

2019 年度 卒業論文

RHIC-sPHENIX 実験における
中間飛跡検出器 INTT 用高密度ケーブル
Bus-extender の品質評価と改善

奈良女子大学 理学部 数物科学科
物理学コース 高エネルギー物理学研究室

森田美羽

2020 年 3 月 31 日

概要

現在、奈良女子大学は、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) で稼働中の重イオン衝突型加速器 (Relativistic Heavy Ion Collider: RHIC) を用いた sPHENIX 実験で導入予定の検出器のひとつである中間飛跡検出器 INTermediate Tracker (INTT) の開発を行っている。INTT には、検出器からの大量のデータを離れた場所に設置された読み出し回路に伝送するための、1.2m を超える長尺かつ高密度データケーブル Bus-extender が必要である。また、INTT は狭い場所に設置されるため、データケーブルには柔軟性も要求される。これらの要求を満たすデータケーブルは市場に存在しないため、フレキシブル基板 (Flexible Printed Circuits: FPC) 技術を用いて Bus-extender の独自開発を進めている。基板材料 (サブストレート) には、信号損失の少ない液晶ポリマー (Liquid Crystal Polymer: LCP) を採用した。試作した Bus-extender の伝送性能を評価するため、試作した Bus-extender と INTT 用シリコンセンサーを接続しテストパルス信号を測定した場合と Bus-extender を接続せずに測定した場合の信号を比較した。

目次

| | | |
|-------|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 | 序論 | 7 |
| 1.1 | 素粒子物理学 | 7 |
| 1.1.1 | 素粒子の標準模型 | 7 |
| 1.1.2 | 相互作用 | 8 |
| 1.1.3 | クォーク・グルーオンプラズマ | 8 |
| 1.2 | 研究背景 | 8 |
| 1.2.1 | RHIC 加速器 | 8 |
| 1.2.2 | PHENIX 実験 | 9 |
| 1.2.3 | sPHENIX 実験 | 9 |
| 1.3 | 研究の目的 | 9 |
| 第 2 章 | 中間飛跡検出器 INTT | 11 |
| 2.1 | sPHENIX における飛跡検出器群 | 11 |
| 2.1.1 | MVTX(Monolithic Active Pixel Sensor) | 11 |
| 2.1.2 | INTT | 12 |
| 2.1.3 | TPC(Time Projection Chamber) | 12 |
| 2.2 | INTT 用シリコン検出器 | 12 |
| 2.2.1 | シリコンセンサー | 12 |
| 2.2.2 | FPHX チップ | 13 |
| 2.2.3 | HDI(High Density Interconnect) | 13 |
| 2.2.4 | Bus-extender | 14 |
| 第 3 章 | テストパルスによるデータ収集 | 15 |
| 3.1 | INTT 用テストベンチの構成 | 15 |
| 3.1.1 | ROC(Read Out Card) | 15 |
| 3.1.2 | FEM(Front End Module) | 16 |
| 3.1.3 | FEM-IB(FEM Interface Board) | 16 |
| 3.1.4 | NIM モジュール | 16 |
| 3.2 | INTT 用検出器の動作確認 | 17 |
| 3.2.1 | キャリブレーションテスト | 17 |
| 3.2.2 | キャリブレーションテストの結果 | 19 |

| | | |
|-------|---------------------------------|----|
| 3.3 | ノイズ評価 | 20 |
| 3.3.1 | フィッティング | 20 |
| 3.3.2 | ノイズ評価結果 | 20 |
| 3.3.3 | レートの計算 | 22 |
| 第4章 | Bus-extender を用いた測定 | 24 |
| 4.1 | Bus-extender を用いた測定と用いない測定の比較 | 24 |
| 4.1.1 | Bus-extender を用いた測定でのノイズ評価結果 | 24 |
| 4.1.2 | Bus-extender を用いた測定でのレートの計算 | 26 |
| 4.2 | オシロスコープを用いた測定での伝送効率の評価 | 27 |
| 4.2.1 | アイダイアグラム | 29 |
| 第5章 | ゲイン値設定の問題と解決およびキャリブレーションテストの問題点 | 32 |
| 5.1 | ゲイン値 | 32 |
| 5.1.1 | GSel | 32 |
| 5.1.2 | オフセット | 35 |
| 5.2 | 打ち込み数への評価 | 35 |
| 5.2.1 | bco | 36 |
| 5.2.2 | 応答回数 | 36 |
| 5.2.3 | 応答回数の問題点 | 36 |
| 第6章 | 結論 | 38 |
| | 謝辞 | 39 |
| | 参考文献 | 40 |

