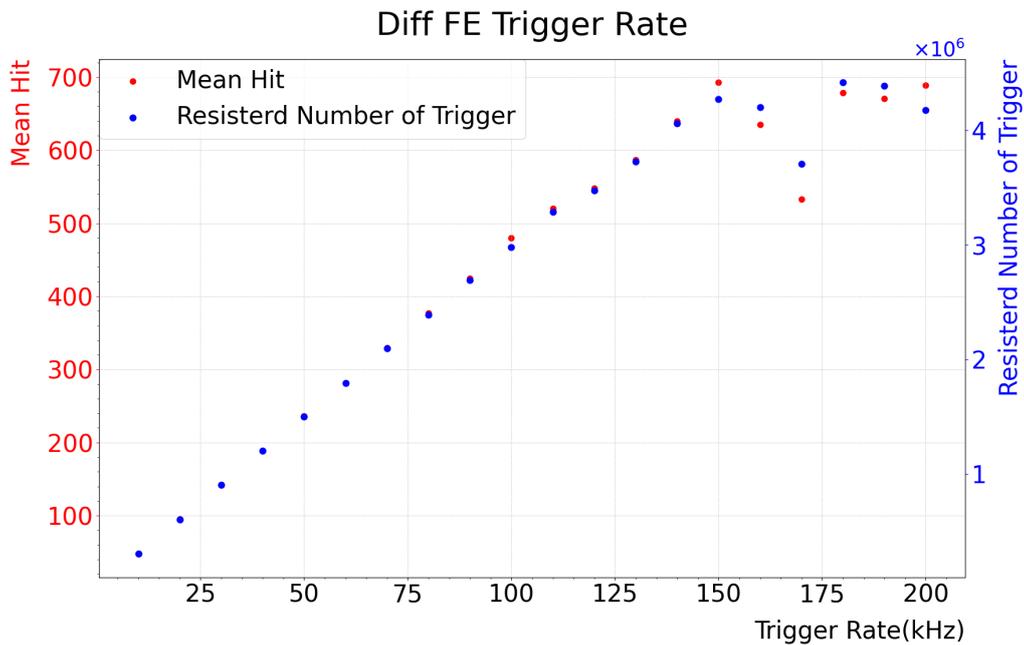


図 3.5: 30 秒の Source Scan での取得トリガー数とある領域の平均ヒット数の関係。赤色のプロットが平均ヒット数、青のプロットが取得トリガー数である。

3.3 1 チップ読み出しでのトリガーレートの測定

3.2 節で行った実験では、ASIC の 4 つのチップを同時に読み出している。しかし Source Scan において 4 チップ同時読み出しでトリガーレートを上げていくと、以下の二つの問題がある。

1. DAQ が不安定になり、スキャンが途中で止まる。
2. それぞれのチップのスキャン結果が混ざる。

現在、この問題は ATLAS グループとして認識しており、解決に向けて取り組みがなされているが、本研究では一時的に回避する方向で実験を進めた。そこで、問題 2 を回避するために、読み出しチップ数を 1 にすることを考えた。そこで、読み出しチップ数 1 の時の、問題 1 とトリガーレートの上限を調べる。

3.3.1 測定手順

フロントエンドは新型モジュールで使用される Diff のみを使用した。読み出しの際にどのチップを使用するかは設定ファイルで指定することができ、30 秒の Source Scan をトリガーレートを変えながら行った。

3.3.2 結果

図 3.6 に測定結果を示した。赤色のプロットが取得されたトリガー数であり、青色の直線はトリガーレート \times 30 s (測定時間) で計算した予想トリガー数である。この結果から読み出しチップ数を 1 にして Source Scan を行うと、トリガーレート 200 kHz までは取得トリガー数は正常であり、210 kHz では急激に減少し、220 kHz では 0 であった。チップに依存している可能性も考慮し、同じモジュールのチップ 2、3、4 に対しても同様の実験を行ったが、200 kHz までは正常な取得トリガー数であり、220 kHz では取得トリガー数が 0 というチップ 1 と同じ結果が得られた。また、3.2 節と同様に Source Scan のデータ自体が正常に取得できていることを確かめるために図 3.4 に赤枠で示した領域の平均ヒット数をトリガーレートごとに計算し、取得トリガー数と比較した。その結果を図 3.7 に示す。この結果から平均ヒット数は取得トリガー数の推移とほとんど一致しており、Source Scan のデータも正常に取得できていることがわかる。

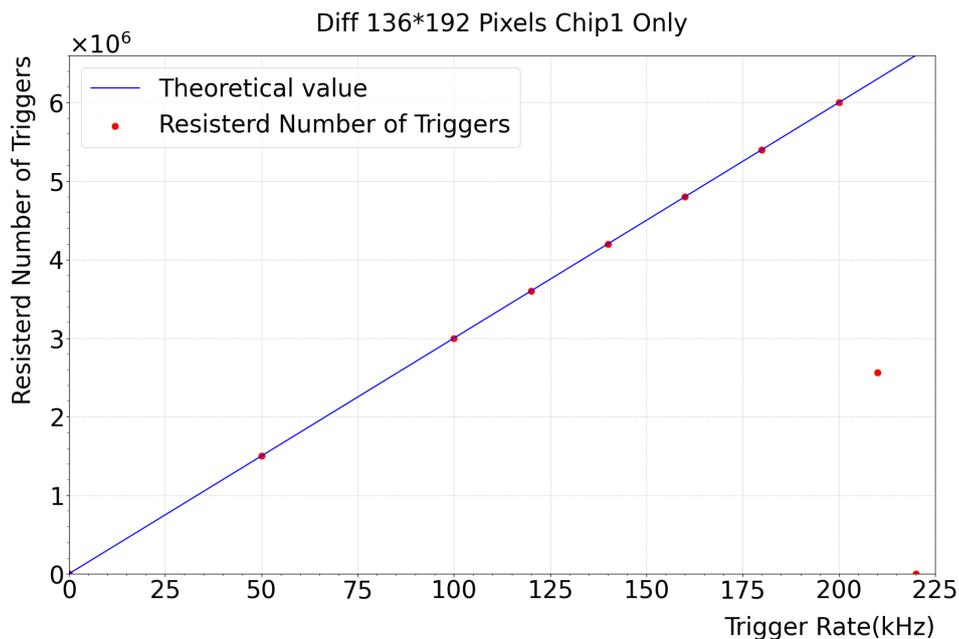


図 3.6: 30 秒の Source Scan での予想トリガー数と取得トリガー数。チップ 1 枚に対する読み出しで、赤色のプロットが取得トリガー数、青の直線で示したのが予想トリガー数である。

Source Scan を 1 チップ読み出しで行った場合、トリガーレート 200 kHz まではほとんど予想トリガー数と同じトリガー数を取得できた。また、問題 1 についても 1 チップ読み出しでトリガーレート 200 kHz で 10 回ほどスキャンを行ったが、途中で止まるという現象は起こらなかった。そこで、本研究では、1 チップ読み出しかつトリガーレート 200 kHz という設定で Source Scan を行う。

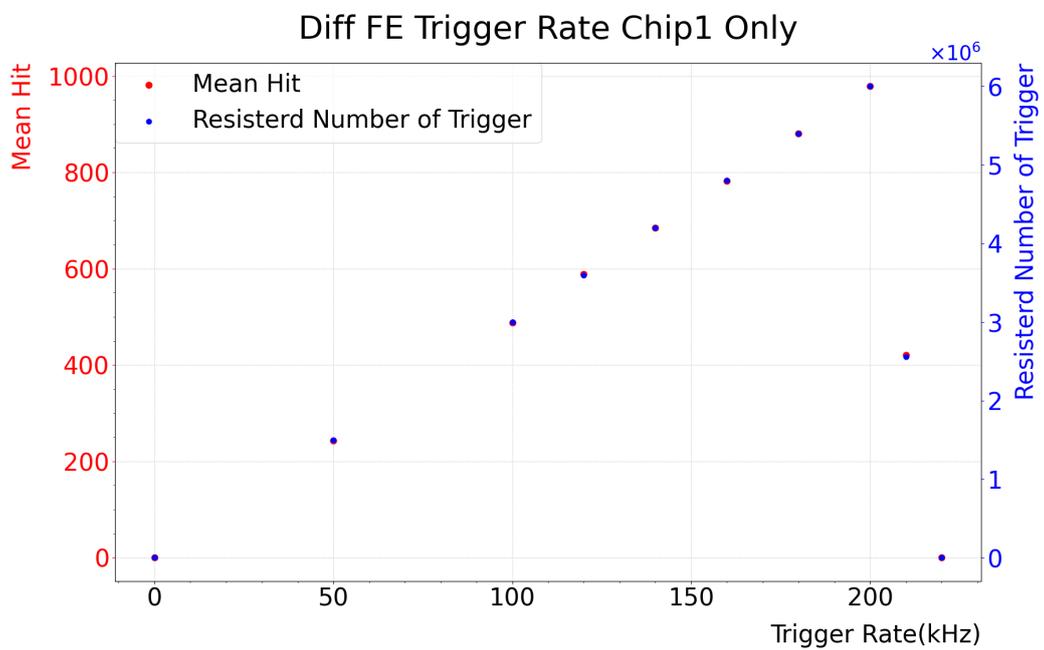


図 3.7: 30 秒の Source Scan で取得されたトリガー数とある領域の平均ヒット数の関係。赤色のプロットが平均ヒット数、青のプロットが取得トリガー数である。

第4章 ノイズ測定

この章では、X線を照射せず、Source Scanと同様にデータを読み出し、ノイズを測定した。4.1節でこの測定の目的について説明し、4.2節で結果を示す。

4.1 目的

Source Scanの際、センサーや回路で発生したノイズが閾値を超えてしまうと、実際はセンサー内に信号が生成されていなくてもヒットと認識してしまう。このノイズ由来の偽のヒットが増えると偽接続を引き起こす原因になる。そこで、Source Scanと同様の測定をX線を照射せずに長時間行い、ノイズによるヒット確率を調べる。

4.2 結果

最終版のモジュールに使用されるDiffのみを用い、X線を照射せず、トリガーレート5 kHz、20分間の測定を20回行った。測定の結果、異なるピクセルに3個のヒットがあった。まず、ノイズによるヒット確率（ノイズによるヒット数/実効的な全トリガー数）を計算する。この測定での全トリガー数Nは、

$$N = 5 \times 10^3 \text{ [Hz]} \times 1200 \text{ [s]} \times 20 = 1.2 \times 10^8. \quad (4.1)$$

フロントエンドの全てのピクセルについて、ノイズによるヒット確率が同じと仮定すると、全てのピクセルをまとめて考えて良い。使用したフロントエンドは136行192列からなっており、それが4チップ分あるので、実効的な全トリガー数 N_e は、

$$N_e = 1.2 \times 10^8 \times 136 \times 192 \times 4 = 1.3 \times 10^{13}. \quad (4.2)$$

ノイズによるヒット確率Pは、

$$P = \frac{3}{1.3 \times 10^{13}} = 2.3 \times 10^{-13}. \quad (4.3)$$

次に、実際にこのモジュールのひとつのピクセルのノイズ量と閾値から、ノイズによるヒット確率を考える。アンプで計測する電荷量はノイズによって揺らぐ。

この揺らぎをガウシアンと仮定した時の 1σ に対応する値をノイズ量と定義する。これは閾値測定の際に測定することができる。図 4.1 にチップ 1 のピクセル毎に測定したノイズ量の分布を示す。この図を見るとノイズ量が 50e 付近のピクセルが多いことがわかり、100e 近くまで分布する。