目次

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | 素粒子の標準模型 | 7 |
| 1.2 | クォーク・グルーオンプラズマ | 8 |
| 1.3 | RHIC 加速器 | 9 |
| 1.4 | sPHENIX 実験 | 10 |
| 2.1 | sPHENIX における飛跡検出器群 | 11 |
| 2.2 | INTT 飛跡検出器 | 12 |
| 2.3 | INTT 用シリコンセンサー | 13 |
| 2.4 | シリコンセンサーモジュール | 13 |
| 2.5 | Bus-extender | 14 |
| 2.6 | 狭い領域を這うように設置される Bus-extender | 14 |
| 3.1 | INTT 用シリコンセンサー性能評価のためのセットアップ | 15 |
| 3.2 | ROC | 16 |
| 3.3 | FEM(右) と FEM-IB(左) | 17 |
| 3.4 | NIM | 18 |
| 3.5 | キャリブレーションテストにおける信号の流れ | 18 |
| 3.6 | チップ1チャンネル1の Counts vs amplitude のヒストグラム (左) チップ1の channel vs amplitude のヒストグラム (中央) チップ1の全128チャンネルにおける ADC vs amplitude のヒストグラム (右) | 19 |
| 3.7 | 全26チップの channel vs amplitude のヒストグラム | 19 |
| 3.8 | 全26チップの全128チャンネルにおける ADC vs amplitude のヒストグラム | 20 |
| 3.9 | Fit 関数から σ の算出 | 21 |
| 3.10 | 全26チップ全128チャンネルの σ 分布 | 21 |
| 3.11 | チップ1チャンネル1の count vs amplitude のヒストグラム。レートを計算する始点を示す | 22 |
| 3.12 | チップ1の rate vs channel のグラフ (左) とチップ14の rate vs channel のグラフ (右) | 23 |
| 3.13 | 全26チップ全128チャンネルのレートの分布 | 23 |
| 4.1 | Bus-extender 用いた測定での応答回数安定なチップ (左) と不安定なチップ (右) の Counts vs amplitude のヒストグラムの比較 | 24 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.2 | Bus-extender 用いた測定 (右) と用いずに行った測定 (左) での amplitude vs chip のヒストグラム の比較 | 25 |
| 4.3 | Bus-extender 用いた測定での σ 分布 (左)、一つ目のピーク位置の σ 分布 (中央)、二つ目のピーク位 置の σ 分布 (右) | 25 |
| 4.4 | Bus-extender を用いて測定した結果のチップ 6~13、19~26(Type-A) での count vs rate のヒスト グラム | 26 |
| 4.5 | チップ 1 チャンネル 1 の count vs amplitude のヒストグラム。レートを計算する始点を再度示す . . | 27 |
| 4.6 | Bus-extender を用いて測定した結果のチップ 1~5,14~18(Type-B) でレート計算の開始点を 1 σ 離 れた位置から求めたレートの分布 | 27 |
| 4.7 | キャリブレーションテスト中でのオシロスコープの測定位置 | 28 |
| 4.8 | テストベンチ中のオシロスコープの写真 | 28 |
| 4.9 | オシロスコープを用いて観測した Bus-extender を実装しないテストベンチ環境での波形 (左) と Bus-extender 実装時のテストベンチ環境での波形 (右) | 30 |
| 4.10 | Bus-extender を用いない測定 of 波形から作成したアイダイアグラム、上から 25、26、27 のデー タ (左) と Bus-extender を用いた測定 of 波形から作成したアイダイアグラム、上から 46、47、48 のデー タ (右) | 30 |
| 4.11 | Bus-extender を用いない測定 of 波形から作成したアイダイアグラム、25、26、27 のデータの重ね合 わせ (左) と Bus-extender を用いた測定 of 波形から作成したアイダイアグラム、46、47、48 のデー タの重ね合わせ (右) | 31 |
| 5.1 | adc vs amplitude、上段左から右に順に GSel=0,1,2,3、下段左から右に順に GSel=4,5,6,7 | 33 |
| 5.2 | 左から順に上段 GSel=0, 1, 2、下段 GSel=3, 4, 5 の時の電圧値 [mV] vs amplitude のグラフ | 33 |
| 5.3 | Bus-extender を用いた測定での adc vs amplitude、上段左から右に順に GSel=0,1,2,3、下段左から 右に順に GSel=4,5,6,7 | 34 |
| 5.4 | Bus-extender を用いた測定での左から順に GSel=0,1,2,3 の時の電圧値 [mV] vs amplitude のグラフ | 34 |
| 5.5 | counts vs bco のヒストグラム | 36 |
| 5.6 | bco_1(左)bco_2(中央)bco_3(右) で分けて作成したそれぞれの amplitude vs chip のヒストグラム . . | 37 |

表目次

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | キャリブレーションモードにおける DAC 閾値設定 | 18 |
| 4.1 | 使用機器一覧 | 28 |
| 4.2 | オシロスコープを用いて観測した波形についての条件の表 | 29 |
| 5.1 | ゲイン値番号と対応する増幅値 | 32 |
| 5.2 | オフセットと相関係数 | 34 |
| 5.3 | Bus-extender を用いた測定でのオフセットと相関係数 | 34 |
| 5.4 | ゲイン値と閾値の設定を変えた測定でのデータの表 | 35 |
| 5.5 | bco_1 と bco_2 で同様のデータが来ていることを示す表 | 37 |

第1章

序論

1.1 素粒子物理学

1.1.1 素粒子の標準模型

素粒子物理学は、ガンマ線や μ 粒子のように高エネルギーの宇宙線や、陽電子や反陽子といった反粒子などの新しい粒子の発見に伴って 20 世紀前半に生まれた。物質の基本的な構成要素である素粒子は、現在の物理学ではそれ以上分解できない粒子とされている。素粒子には、物質を構成する粒子としてスピン $1/2$ のフェルミ粒子と、整数スピンをもつボーズ粒子が存在する。特にフェルミ粒子は、レプトンとクォークの 2 種類あり、レプトンは電子、ミューオン、タウの 3 種類とそれに対応するニュートリノを合わせた全 6 種。クォークは、トップとボトム、アップとダウン、チャームとストレンジの全 6 種類ある。それぞれ持ちうる電荷が異なり、それらの組み合わせにより様々なハドロンに分類される。また、グルーオンと呼ばれる媒介粒子がこれらの素粒子を強い力でつなぎとめている。これらの素粒子を図 1.1 に示す。