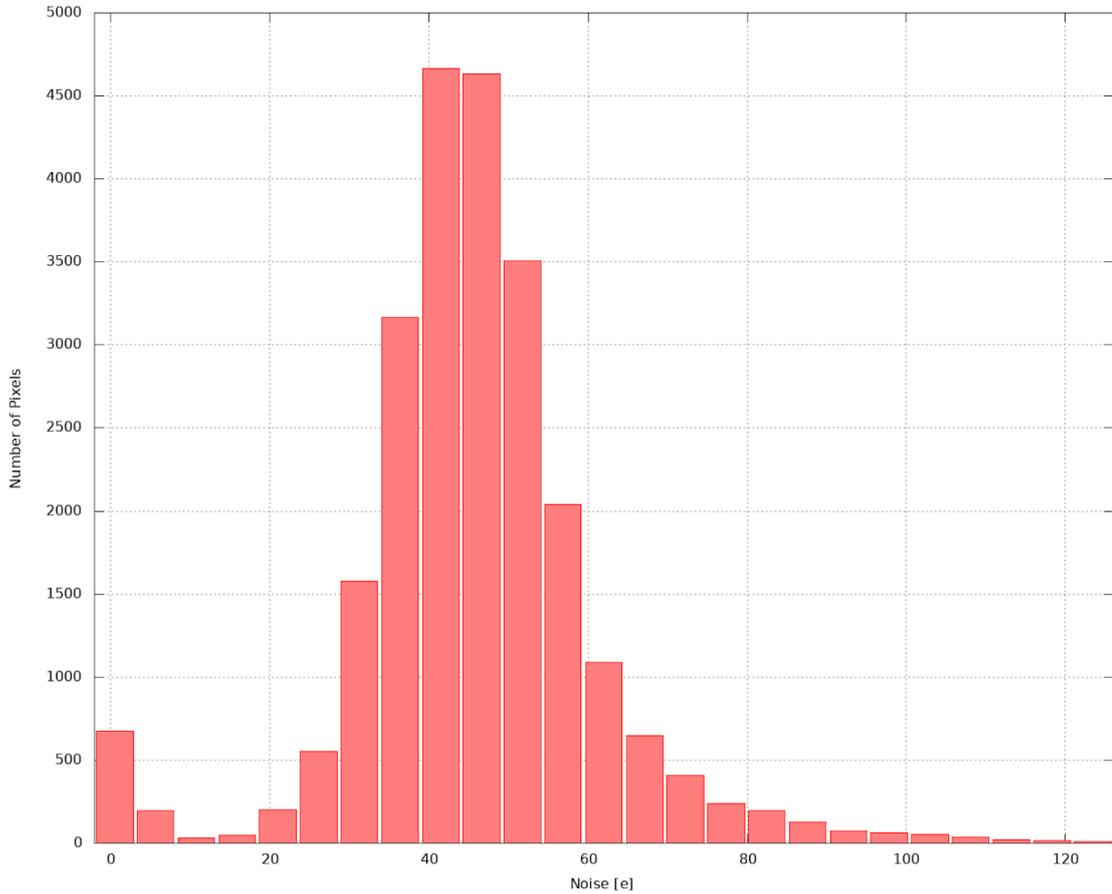


図 4.1: チップ 1 の全てのピクセルのノイズ量の分布。

そこで、ノイズ量 100e のピクセルを仮定し、閾値が 1500e のとき、ノイズによるヒット確率を計算する。電荷を入力していないため 0 e を中心として $1\sigma = 100 e$ のガウシアンが 1500 e 以上の値をとる確率は、

$$\int_{1500}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times 100^2}\right) dx = 3.7 \times 10^{-51}. \quad (4.4)$$

この確率に、式 4.2 で求めた N_e を掛け、ノイズによるヒットの数は

$$3.7 \times 10^{-51} \times 1.3 \times 10^{13} = 4.8 \times 10^{-38}. \quad (4.5)$$

この結果から、今回の測定条件ではノイズ由来のヒットはないはずである。

次に、ノイズ測定で観測された 3 個のヒットについて、宇宙線によるヒットの可能性を考える。この実験は KEK の地上 2 階建ての研究棟の地下 4 階の実験室で

行ったが、2階から地下4階までは吹き抜けになっているため、地表の宇宙線レートの、 $1 \text{ hit/cm}^2/\text{min}$ を用いる。1つのフロントエンドのみを測定に使用したため、検出可能なピクセルの総面積は4チップ合計して 2.72 cm^2 である。検出時間は、全トリガー数 N が 1.2×10^8 であり、1トリガーあたりの検出時間が 400 ns であるため、全体の検出時間は全トリガー数 \times 1トリガーあたりの検出時間 = 48 [s] となる。よって、今回の測定での宇宙線による予測ヒット数は、

$$1 \text{ [/cm}^2 \cdot \text{min]} \times 2.72 \text{ [cm}^2] \times \frac{48}{60} \text{ [min]} = 2.2. \quad (4.6)$$

これは測定結果の3ヒットと矛盾しない。宇宙線によるヒットは、バンプ接続の評価という観点ではノイズではなく有効なイベントである。しかし、このヒットが宇宙線によるヒットだと判定する方法が今回の測定ではないため、式 (4.3) で求めた P がノイズヒットの確率と考えて考察での議論に用いる。

第5章 表面実装部品のX線遮蔽度合いの測定

この章では、表面実装部品のX線遮蔽度合いの測定と、その結果について述べる。5.1節でこの測定の目的について説明し、5.2節で測定手順と結果について説明する。

5.1 測定の目的

3章の測定の結果、1チップ読み出しのSource Scanでは、トリガーレートを200kHzにできた。そこで、実際に表面実装部品のX線遮蔽度合いを調べ、その中で最も遮蔽によるX線の減衰が大きい部品に対しての平均ヒット数を確認する。この結果とともに6章で新たな評価基準におけるSource Scanの正確性について議論する。

5.2 部品を設置した状態でのSource Scan

この節では、まず、測定に使用する4種類の部品について説明し、5.2.1項で測定手順と、これ以降の概要について述べる。

現在KEKではX線を用いたSource Scanはプロトタイプモジュールにしか行えない^a。プロトタイプモジュールには、最終版モジュールに使用される表面実装部品とほとんど同じ部品が実装されている。プロトタイプモジュールの中央部には、データ送受信用のコネクタや、センサーに印加するHV用のコンデンサなどがある。しかし、1.2.2項で述べたようにASICのサイズが半分しかなく、モジュールの中央部を読み出せないため、Source Scanの際、これらの部品の下のヒット数は分からない。そこで、プロトタイプモジュールで読み出すことができ、空いているスペースに最終版モジュールに使う表面実装部品を設置し、Source Scanをした。最終版モジュールで使われる表面実装部品の中でX線を特に遮蔽すると考えられる部品を図5.1に示す。^bバイパスコンデンサはプロトタイプモジュールモジュール

^a最終版のモジュール用の冷却装置を開発中のため。

^b表面実装抵抗もいくつか存在するが、本体部分はほとんどX線を遮蔽せず、はんだ付けされている部分のみ遮蔽の影響が見えていた。これは、バイパスコンデンサのはんだ付けされている部

の読み出し可能領域内にあるため、データコネクタ、HV コンデンサ、電源コネクタの3種類を設置して読み出す。これらの部品を以下で説明する。

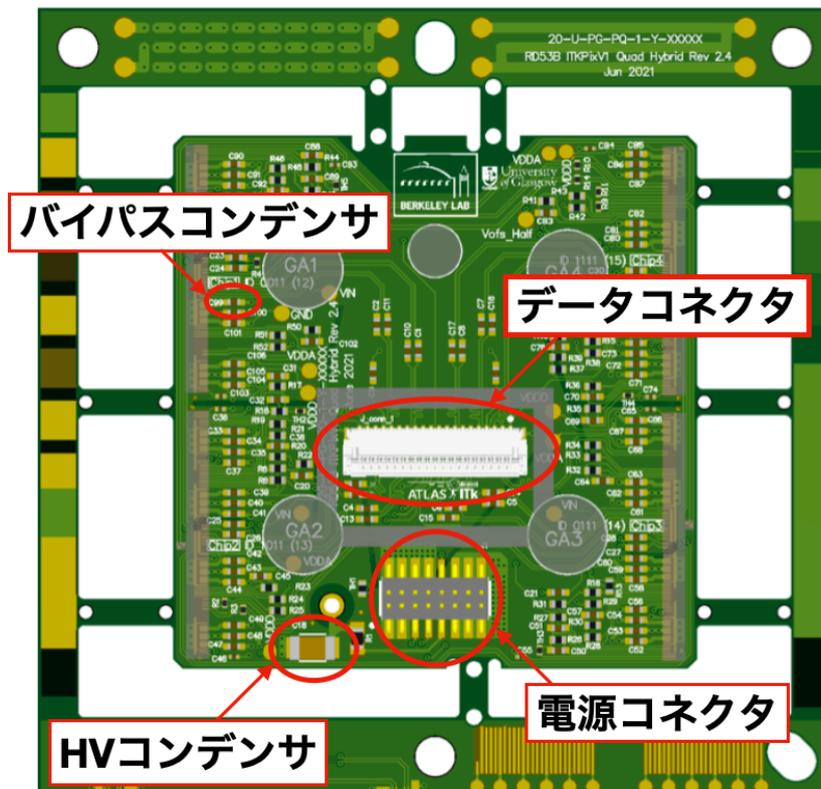


図 5.1: 最終版での X 線を遮蔽する可能性の高い表面実装部品。

- バイパスコンデンサ：回路基板に複数実装されているコンデンサであり、メーカーは様々だが、そのほとんどのサイズが 1005[°]である。
- HV コンデンサ：センサーに印加する HV 用のコンデンサであり、定格電圧は 1.5 kV、サイズは 3216 である。このコンデンサは全ての表面実装コンデンサの中で最もサイズが大きい。
- 電源コネクタ：ASIC の電源供給ケーブル用のコネクタである。実際に使う、Samtec 社製の 8 ピン 2 列のコネクタと同じものを使用した。図 5.2 に電源コネクタを組み立てた際の工程を示した。なるべく実際の実験で用いる際の状況に近い状態に近づけるために測定の際

分とほとんど同じであるため、バイパスコンデンサについて調べることで代用できると考え今回は表面実装抵抗を考慮しない。

[°]表面実装部品の中の角形チップ部品のサイズを表している。ここで使用しているのは JIS 規格であり、1005 の場合、幅 0.5 mm 長さ 1.0 mm である。