図 1.1 素粒子の標準模型

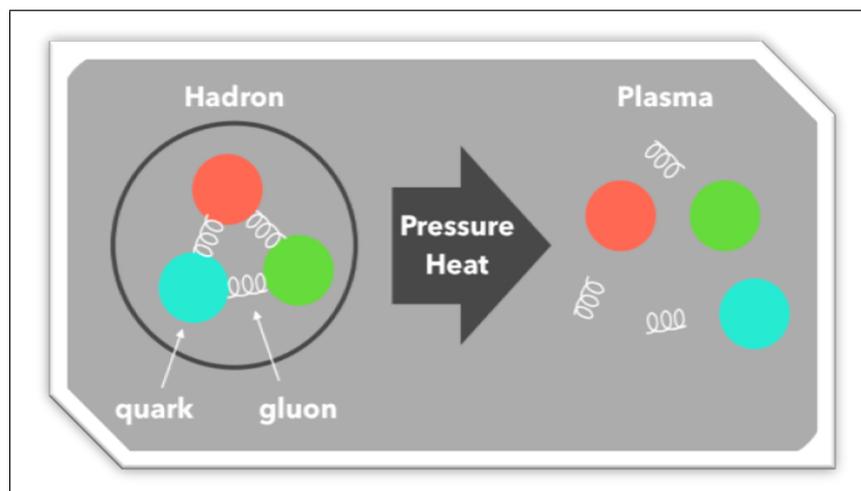


図 1.2 クォーク・グルーオンプラズマ

1.1.2 相互作用

標準模型において定義される粒子間での基本的な相互作用は大きく分けて3つある。

1つ目は強い相互作用である。中性子や陽子中にクォークを束縛し、さらに原子核の中に中性子や陽子を束縛する力である。2つ目は電磁相互作用である。これは、光子を媒介して行われる相互作用である。3つ目は弱い相互作用である。これは、標準模型のすべてのフェルミ粒子とヒッグス粒子に作用する。基本相互作用に含まれる重力による相互作用は、媒介粒子が未だ発見されておらず、未知の粒子グラビトンであるとされている。

1.1.3 クォーク・グルーオンプラズマ

クォーク・グルーオンプラズマ (Quark-Gluon Plasma: QGP) とは、高温・高密度状態において、図 1.2 のように核子やハドロンが重なり合い核子内に閉じ込められているクォークとグルーオンの結合が切れ、ばらばらになったプラズマ状態のことを指す。QGP はビッグバンから数 10μ 秒後の初期宇宙で実現していたと考えられている。

1.2 研究背景

1.2.1 RHIC 加速器

ブルックヘブン国立研究所 (Brookhaven National Laboratory: BNL) では、重イオン衝突型加速器 RHIC を用いて素粒子物理学を研究している。RHIC は、QGP を生成しその性質を明らかにすることを目的に建設された世界で初めての重イオン衝突型加速器であり、2000 年から実際に稼働した。主に金原子核同士の衝突による観測を行っており、他にヘリウム原子核・金原子核衝突や陽子・陽子衝突、陽子・金原子核衝突なども行っている。特に金原子核同士の衝突実験では、核子1個あたりの重心系衝突エネルギーが最大で 200GeV 、陽子同士の衝突では 510GeV まで実現可能である。RHIC 加速器の全景写真を図 1.3 で示す。写真にみられるように RHIC には2つの環状のビームラインが建設されており、時計回りのブルーリングと反時計回りのイエローリングと呼ばれる周長 3.8km の加速リングである。 106ns (9.4MHz) の間隔でビームが交差しており両方向に走るビームが衝突する。ビームはバンチ構造を持っ



図 1.3 RHIC 加速器

ており、各リングに 120 のバンチが蓄積されている。また、衝突点は合計 6 か所設けられ、そのうち 2 か所において PHENIX(the Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment) と STAR(Solenoidal Tracker at RHIC) の 2 つの実験が稼働していたが、2016 年に PHENIX 実験は終了した。

1.2.2 PHENIX 実験

PHENIX 実験は RHIC で行われていた高エネルギー重イオン衝突実験の 1 つで、2000 年から 2016 年までの 16 年間、世界 15 か国 70 以上の研究機関から約 500 名の研究者が参加していた国際共同実験である。[5] PHENIX 実験では、QGP の生成とその性質の研究のほか、陽子スピンの構成要素の解明を目的とした研究が行われていた。BNL では、RHIC を用いて原子核を高速近くまで加速し衝突させることで、超高温・高密度下の状態を実現し、QGP の再現と検証を行った。PHENIX 実験は、観測の結果から高エネルギーでの原子核衝突において QGP が生成されることを確立し、QGP の性質を初めて測定した。

1.2.3 sPHENIX 実験

sPHENIX(the super Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment) は BNL にある RHIC を用いて行われる 2023 年稼働予定の新たな実験であり、PHENIX 実験を高度化した次期実験にあたる。[6] この実験には世界各国の研究者が参加し、従来の PHENIX 検出器では測定することができなかったハドロンジェットやウプシロンの測定が計画されており、これらによって QGP のエネルギー密度を解明し輸送係数の温度依存性とデバイ遮蔽長を決定することを目指している。sPHENIX 測定器を以下の図 1.4 に示す。sPHENIX 検出器における飛跡検出器は MVTX、INTT、TPC の 3 つで構成される。詳細は第 2 章の 2.1 で記述する。

1.3 研究の目的

本研究では、昨年度構築されたテストベンチ環境を用いて、INTT と Bus-extender を接続し Bus-extender 接続時と接続しない場合の測定を比較することで、データ伝送効率の評価を行うことを目的としている。第 2 章では INTT 用シリコン検出器について、第 3 章ではテストベンチ環境についてと Bus-extender を用いない場合の測定と測定結

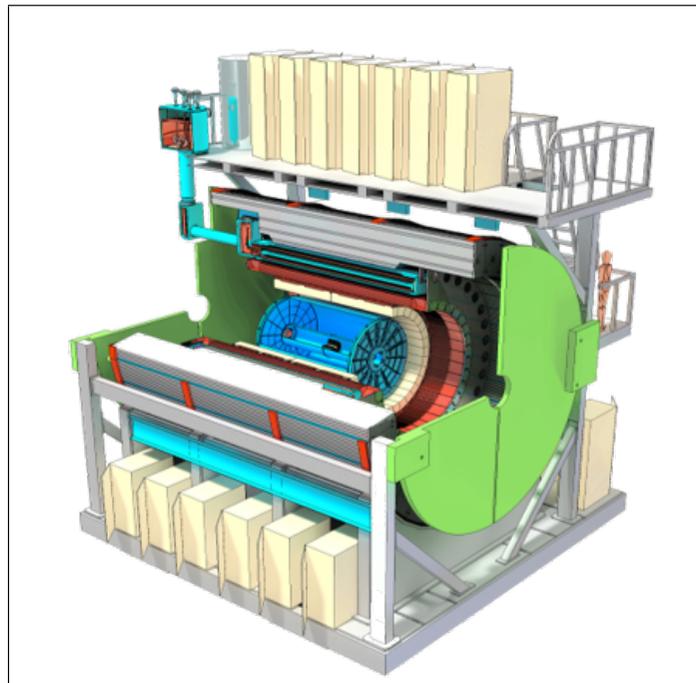


図 1.4 sPHENIX 実験

果について、第 4 章では Bus-extender を用いた測定での結果とその評価について、第 5 章では INTT 用テストベンチ環境で新たに分かったことについて詳しく述べ、第 6 章で本論文の結論を述べる。

第 2 章

中間飛跡検出器 INTT

2.1 sPHENIX における飛跡検出器群

sPHENIX 実験において導入される飛跡検出器は全 3 つ存在する。図 2.1 に示すのはそれら飛跡検出器群の全体図である。

2.1.1 MVTX(Monolithic Active Pixel Sensor)

MVTX は、3 つの飛跡検出器のうち最も内側に位置し、MAPS(Monolithic Active Pixel Sensors) を用いた 30 μ m のピッチの半導体ピクセルからなる三層構造の半導体検出器である。高精度の飛跡検出が可能であり、衝突点と生成された粒子の最近接距離測定から重クォーク、特に b クォークの識別を行う。

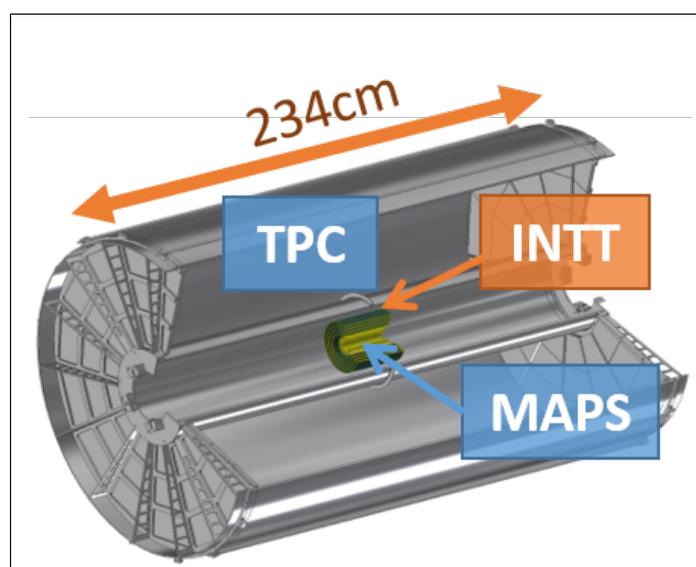


図 2.1 sPHENIX における飛跡検出器群

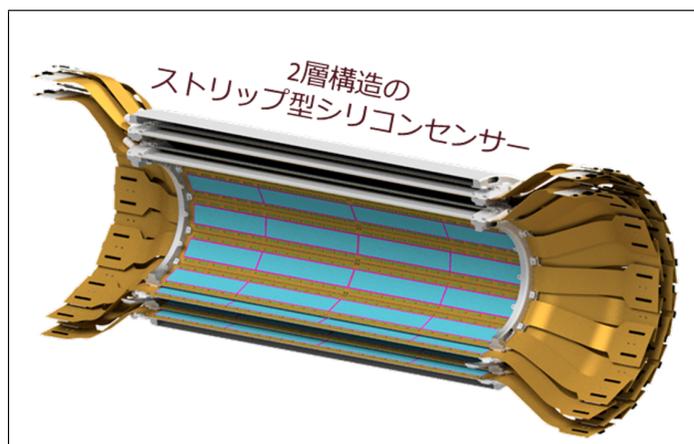


図 2.2 INTT 飛跡検出器

2.1.2 INTT

INTT はビームパイプから 6~12cm に位置し、ストリップ型シリコンセンサーを樽状の 2 層構造に配置した検出器である。MVTX から TPC を通過する過程での粒子の飛跡をつなぎ、運動量分解能を上げるとともにより詳細な時間情報を与えることを目的とする。