にはケーブルとコネクタをはんだ付けし、モジュールの上に置くようにケーブルを切断した。

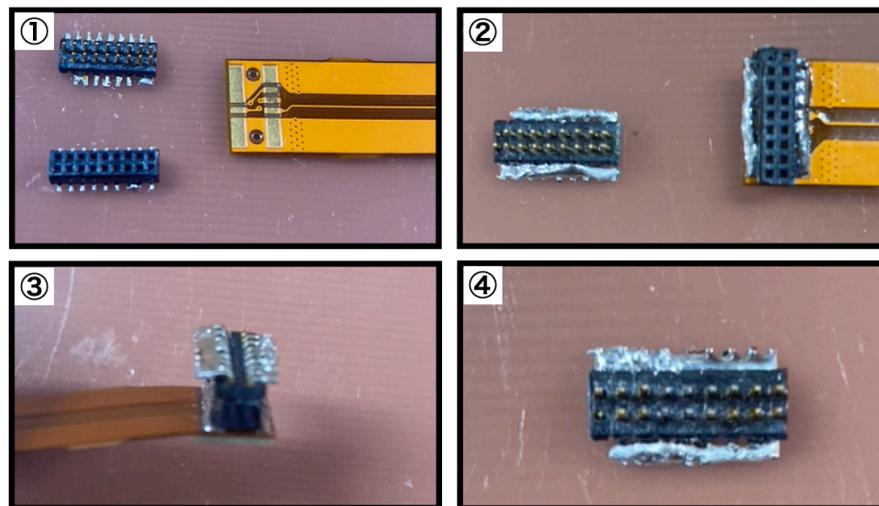


図 5.2: X線遮蔽度測定に使用した電源コネクタ。実際に使用するケーブルにコネクタをはんだ付けし、コネクタにハンダ付けされている部分以外のケーブルを切断した。

- データコネクタ：データ送受信ケーブル用の Molex 社製のコネクタである。実際と同じものを使用した。図 5.3 に示すようにケーブルを差し込み切断した。

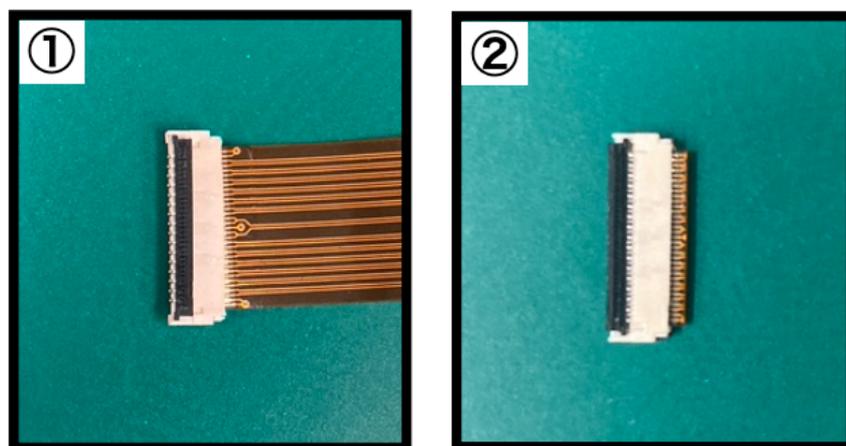


図 5.3: X線遮蔽度測定に使用したデータコネクタ。ケーブルを差し込み、切断した。

5.2.1 測定手順

前節で述べたように、プロトタイプモジュールの回路基板の空いたスペースに対象の部品を置き、Source Scan を行った。部品を実際に置いた写真を図 5.4 に示

す。この場所に部品を設置した状態で X 線を照射し、全てのチップに対し 1 チップずつ Source Scan を行った。その後、X 線の照射を止め、各部品を取り除き、再度 X 線を照射し部品を何も置かない状態での Source Scan も別途行った。これは、後に部品が何もない状態と比較して X 線の遮蔽率を計算するためである。部品を置いている場所は図 5.5 から分かるように表面実装部品がない。また、プロトタイプモジュールの読み出し領域内でもあるためこの場所を選んだ。部品が基板と直接接触するのを防ぐため、部品をポリイミドテープで完全に覆い、測定中に動いたり倒れたりすることを防ぐため基板にポリイミドテープで固定した。Source Scan のトリガーレートを 200 kHz、測定時間を 60 秒にした。また、部品が固定されている Lin フロントエンド領域のみを使った。

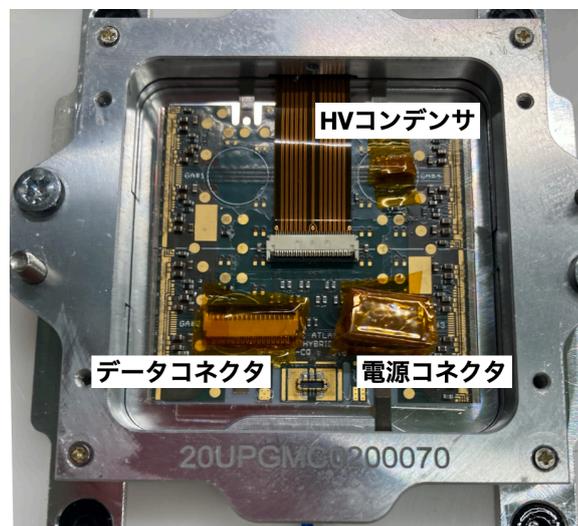


図 5.4: モジュールに部品を固定した写真。

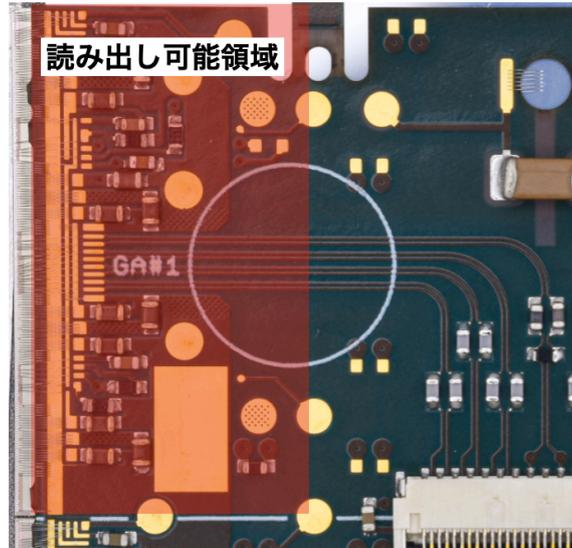


図 5.5: プロトタイプモジュールのチップ1の上の回路基板の拡大図。検出器構造体に設置していく際に、モジュールを真空吸着して保持するためのスペースとして部品を置かない領域が作られている。赤い領域は読み出しが可能な領域。

これ以降は、5.2.2 項で表面実装部品がない領域でのヒット数分布を、ポアソン分布でフィットし、その妥当性を確認する。5.2.3 項でバイパスコンデンサに対しての平均ヒット数を求め、5.2.4 項では、HV コンデンサ、データコネクタ、電源コネクタによる X 線の減衰率を計算する。そして、最も遮蔽による X 線の減衰が大きい電源コネクタに対し、5.2.5 項で平均ヒット数を求める。

5.2.2 部品のない領域でのヒット数分布

この測定では、1 回の Source Scan でのヒット数を議論する際、1 ピクセルのヒット数ではなく、複数ピクセルのヒット数の分布を考える。この分布はポアソン分布と考えられるので、ポアソン分布でフィットし、その期待値を平均ヒット数として使う。しかし、ポアソン分布とするには、以下の 3 つの条件を満たす必要がある。

- 1 回の Source Scan でセンサーに入射する X 線の数があるピクセルでも同じ。
- センサーが X 線を検出する確率がどのピクセルでも同じ。
- 各ピクセルのヒット事象が独立。

しかし、センサーに入射する X 線の本数は透過する物質質量によって変わる。また、X 線の光電効果により生成された電子が同時に隣り合った 2 つのセンサーにヒットを与える場合、ヒット事象は完全に独立ではない。

そこで、実際にヒット数分布がポアソン分布に従うかを確認する。この時、条件の 1 つであるセンサーに入射する X 線の本数を一定にするため X 線が通過する物質質量が均一になるように複数のピクセルの領域を選ぶ。これを評価領域と定義する。まず、評価領域の選択方法について説明する。図 5.6 に 200 kHz、60 秒の Source Scan の結果を示す。これは z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップであり、PCB 基板の厚みの違いによる模様が見える。X 線が通過する物質質量をなるべく均一にするため、比較的ヒット数が一様な領域を含む赤枠で囲んだ部分に注目する。この部分のヒット数を 1 行毎に切り取り、横軸を列、縦軸をヒット数としたグラフを、図 5.7 に示す。この中から物質質量が均一な領域を選ぶため、図 5.7 のヒット数のばらつきが少なく傾きが小さい 128 列から 140 列、150 列から 162 列をそれぞれ領域 1、2 とした。

この 2 つの評価領域のピクセルのヒット数分布と、それをポアソン分布でフィットしたものを図 5.8 に示す。

このポアソンフィットの有意確率は χ^2 分布表から領域 1 では 0.1% より小さいが、領域 2 では 5% ほどである。領域 1 に関しては精度の良いフィットとは言えないが、領域 2 に関しては許容できる有意確率である。そこで、本論文では X 線が通過する物質質量が均一になるよう選んだ評価領域内のピクセルのヒット数分布をポアソン分布と考える。領域 1 と領域 2 とともに、図 5.7 を見ると、大きく飛んでい

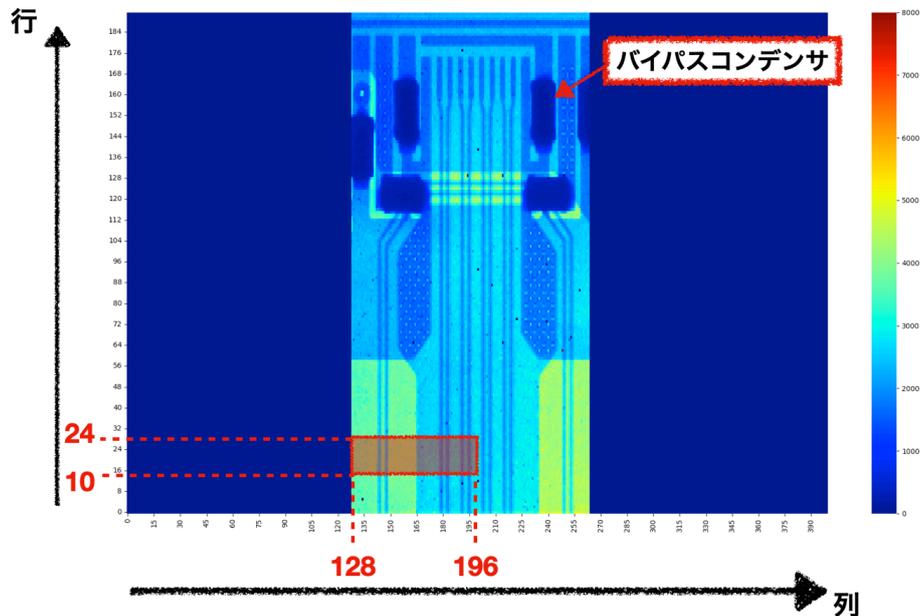


図 5.6: トリガーレート 200 kHz、60 秒の Source Scan の結果を表す z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。上部の長方形で濃い青色の部分はコンデンサとハンダによって X 線が遮蔽されヒットが少なくなっている部分。また、模様のように見えているのは PCB 基板のパターン。

る値があり、図 5.8 を見ても、ピークから離れている点がある。これは、ピクセルの閾値調整がうまくできていないことが原因の一つだと考える。各ピクセルの閾値を個別に測定し、大きく値が飛んでいるピクセルの閾値を確かめることで検証できるが、これは今後の課題である。

5.2.3 バイパスコンデンサ下の平均ヒット数

バイパスコンデンサに対して Source Scan の結果から平均ヒット数を求める。バイパスコンデンサはプロトタイプモジュールに実装されているため、すでに実装されているものを対象に、Source Scan を行った。その時のヒートマップを図 5.9 に示す。バイパスコンデンサ下の評価領域を選ぶため、まず、ヒートマップからコンデンサを含む領域を選び、その領域を 1 行毎に切り取り、横軸を列、縦軸をヒット数にしたグラフを図 5.10 に示す。この図の y 方向へのばらつきと傾きが少ない青枠で囲んだ領域を平均ヒット数の計算に使う。

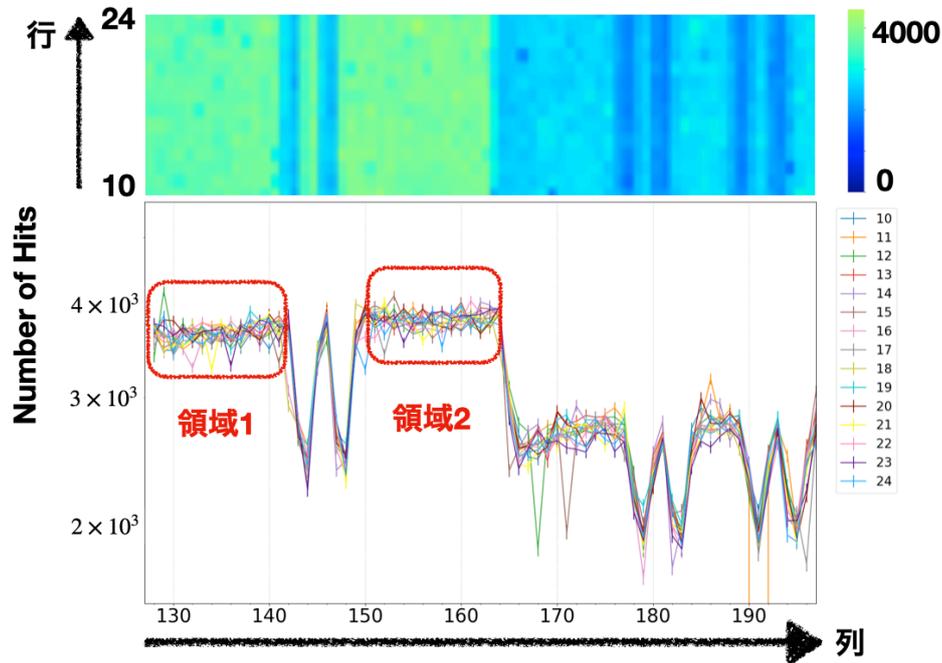


図 5.7: 図 5.6 の赤枠で囲まれた部分を 1 行毎に切りとったグラフ。それぞれのグラフは凡例で示されている行のデータに対応する。上にあるのは二次元ヒートマップから切り取った部分で x 方向は断面図と対応している。160 列以上の部分は PCB の電源供給用の銅レイヤーが 1 枚増えるのでヒット数は減っている。また、所々見えるヒット数が急激に減っている部分はデータ送受信信号線の影響である。

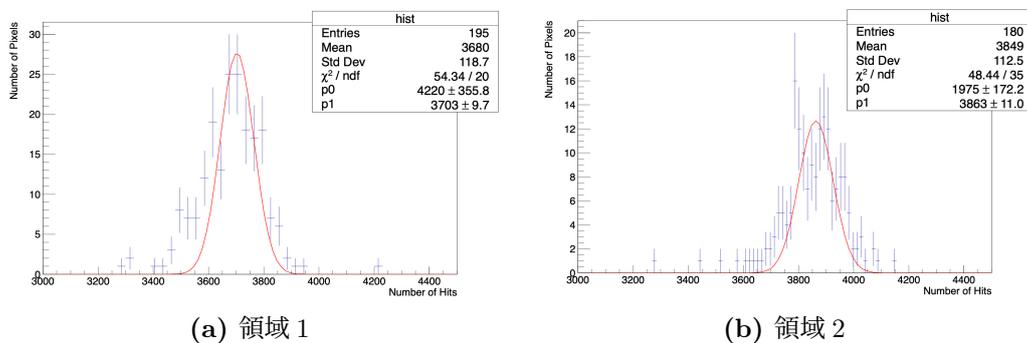


図 5.8: ヒット数分布を、ポアソン分布でフィットしたもの。

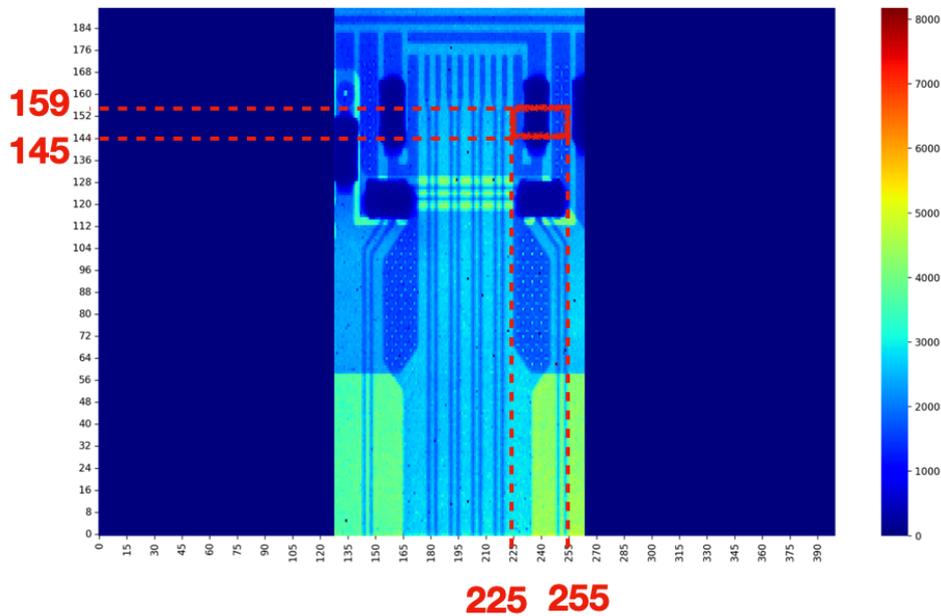


図 5.9: 200 kHz、60 秒の Source Scan の結果を表す z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。

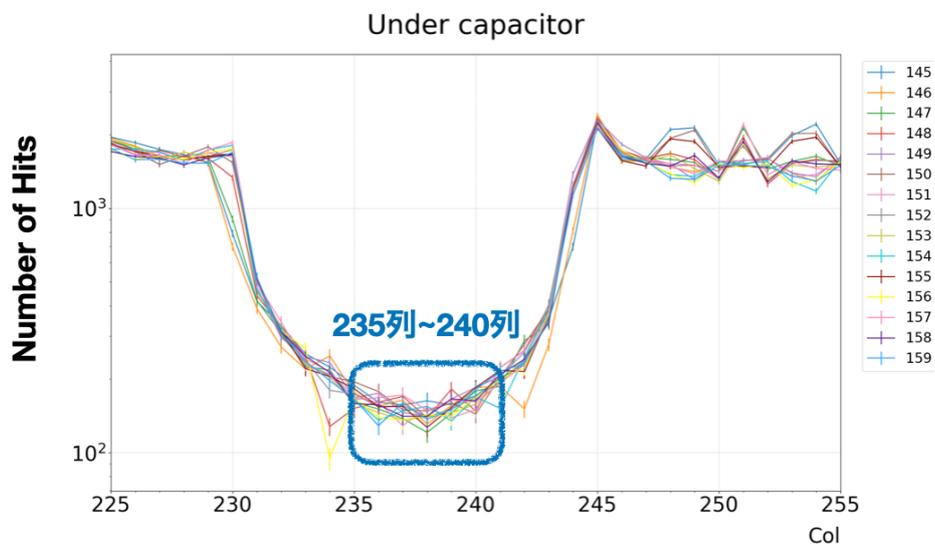


図 5.10: 図 5.9 の赤枠で囲まれた部分を 1 行毎に切り取ったグラフ。それぞれのグラフは凡例で示されている行のデータに対応する。バイパスコンデンサによってヒット数が減少している部分が見える。青枠で囲んだ領域を平均ヒット数の計算に使う。

この領域のヒット数分布をポアソン分布でフィットしたものを図 5.11 に示す。 χ^2

表から有意確率は約 50% であり、妥当である。トリガーレート 200 kHz での Source Scan、60 秒におけるバイパスコンデンサの平均ヒット数は 156 ± 2 ヒットである。

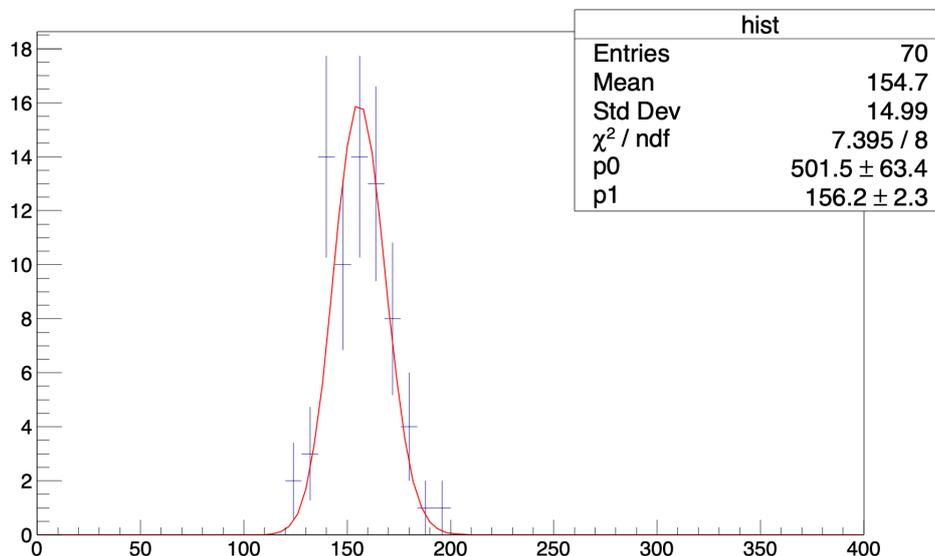


図 5.11: バイパスコンデンサのヒット数分布を、ポアソン分布でフィットしたもの。

5.2.4 HV コンデンサ、データコネクタ、電源コネクタの遮蔽による X 線の減衰率の測定

HV コンデンサ、データコネクタ、電源コネクタのそれぞれの遮蔽による X 線の減衰率を求める。そのために、3つの部品に対して、評価領域を決定する。次に、部品を置いた時と置いていない時の X 線の安定性について確認し、それを考慮した 3つの部品の遮蔽による X 線の減衰率を測定した。

HV コンデンサ下の評価領域の決定 HV コンデンサをモジュールの上に設置し、Source Scan を行った。その時のヒートマップを図 5.12 に示す。ヒートマップから HV コンデンサを含む領域を選び、その領域を 1 行毎に切り取り、横軸を列、縦軸をヒット数としたグラフを図 5.13 に示す。この図の y 方向へのばらつきと傾きが少ない赤枠で囲んだ評価領域を減衰率の計算で使用する。

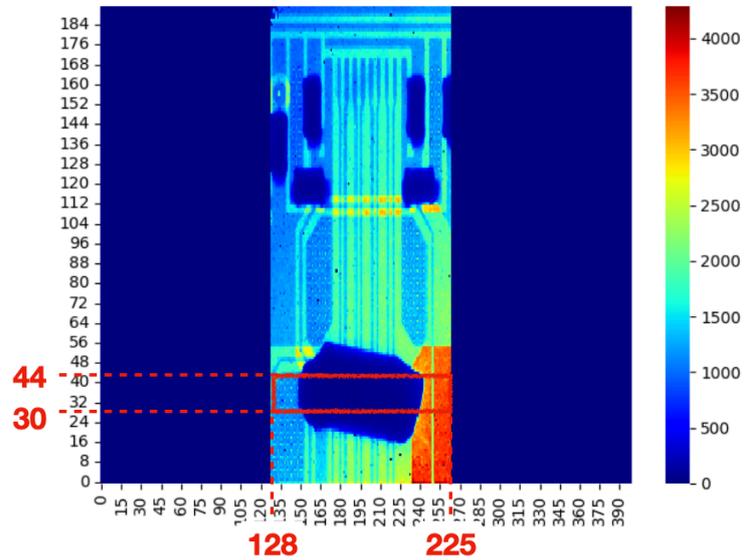


図 5.12: HV コンデンサをモジュールの上に設置し、行った 200 kHz、60 秒の Source Scan の結果を表す z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。