2.1.3 TPC(Time Projection Chamber)

TPC は、3つの検出器のうち最も外側に位置し、衝突中心から $\pm 1\text{m}$ ずつを覆うガス検出器である。

2.2 INTT 用シリコン検出器

INTT は時間分解能が高く、MVTX, TPC のトラックに対して 1 ビームバンチの時間でデータを処理できる。INTT によって再構成された飛跡と、他の 2 つの検出器とのマッチングを図ることで粒子多重度の高いイベントにおいてもより正確な飛跡を求めることができる。INTT 検出器を設置した場合の全体像を図 2.2 に示す。INTT 用シリコン検出器はシリコンセンサー、読み出し用チップ FPHX、HDI で構成されている。シリコンセンサーと FPHX チップは HDI 上に設置されている。図 2.3 は INTT 用シリコン検出器一台に設置されている HDI、シリコンセンサー、FPHX チップの様子である。

2.2.1 シリコンセンサー

INTT 用検出器ではストリップ型シリコンセンサーを採用しており、FPHX チップが図 2.4 のように構成され、1 モジュールあたりこのチップが全 26 個、2 列で存在する。L0、L1 にはセンサーの位置による粒子のヒット数の違いから、ストリップ長の異なる $16\text{mm} \times 9.984\text{mm}$ (Type-A) と $20\text{mm} \times 9.984\text{mm}$ (Type-B) の 2 種類のセンサーがあり、シリコンモジュール 1 つあたり、Type-A が 8×2 個 Type-B が 5×2 個備わっている。Type-A (8×2) で一つのセンサーチップ、Type-B (5×2) で一つのセンサーチップであり、これらをそれぞれ分割し FPHX チップにつないで読み出している。樽上の 2 層構造のうち、ビームライン近くに位置するモジュール L0 から順に (L1 と続

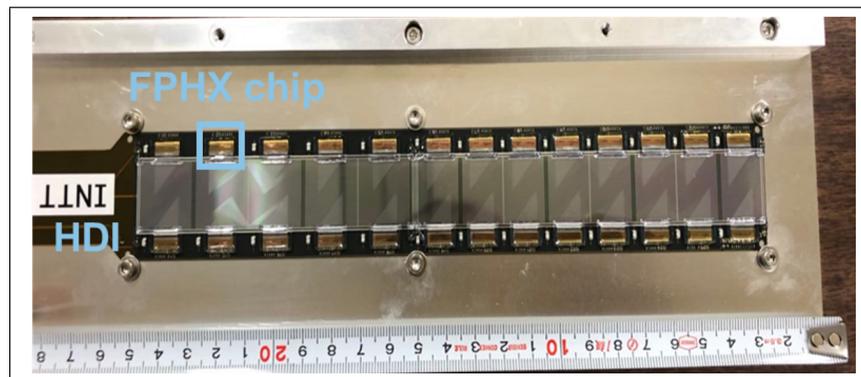


図 2.3 INTT 用シリコンセンサー

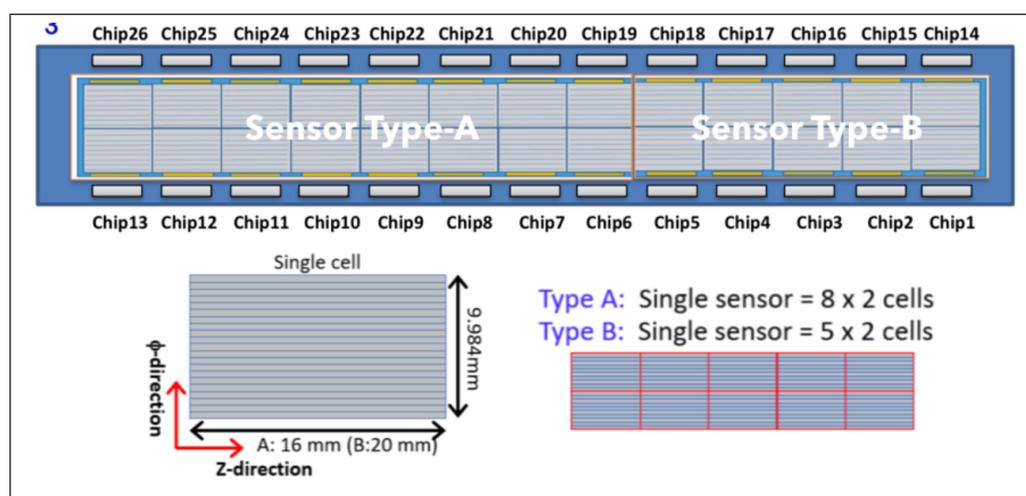


図 2.4 シリコンセンサーモジュール

く形で)ナンバリングされており、実際に実験で導入される場合にはビームラインを中心に複数のセンサーモジュールが取り囲むようにして配置される。

2.2.2 FPHX チップ

FPHX チップとは INTT シリコンセンサー用の読み出しチップのことであり、PHENIX 実験で採用された実績がある。1 チップあたり 128 の読み出しチャンネルを持ち、各チャンネルにおいて波形整形を行った後、3bit の ADC を出力する。ADC の各閾値は 8bit の DAC で設定でき、この時の電圧変換は $V[\text{mV}] = 210 + 4 \times \text{DAC}$ とする。

2.2.3 HDI(High Density Interconnect)

HDI は FPHX チップへの入出力配線と、シリコンセンサーと FPHX チップへ電源供給を担う基板である。ROC とは Bus-extender を介して接続され、高速でのデータ送受信を行う。



図 2.5 Bus-extender

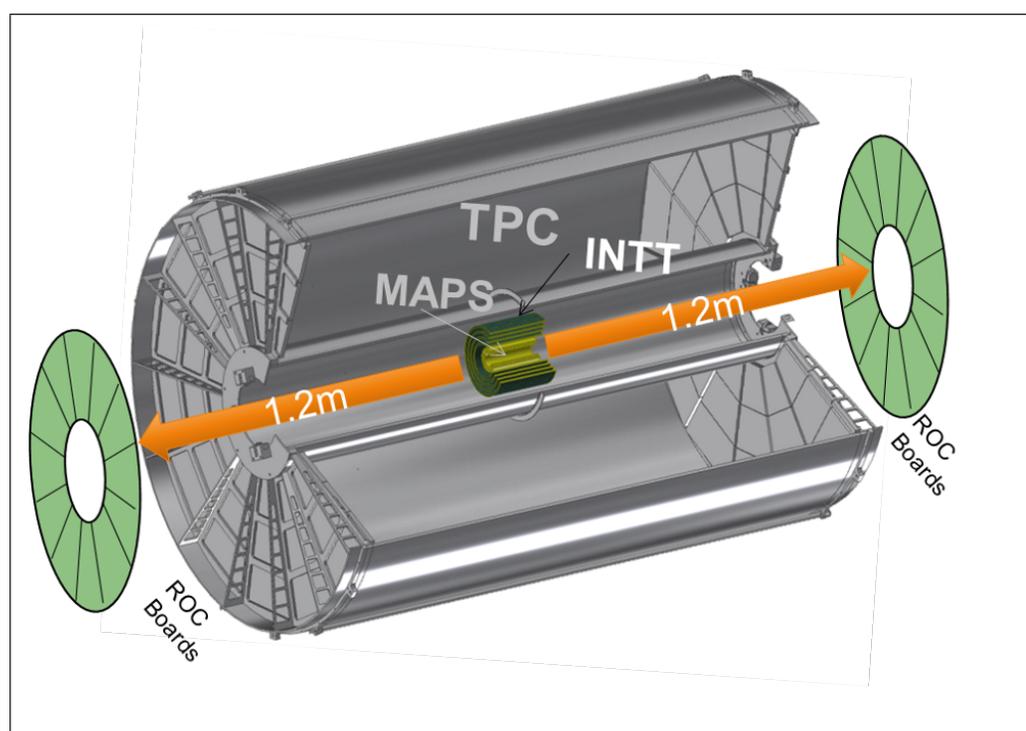


図 2.6 狭い領域を這うように設置される Bus-extender

2.2.4 Bus-extender

Bus-extender とは、シリコン検出器と読み出し回路 (Read Out Card: ROC) を接続するためのデータ伝送ケーブル (図 2.5) のことであり、その全長は 1.2m である。これまでにない長尺 FPC(Flexible Printed Circuits) によって、場所を取らずに狭い領域を這うように入れることができる柔らかい配線、5cm の幅に 140 μ m の配線を 62 ペア均一に設置するという高密度ながら全長 1.2m の長さを実現した。図 2.6 は実際の実験での Bus-extender の接続の様子を示している。

第3章

テストパルスによるデータ収集

3.1 INTT 用テストベンチの構成

データ収集におけるセットアップを図 3.1 に示す。図 3.1 の右下に位置する INTT 用シリコンセンサーが、Bus-extender を介して ROC に接続されている。奥に位置するのが FEM と FEM-IB であり、右に PC を設置し FEM と接続している。

3.1.1 ROC(Read Out Card)

ROC では、各 26 個の FPHX チップから送られてきた 20bit のデータを整理し、32bit に拡張したデータを後段へ送る役割があり、またテストパルスを発生させ FPHX チップへと送信する機能を持っている。FPHX チップから LVDS 信号が 2 つデータとして出力される。複数の FPHX チップから送られてくるデータを集約し光ファイバーを通じて後段の FEM へと送信する。