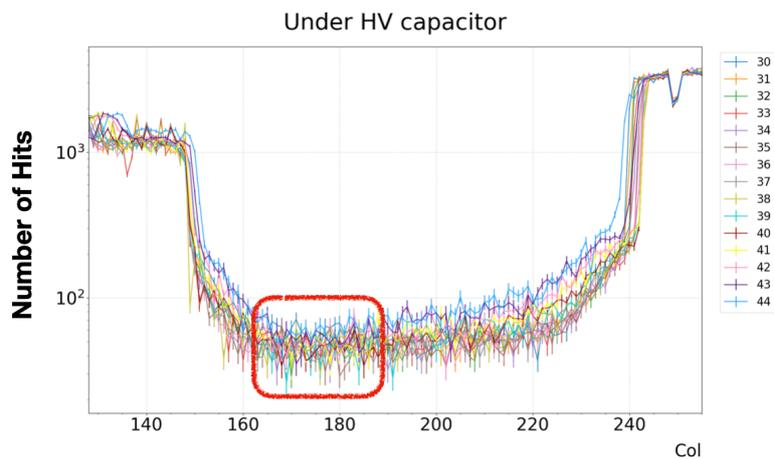


図 5.13: 図 5.12 の赤枠で囲まれた部分を 1 行毎に切り取ったグラフ。それぞれのグラフは凡例で示されている行のデータに対応する。この図の赤枠で囲んだ評価領域をのちに減衰率の計算で使用する。

データコネクタ下の評価領域の決定 データコネクタをモジュールの上に設置し、Source Scanを行った。その時のヒートマップを図5.14に示す。ヒートマップからデータコネクタを含む領域を選び、その領域を1行毎に切り取り、横軸を列、縦軸をヒット数の断面図にしたグラフを図5.15に示す。この図のy方向へのばらつきと傾きが少ない赤枠で囲んだ評価領域を減衰率の計算で使用する。

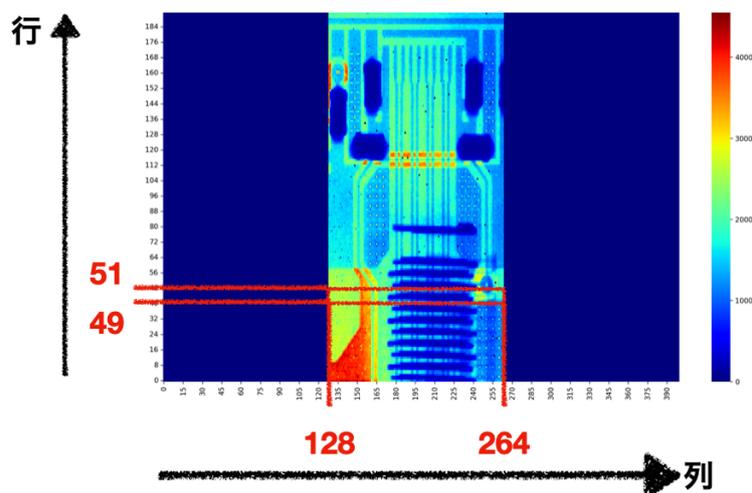


図 5.14: データコネクタをモジュールの上に設置し、行った 200 kHz、60 秒の Source Scan の結果を表す z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。



図 5.15: 図 5.14 の赤枠で囲まれた部分を 1 行毎に切り取ったグラフ。それぞれのグラフは凡例で示されている行のデータに対応する。この図の赤枠で囲んだ評価領域をのちに減衰率の計算で使用する。

電源コネクタ下の評価領域の決定 電源コネクタをモジュールの上に置き、Source Scan を行った。その時のヒートマップを図 5.16 に示す。ヒートマップから電源コネクタを含む領域を選び、その領域を 1 行毎に切り取り、横軸を列、縦軸をヒット数としたグラフを図 5.17 に示す。この図の y 方向へのばらつきと傾きが少ない赤枠で囲んだ評価領域を減衰率の計算で使用する。

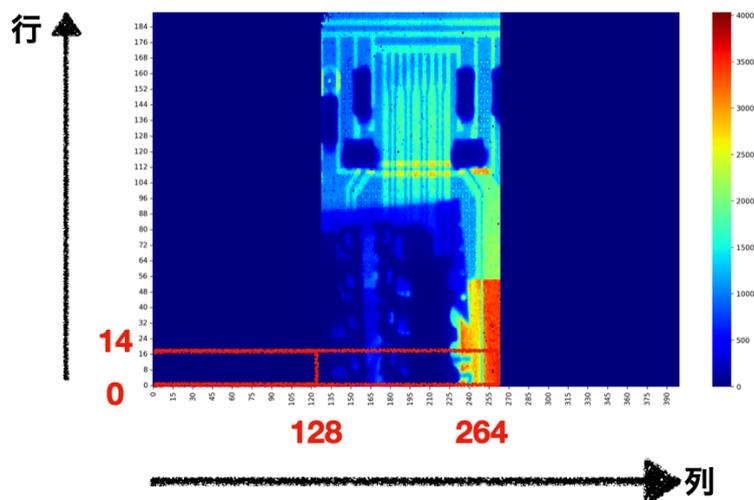


図 5.16: HV コンデンサをモジュールの上に置いて行った 200 kHz、60 秒の Source Scan の結果を表す z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。

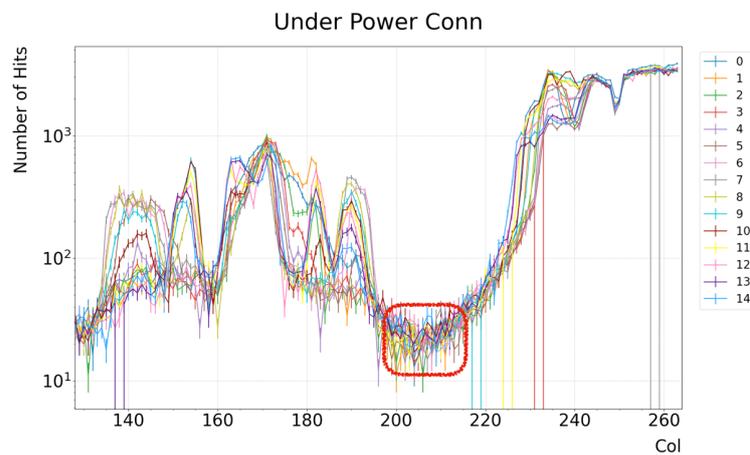


図 5.17: 図 5.16 の赤枠で囲まれた部分を 1 行毎に切りとったグラフ。それぞれのグラフは凡例で示されている行のデータに対応する。この図の赤枠で囲んだ評価領域をのちに減衰率の計算で使用する。

X 線の安定性 3つの部品の減衰率の計算を行う前に、ある同じ領域の平均ヒット数を部品有り、無しの結果に対して求め、比較することで X 線の安定性を

確認する。この領域には部品がなく、また、部品ありの時、設置している部品の影響がない領域を選んだ。部品有り無しそれぞれのヒット数分布をポアソン分布によりフィットしたものを図 5.18 に示す。二つのポアソン分布の期待値は部品ありの時、2137 ヒット、部品なしの時 2200 ヒットである。部品ありの時平均ヒットはなしの時より 3% ほど小さいことがわかる。この測定は各チップの上に全ての部品を設置した状態と何も設置していない状態の 2 回で行ったため、この X 線の補正は全ての部品に共通であると考え、減衰率の計算で使用する部品ありの時のヒット数をそれぞれ 3% 増やす。

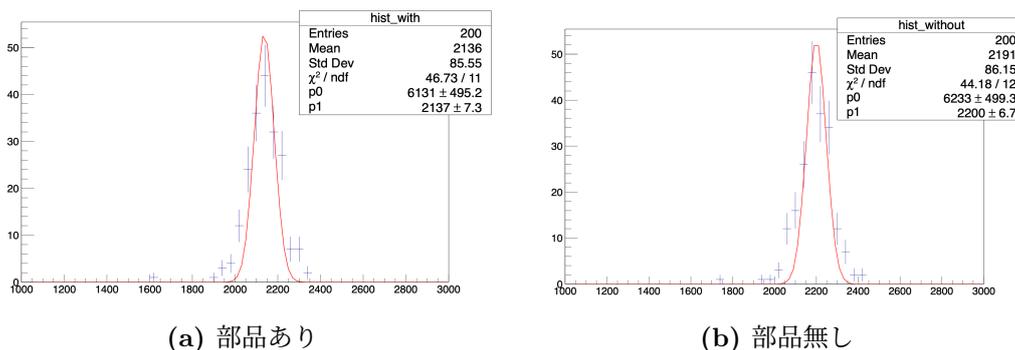


図 5.18: 安定して読みだせる領域のピクセルのヒット数分布を、ポアソン分布でフィットしたもの。

HV コンデンサ、データコネクタ、電源コネクタの減衰率 図 5.13、5.15、5.17 の赤枠で囲んだ、部品による減衰が最も大きく、物質量が均一と思われる領域を用い、部品有りと部品無しのヒット数の比をピクセル毎に求め、最後にそれらを平均したものを X 線の減衰率と定義する。それぞれの結果を以下の表 5.1 に示す。

表 5.1: それぞれの部品の X 線の減衰率

部品名	減衰率 (誤差)
HV コンデンサ	97.32(2)%
データコネクタ	84.84(4)%
電源コネクタ	98.82(1)%

この結果から、今回試した 3 つの部品のうち電源コネクタが最も遮蔽による X 線の減衰が大きいことがわかる

5.2.5 電源コネクタ下の平均ヒット数

最も遮蔽による X 線の減衰が大きかった、電源コネクタの下の平均ヒット数を求める。電源コネクタの減衰率を求める際に使用した評価領域の、電源コネクタ

なしのヒートマップを、図 5.19 に示す。この図の中心付近で縦にヒット数が減少しているように見える領域は PCB 基板のデータ送受信の信号線 (銅) である。

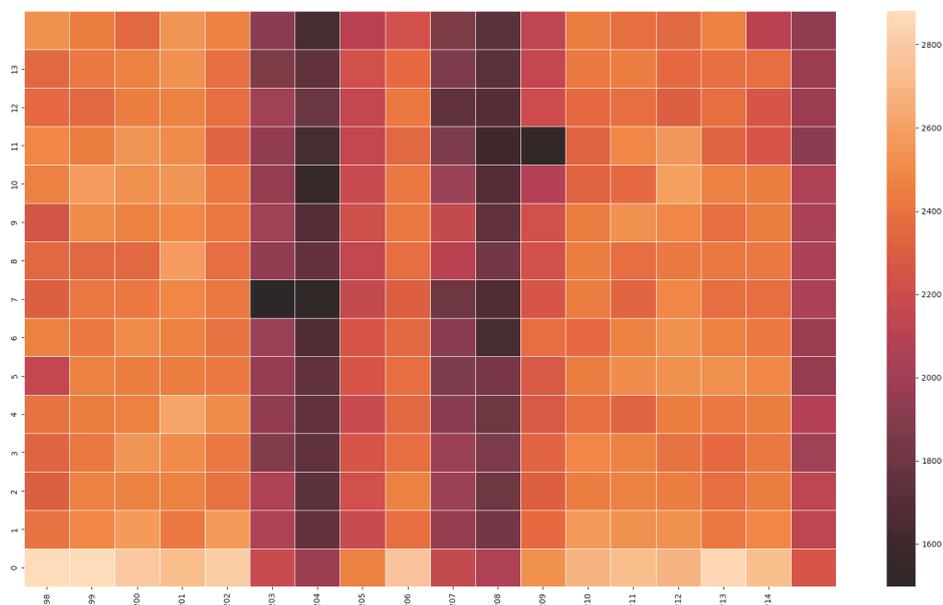


図 5.19: 電源コネクタの減衰率の計算の際に使用した領域のヒートマップ。中心に縦に 2 本ヒットが少ない領域があるが、これは PCB 基板のデータ送受信の信号線である。