ROC 1 枚あたり 4 つの FPGA(field-programmable gate array) が搭載されており、各 FPGA ではセンサー 4 台

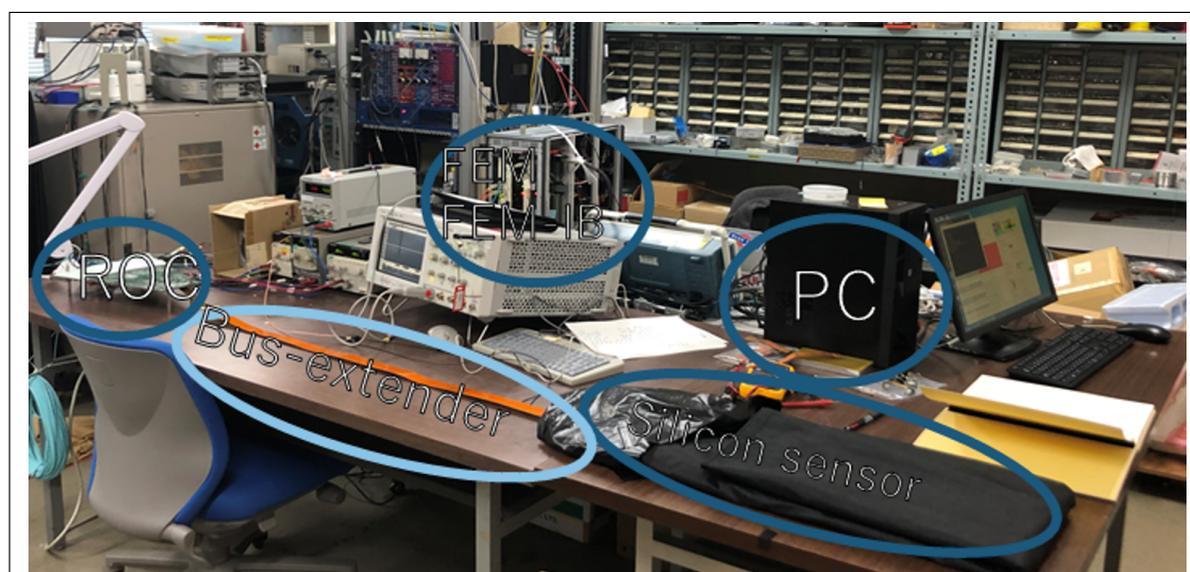


図 3.1 INTT 用シリコンセンサー性能評価のためのセットアップ

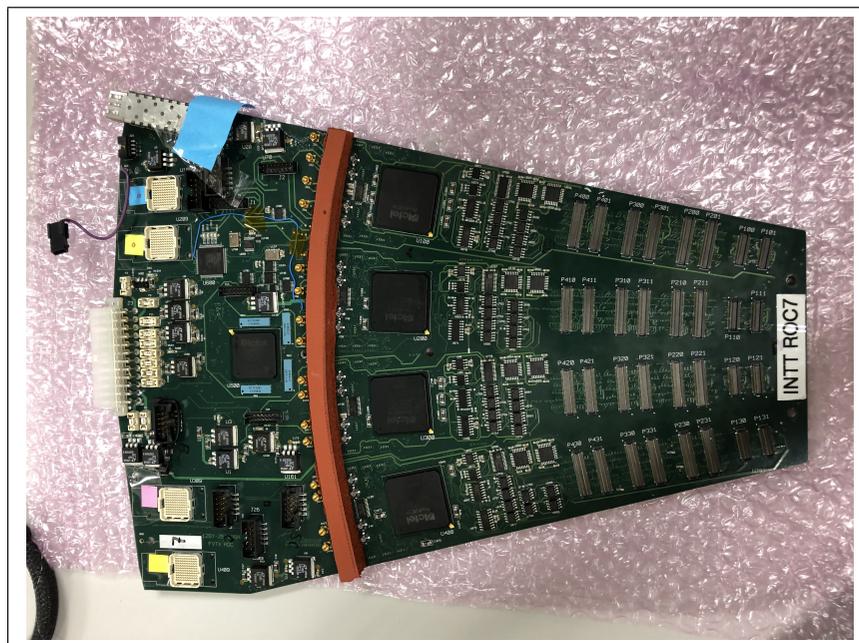


図 3.2 ROC

分のデータを処理する。つまり、図 3.2 のように全 16 の接続用ポートがある。ポートはその列ごとにナンバリングされていて、右から順に 0、1、2、3 と並ぶ。FPGA は上から順に A、B、C、D とナンバリングされている。FPGA ごとで接続できる検出器が異なり、INTT 用シリコンセンサーは上から A(1 段目) と C(3 段目) につながる接続ポートの内、1～3 のポートのいずれかに接続する。

3.1.2 FEM(Front End Module)

FEM は VME 規格の読み出しボードで、ROC から受信したデータをビームクロックに従って並び替え、PHENIX 共通のフォーマットに変換する。データは、PC ないし後段のデータ処理モジュールに送られる。FEM 1 枚で ROC の出力の半分を担っているため、ROC 1 枚の全出力を確認するためには FEM が 2 枚必要であるが、ROC への命令信号は FEM 1 枚で賄うことができる。また、FEM 基板には FPGA が搭載されており、トリガーシステムの構築が可能である。

3.1.3 FEM-IB(FEM Interface Board)

FEM 全体を制御するモジュールであり、主に検出器全体を統括するクロック信号、トリガー信号、FEM やセンサーモジュールに転送する制御信号を受け取り、FEM に供給する。

3.1.4 NIM モジュール

テストベンチで使用する NIM モジュールのうち、本研究の目的であるテストパルスを用いた測定では、INTT 用シリコン検出器のバイアス電圧供給用の高電圧電源、DUAL HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY (POSITIVE) を使用する。また、図 3.4 は使用した NIM モジュールの実際の写真である。