この信号線のために位置によって、X 線が通過する物質量が違うのでこの領域全体のヒット数分布は厳密なポアソン分布とはならない。しかしひとまず電源コネクタありの測定結果に対し、この領域のヒット数分布とポアソン分布によるフィットを図 5.20a に示す。この図ではピークらしきものは 1 つしか見えず、低ヒット側へのテールも見えないので、信号線による寄与は分からない。一方、電源コネクタなしの測定結果に対し、この領域のヒット数分布とポアソンのフィットを 5.20b に示す。この図から、2400 ヒット周辺の大きな分布の他に低ヒット領域にも分布があるように見える。これは、信号線部分の物質量が周りより大きいためであり、2 つのポアソン分布でフィットした。この時、ヒット数が少ない領域のポアソン分布には期待値がなるべく小さくなるよう初期値を与えた。これは、最も遮蔽による X 線の減衰が大きくなる領域の平均ヒット数を見積もるためである。

実際の電源コネクタの構造の中で、最も X 線を遮蔽している部分は、ケーブルとハンダの部分であり、今回選んだ領域もこの部分に当たる。これは自身でハンダ付けをしたのでその精度にはよるが、物質量がほぼ均一だと仮定すると、この領域では減衰率も一樣と考えることができる。図 5.20b での信号線の下でのポアソンの期待値 (1755 ± 14) を減衰率を使って計算すると電源コネクタと信号線が重なった部分の平均ヒット数を求めることができ、その値は、

$$(1755 \pm 14) \times 0.012 = 21 \pm 0.2. \quad (5.1)$$

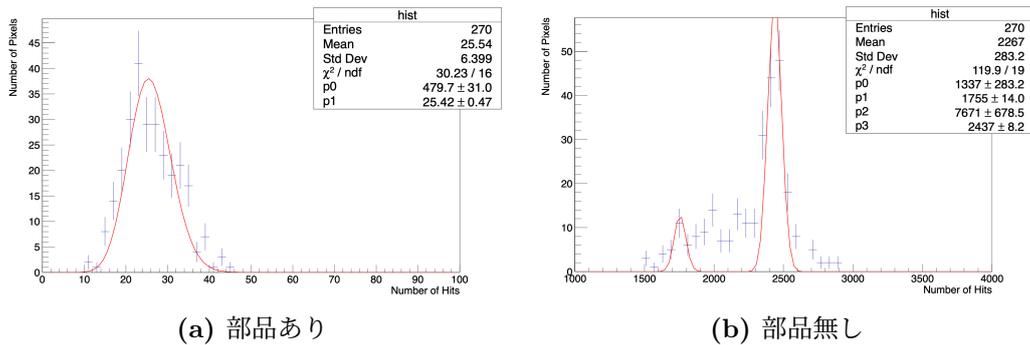


図 5.20: 電源コネクタの減衰率の計算の際に使用した領域のヒット数分布をポアソン分布で部品あり、なしについてそれぞれフィットしたもの。なしの時は、ポアソン分布を2つ定義している。これは信号線の銅パターンがある場所とない場所に対応する。部品ありの方も同じ領域を使用しているため本来2つのポアソン分布になると考えるが、平均値が低いため重なっているはずである。

今回用意した部品の中でもっとも X 線の遮蔽率が高いのは電源コネクタであった。その電源コネクタと信号線という、今回の測定で、最も遮蔽による X 線の減衰が大きい領域の平均ヒット数を求めた。6 章の考察では、この平均ヒット数を基に議論を進めていく。

第6章 考察

この章では、考察を述べる。6.1節でバンプ接続の評価を誤る確率に対する独自の要求を決め、6.2節でノイズ測定の結果から新たな Source Scan の評価基準を提案する。6.3節では提案した評価基準で Source Scan を行う場合の試験時間や正確性について議論をする。

6.1 バンプ接続の評価を誤る確率に対する要求

1.4節で定義した偽接続と偽剥がれにより、バンプ接続の健全性の評価を誤ることがあり、これをバンプ接続の誤判定と定義する。ここでは、バンプ接続の誤判定が起こる確率に対する要求を決める。センサー製造時の要求から、一つのモジュールの全ピクセルのうち、不良なピクセルの割合が0.3%以下という基準が定められている。不良なピクセルのうち1%まではバンプ接続の誤判定が原因でも許すことにし、バンプ接続の誤判定確率 $< 3 \times 10^{-5}$ という要求を決めた。

6.2 新たな評価基準の提案

ここでは Source Scan の際、各ピクセルに対し何ヒット以上要求するかという評価基準を新たに提案する。そのために、ノイズ由来の偽のヒット情報が偽接続を引き起こす確率と、前節で決めたバンプ接続の誤判定確率 $< 3 \times 10^{-5}$ という要求を比較する。

まず、1回の Source Scan で1つのピクセルがノイズ由来の偽のヒットを検出する確率を計算する。ここでは、余裕を持ってトリガーレート 200 kHz、試験時間 180 秒という長めの Source Scan を行うと仮定する。その場合総トリガー数は、

$$200 \times 10^3 \text{ [Hz]} \times 180 \text{ [s]} = 3.6 \times 10^7. \quad (6.1)$$

これに式 4.3 の実測値から得られたノイズによるヒット確率 [1/pixel/trigger] を掛けると1回の Source Scan における1ピクセルに対するノイズによるヒット確率になり、その値は、

$$2.4 \times 10^{-13} \times 3.6 \times 10^7 = 8.6 \times 10^{-6}. \quad (6.2)$$

この確率とバンプ接続の誤判定確率の要求を比較すると、

$$8.6 \times 10^{-6} < 3 \times 10^{-5}. \quad (6.3)$$

要求よりノイズによる誤ヒットの確率が低いため、1 ヒットでも検出することができれば、バンプ接続は健全だと判定して良いと考える。よって、Source Scan の新たな評価基準としてトリガーレート 200 kHz 以下かつ、試験時間 180 秒以下の Source Scan において「各ピクセルに対し 1 ヒット以上」を提案する。

6.3 新たな評価基準における Source Scan の評価

バンプが接続されていても、ヒット数が評価基準を下回ると、偽剥がれによる誤判定となる。例えば、前節で提案した「各ピクセルに対し 1 ヒット以上」という評価基準を用いると仮定する。この時、あるピクセルが統計的揺らぎで 0 ヒットとなってしまった場合、そのピクセルのバンプ接続が正常であっても結果はバンプ不良と判定される。これはバンプ接続の誤判定であり、今回の場合統計的揺らぎで 0 ヒットとなってしまう確率がバンプ接続の誤判定確率に対応する。そこで、平均ヒット数をポアソン分布の期待値と仮定し、6.1 節で決めたバンプ接続の誤判定確率 $< 3 \times 10^{-5}$ を満たすように計算すると、平均ヒット数 λ に対する要求は、

$$\begin{aligned} P(X = 0) &< 3 \times 10^{-5}, \\ \frac{e^{-\lambda} \lambda^0}{0!} &< 3 \times 10^{-5}, \\ \lambda &> 10.41. \end{aligned} \quad (6.4)$$

これに対し、最も遮蔽率が大きい部品の下ではトリガーレート 200 kHz、60 秒の測定を行うと、ピクセルあたり、ヒット数の期待値は 21 ± 0.2 であった (5.2.5 項)。これは、十分に要求を満たす。

また、評価基準を 2 ヒット以上、3 ヒット以上、のように厳しくしていく時、平均ヒット数 λ に対する要求はポアソン分布から同様に計算できる。その時の評価基準で要求するヒット数と、平均ヒット数の期待値の関係を図 6.1 に示す。5 ヒットを要求した際のヒット数の期待値は 21.13 なので、この図から、トリガーレート 200 kHz 以上かつ、試験時間 60 秒以上の Source Scan において「各ピクセルに対して 5 ヒット以上」まで評価基準を上げても統計的揺らぎによるバンプ接続の誤判定は起こらないことがわかった。そのため、モジュールによるノイズの個性などを考慮し、評価基準を 4 ヒット以上まで引き上げることも可能だが、試験を行う施設や、環境にもよるため、今後議論する必要がある。また、この時計算に用いた平均ヒット数 21 はトリガーレート 200 kHz、60 秒での実験結果を利用しているため、測定時間を伸ばせば、評価基準で要求するヒット数の期待値の上限を上げることも可能である。

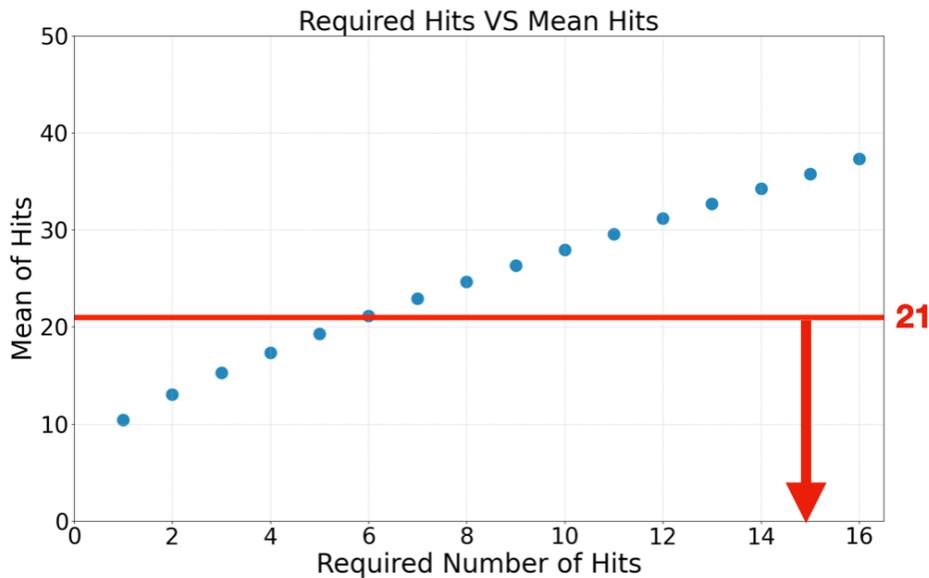


図 6.1: 評価基準で要求するヒット数を x 軸に、平均ヒット数の期待値を y 軸に表したグラフ。赤線はヒット数の期待値が 21 の時の直線。

6.4 Source Scan の試験時間

今回、表面実装部品の遮蔽度測定で行ったのは、トリガーレート 200 kHz、60 秒の Source Scan であり、この設定であれば、自身で決めた評価基準を十分に満たすことがわかっている。

現在、プロトタイプモジュールでは 1 チップのみに対して読み出しを行う場合トリガーレート 200 kHz で安定して Source Scan ができる。1 モジュールに対して、試験を行う場合、合計 4 つのチップを読み出す必要がある。その時は、X 線を照射し続け、チップごとに、1 分間の Source Scan を 4 回行う。よって、バンプ接続を正確に評価するための 1 モジュールに対する試験時間はおよそ 4 分である。今後、トリガーレート 200 kHz で安定して 4 チップの同時読み出しを達成することができれば、1 分の Source Scan を 1 回で、同時に 4 つのチップに対して正確なバンプ接続の評価ができるため、1 モジュールに対する試験時間は 1 分になる。

また、1 チップずつ読み出す場合でも、物質量が大きく、X 線遮蔽率が高い表面実装部品が上にあるチップに対して長時間試験を行い、ないチップに対しては短くするという工夫をすれば試験時間を短くできる。最終版の表面実装部品の配置と各チップの位置を図 6.2 に示した。例えば、チップ 1 と 4 に関しては、この領域にある最も X 線を遮蔽する部品はバイパスコンデンサである。バイパスコンデンサ下の評価領域における 60 秒の Source Scan での平均ヒット数が 156 ヒットである。測定時間を 1/6 の 10 秒にしたとしても、平均ヒット数はおよそ 26 ヒットとなる。要求は平均ヒット数が 10.41 以上であり、26 ヒットはこれを満たす。したがって、チップ 1、4 に対しては 10 秒ずつ、チップ 2、3 に対しては 1 分ずつの Source

Scan を行うことで試験時間を2分20秒にすることが可能である。

品質管理試験の試験時間のシュミレーションによると、1回のSource Scanは10分程度が想定されている。安定した4チップ同時読み出しが達成できない場合でも、1モジュールに対しておよそ4分で試験が可能なので、品質管理試験に影響を与えない。

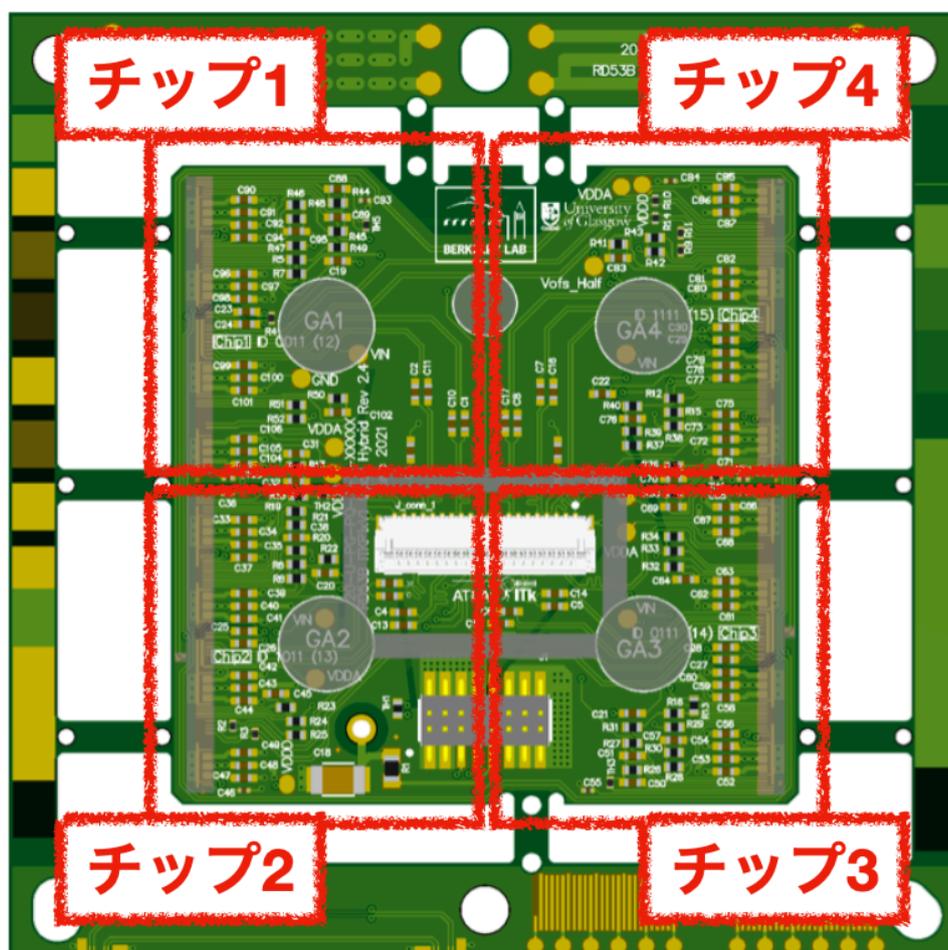


図 6.2: 最終版モジュールの表面実装部品の配置と各チップの位置。

第7章 結論

HL-LHC ATLAS ピクセル検出器量産時の品質管理試験の1つである Source Scan において、日本グループでは X 線を使って、バンプ健全性を評価することが検討されている。

これまでの Source Scan では以下の2つの課題があった。1つ目は、ノイズによる偽のヒット情報により、バンプは繋がっていないが、繋がっていると判定することである。(偽接続) 2つ目は、限られた試験時間の中で、表面実装部品によって X 線が遮蔽され、その部品の下のセンサーへのヒット数が減少し、評価基準を下回ること、バンプは繋がっているが、繋がっていないと判定をすることである。(偽剥がれ)

限られた試験時間の中で、バンプ健全性の評価をするため、Source Scan のトリガーレートを上げることを考え、実際のシステムで Source Scan のトリガーレートの上限を調べた。その結果1枚のチップのみに対する読み出しの場合 200 kHz で Source Scan が行えることがわかった。

次に、X 線を照射せず Source Scan を行い、ノイズによるヒット率を 8.6×10^{-6} と測定した。これは、本研究で独自に決めたバンプ接続の誤判定確率 $< 3 \times 10^{-5}$ という要求を満すので、新たな Source Scan の評価基準としてトリガーレート 200 kHz 以下かつ、試験時間 180 秒以下の Source Scan において「各ピクセルに対し 1 ヒット以上」を提案した。これにより偽接続の課題を解決した。

次に、実際に本番用モジュールに使用される部品をプロトタイプモジュールの上に設置し、トリガーレート 200 kHz、60 秒で Source Scan を行い、それぞれの部品の遮蔽率を求めた。電源コネクタが最も遮蔽による X 線の減衰が大きい部品であり減衰率は 98.8% であった。この部品の中で金属部で最も減衰が大きい部分の平均ヒット数を 21 ± 0.2 と測定した。一方、バンプ接続の誤判定の確率 $< 3 \times 10^{-5}$ を満たすように計算した要求される平均ヒット数 λ は、 $\lambda > 10.41$ であり、 21 ± 0.2 はこれを満たすので、偽剥がれの課題を解決した。よって、トリガーレート 200 kHz、60 秒の Source Scan でバンプ接続を十分に評価できることを示した。また、トリガーレート 200 kHz 以上かつ、試験時間 60 秒以上の Source Scan において評価基準を、「各ピクセルに対し 5 ヒット以上」にできることを示した。

このことから、トリガーレート 200 kHz、測定時間 60 秒の Source Scan において、評価基準「各ピクセルに対し、1 ヒット以上」を提案した。

新型ピクセル検出器量産時の品質管理試験の1つである Source Scan で1モジュールに対する試験時間約4分で、バンプ健全性を正確に評価できることを保証した。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、多くの方にお世話になりました。

山中卓教授には、学部4年生の時から研究と勉強に集中できる環境を作ってくださいました。また、素粒子物理学を通じて日々、どんなことでも疑問をもち、考えることの大切さを教えていただきました。さらに、自分が精神的に弱っている時すぐに声をかけてくださり、お忙しい中でたくさん相談に乗っていただきました。あの時の救いの手がなければ間違いなく今の自分はありません。頂いた貴重なお話を胸に刻んで、これから頑張っていきます。ありがとうございました。

南條創准教授には、Source ScanにおけるX線の扱いや解析について様々なご指導をいただきました。また、筋道を立てて、物事を考えることの重要性を実験を通じて教えていただきました。本論文執筆の際には、自分の自己管理が甘く、大変ご迷惑をおかけしました。それでも、お忙しい中時間を割き、ご指導くださったこと心から感謝しています。ありがとうございました。

廣瀬穰助教には、学部4年生の時から、3年間大変お世話になりました。ATLAS実験の基礎の部分から細部の情報まで、本当に多くの事を教えていただきました。心配性な自分は事あるごとに居室にお邪魔し、多くの質問を投げかけ、その度に丁寧に細かく説明してくださいました。これからは、人に訊くだけでなく、まず自分で深く考えて、質の高い議論をしていける様に努力していきます。ありがとうございました。

KEK 素核研の外川学准教授には、装置の扱いを教わったり、様々な情報を提供していただきました。初めてのKEK出張の際色々準備していただき、心強かったです。ありがとうございました。

KEK 素核研の中村浩二助教には、研究に関するアドバイスや、回路やトリガーについての考え方などを教えていただきました。ピッグテールを用意していただいたり、色々な質問に答えていただき大変助かりました。ありがとうございました。

東京工業大学の生出秀行助教には、冷却システムや周辺装置について色々教えていただきました。また、ミーティングなどでも重要なコメントを頂き大変参考になりました。ありがとうございました。

すでに卒業された大阪大学 ATLAS グループの先輩である、大西裕二さん、山家谷昌平さんには、ATLAS に関することはもちろんプログラミングや解析に関するアドバイスをしていただきました。

同じ大阪大学 ATLAS グループの先輩である Lakmin Wickremasinghe さんには、3年間本当にお世話になりました。いつ質問をしても、笑顔で理解するまで説明してください、その人間性と知識の深さ、そして探究心の強さを心から尊敬しています。これからは Lakmin さんのような先輩でいられる様、努力していきます。

同じ大阪大学 ATLAS グループの後輩である、荒久田周作くん、藤田侑葵子さんは突然研究内容が変わり、右も左もわからない自分が色々質問をしても嫌な顔一つせず教えてくれ、時には様々な議論を交わしました。KEK での実験では、二

人がいなければうまくいかなかった部分も多くあると思います。

同じ研究室の KOTO 実験グループに所属する、小寺克茂さん、白石諒太さん、Mario Gonzalez さん、加藤大志くん、花井幸太くん、小野啓太くん、北川歩くん、とは物理に関係する話はもちろん、色々な話題で盛り上がり、研究室で過ごす時間はとても楽しかったです。特に、白石さんには、学部生の頃から色々なことを教えていただき、夜遅くまで二人で残っていることが多く、たくさん参考になる話をしていただいたことは忘れません。

学部4年生の、村井凜久くん、久郷莉奈さんが日々勉学と研究に打ち込む姿には刺激を受けました。

秘書の、藤阪千衣さん、中野由佳さん、前田純子さんには様々な手続きの際大変お世話になりました。

そして、6年間にわたる大阪での大学生活を様々な面でサポートしてくれた家族に心から感謝しています。これから少しずつ恩返ししていける様頑張ります。

また、ここに書ききることができなかった自分の研究と大学生活に関わってくれたたくさんの方々、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Overall view of the LHC <https://cds.cern.ch/record/1708847>
- [2] The ATLAS Collaboration, [The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider], JINST 3 S08003 (2008).
- [3] The Inner Detector <https://atlas.cern/discover/detector/inner-detector>
- [4] <https://project-hl-lhc-industry.web.cern.ch/content/project-schedule>
- [5] Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Strip Detector. Technical Report CERN-LHCC-2017-005. ATLAS-TDR-025, CERN, Geneva, Apr 2017.
- [6] RD53A Module Testing Document <https://cds.cern.ch/record/2702738?>
- [7] Yet Another Rapid Readout <https://gitlab.cern.ch/YARRRD53ATesting/Diffuserguide.pdf> (internal document)
- [8] <https://www.amptek.com/products/mini-x2-x-ray-tube>
- [9] <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

付録A 平均ヒット数の閾値依存性

2.2節で述べた様に閾値はそれぞれのピクセル毎に調整できる。本研究では、DiffとLinは1500 e、Synは2500 eに設定した。そこでこの閾値とヒット数の関係を探るため、最終版モジュールで使用されるDiffを使用し、閾値を500 eから3000 eまで変えながらSource Scanを行った。図A.1に閾値1500 eの時のSource Scanの結果を示す。この図の赤枠で囲んだ領域の平均ヒット数と閾値との関係を図A.2に示す。

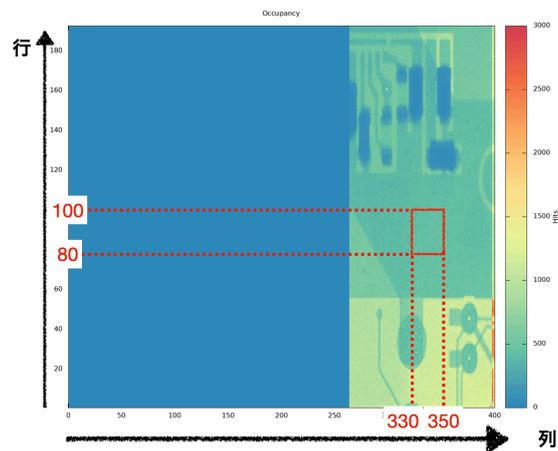


図 A.1: 閾値1500 eでの100 kHz、30秒のSource Scanの結果を表すz軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。赤枠で囲んだ領域を平均ヒット数の計算に利用する。

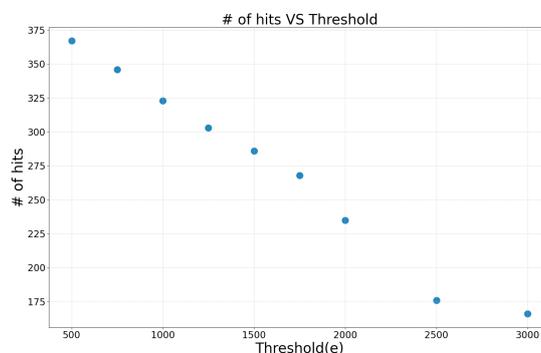


図 A.2: 閾値に対する図A.1の赤枠で囲んだ領域の平均ヒット数の関係。誤差はヒット数に比べ小さいため誤差棒は表記していない。

この結果から、閾値が大きくなるにつれ平均ヒット数が少なくなっていることがわかる。2.2節で計算した結果から、X線がシリコンセンサー内で光電効果を起こし、エネルギーを全て落とすと仮定すると、想定される電荷量はおよそ6000eであり、その場合、閾値を変えたとしても平均ヒット数にはほとんど変化がないはずである。しかし実際、閾値と平均ヒット数は関係を持っているので、センサーが常に予想通りの電荷量を受け取っていないことがわかる。その理由として以下のことが考えられる。

- X線がシリコンセンサー内で光電効果を起こした際、その電子の一部が隣のセンサーに入るため。
- X線がシリコンセンサーではなく、表面実装部品やPCB基板中の銅レイヤーで光電効果を起こし、発生した電子がセンサーに入射するため。
- 想定される電荷量を6000eと計算した際、X線のエネルギーは銀標的特性X線である、22 keVを仮定しているが、実際はエネルギーがより低い連続X線による光電効果も起きているため。
- 基板中の銅レイヤーからの蛍光X線^aがシリコンセンサー内で光電効果を起こすため。

また、図A.2で閾値2000e周辺で平均ヒット数の傾きが変わっているように見える。銅の蛍光X線のエネルギーは約8 keVであり、このX線がシリコンセンサー内で光電効果を起こし、エネルギーを全て落とすと仮定した場合、想定される電荷量はおよそ2000eであるためこの平均ヒット数の傾きの変化は、基板中の銅レイヤーによる蛍光X線の影響だと考える。

今後閾値を下げて測定を行う可能性があり、仮に現在設定している1500eから750eまで閾値を下げると平均ヒット数は750eで346、1500eで286であるため約1.2倍になると計算できる。これによる影響を評価基準の上限を用いて計算する。5.2.5項で求めた電源コネクタ下の平均ヒット数が21なので、閾値を750eまで下げた場合、平均ヒット数は約25になると予想される。図A.3から、平均ヒット数21では、評価基準は「各ピクセルに対して5ヒット以上」まで上げることができるのに対し、平均ヒット数25では「各ピクセルに対して8ヒット以上」まで上げることができる。

^a光電効果により原子核の周りの軌道電子が弾き出され、その空いた軌道に外殻の電子が遷移した際に出る特性X線。

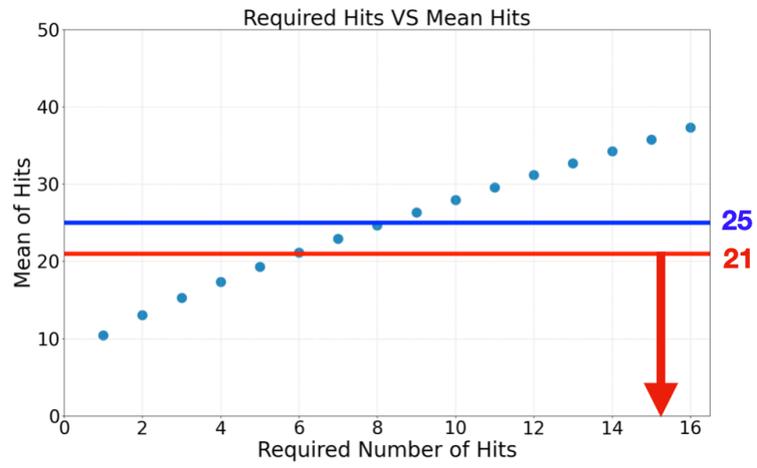


図 A.3: 評価基準で要求するヒット数を x 軸に、平均ヒット数の期待値を y 軸に表したグラフ。赤線はヒット数の期待値が 21 の時青線は 25 の時の直線。

付 録 B 温湿度センサーの X 線遮蔽 度合いの測定

本研究で調査した表面実装部品の外に、X 線を遮蔽する可能性がある部品として、モジュールを読み出す際の蓋に設置されている温湿度センサーがある。これは、モジュールが結露しない様に露点温度を監視するために使用され、アルミ蓋の両面に設置されている。図 B.1 に実際の温湿度センサーの設置状況を示す。使用されるセンサーの候補は二つあり、現在使用されている Sensirion 社の SHT85 と IST AG 社の HYT271 である。そこで、実際に HYT271 を読み出し領域内に入る様にアルミ蓋にポリイミドテープで固定し、Source Scan を行った。その様子を図 B.2 に示す。

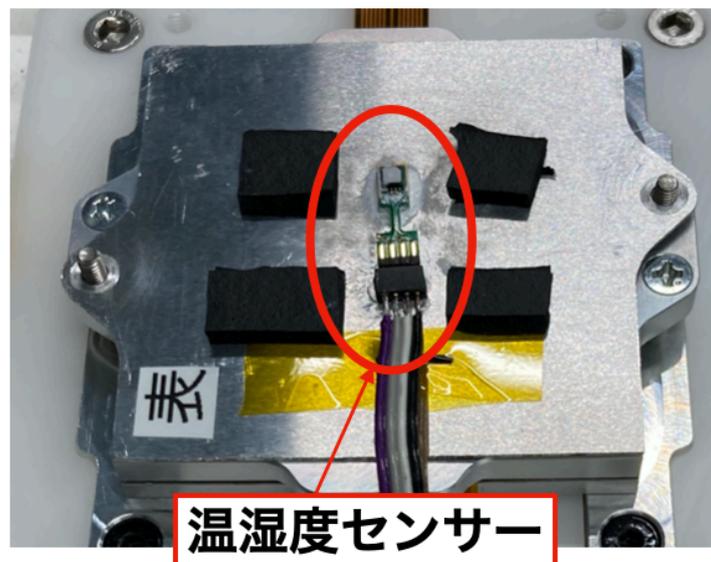


図 B.1: モジュール読み出しの際の蓋に設置されている温湿度センサー。この図で使用されているのは Sensirion 社の SHT85。

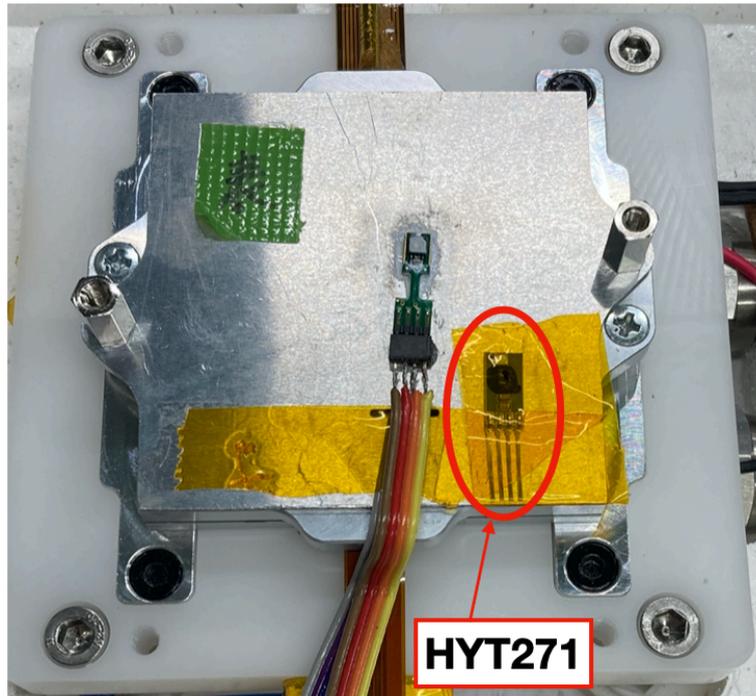


図 B.2: モジュール読み出しの際の蓋にポリイミドテープを使用し、HYT271 を固定している様子。

この時の Source Scan のヒートマップを図 B.3 に示す。温湿度センサの金属の足の部分により X 線が遮蔽され、ヒット数が減少していることがわかる。このヒートマップの赤枠で囲んだ領域を 1 行毎に切り取り、横軸を列、縦軸をヒット数としたグラフを図 B.4 に示す。この図の y 方向へのばらつきと傾きが少ない青枠で囲んだ評価領域の温湿度センサ有りと無しのヒット数の比をピクセル毎に求め、最後にそれらを平均したものを減衰率と定義し計算すると、減衰率は 95.20(2)%^aであった。これは電源コネクタや HV コンデンサより小さい減衰率だが、現在のセットアップだとこの温湿度センサの下にデータコネクタなどがあり、それらが重なっている部分がより X 線を遮蔽することが想定される。そのため、アルミ蓋に温湿度センサを設置する位置を金属の足がデータコネクタなどと重ならない様に変える必要がある。

^a() 内は誤差

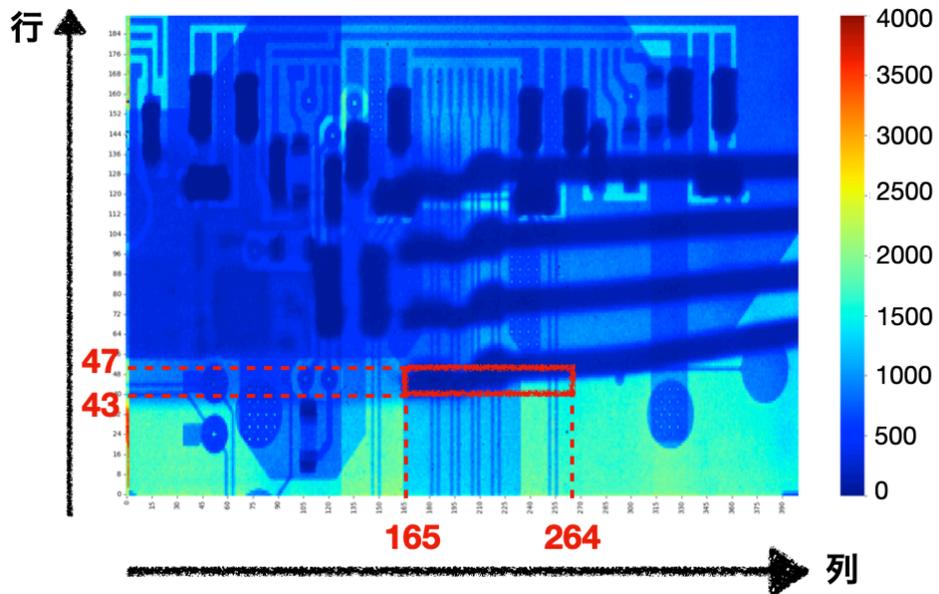


図 B.3: トリガーレート 200 kHz、60 秒の Source Scan の結果を表す z 軸をヒット数とした二次元ヒートマップ。HYT271 が Lin の読み出し領域だけでは読み出せなかったため、同じ条件で Diff と Syn の Source Scan も行い、そのデータを組み合わせた。



図 B.4: 図 B.3 の赤枠で囲まれた部分を 1 行毎に切り取ったグラフ。それぞれのグラフは凡例で示されている行のデータに対応する。この図の青枠で囲んだ評価領域を減衰率の計算に使用した。