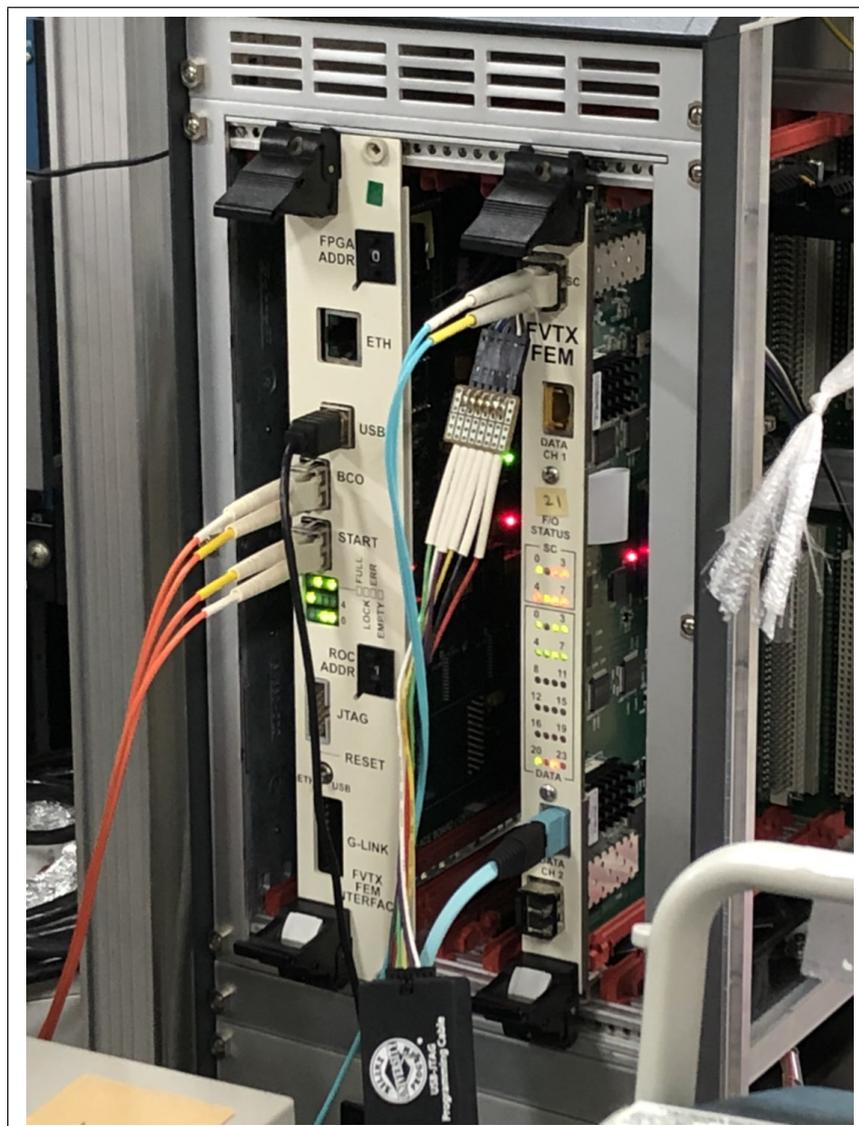


図 3.3 FEM(右) と FEM-IB(左)

3.2 INTT 用検出器の動作確認

3.2.1 キャリブレーションテスト

テストパルスを発生させて FPHX チップの反応を観測し、テストベンチ全体の動作確認を行う。このテストのことをキャリブレーションテストと呼ぶ。このテストの結果からノイズやデータ伝送効率を評価する。セットアップは図 3.5 のとおりである。6 4 段階の波高 (amplitude) のテストパルスを INTT 用検出器の各 FPHX チップ、各チャンネルへそれぞれ 10 回ずつ入力する。テストパルスは ROC で生成され、Bus-extender を通り FPHX チップに送られる。テストパルスは FPHX チップでデジタル信号に変換され、Bus-extender を通り ROC へ集積され、FEM、FEM-IB を通過し PC で保存される。キャリブレーションテストで収集する信号の DAC 閾値設定について表 3.1 示す。



図 3.4 NIM

| DAC | DAC 設定値 | 対応電圧 [mV] |
|------|---------|-----------|
| DAC0 | 20 | 290 |
| DAC1 | 25 | 310 |
| DAC2 | 30 | 330 |
| DAC3 | 35 | 350 |
| DAC4 | 40 | 370 |
| DAC5 | 45 | 390 |
| DAC6 | 50 | 410 |
| DAC7 | 55 | 430 |

表 3.1 キャリブレーションモードにおける DAC 閾値設定



図 3.5 キャリブレーションテストにおける信号の流れ

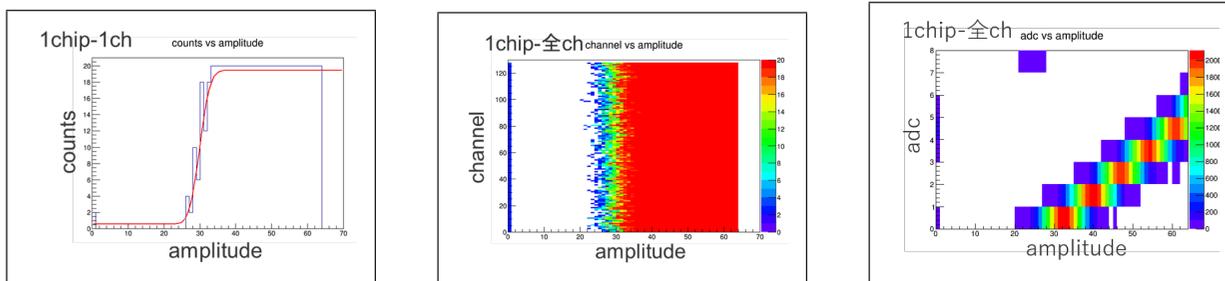


図 3.6 チップ1 チャンネル1 の Counts vs amplitude のヒストグラム (左) チップ1 の channel vs amplitude のヒストグラム (中央) チップ1 の全128チャンネルにおける ADC vs amplitude のヒストグラム (右)

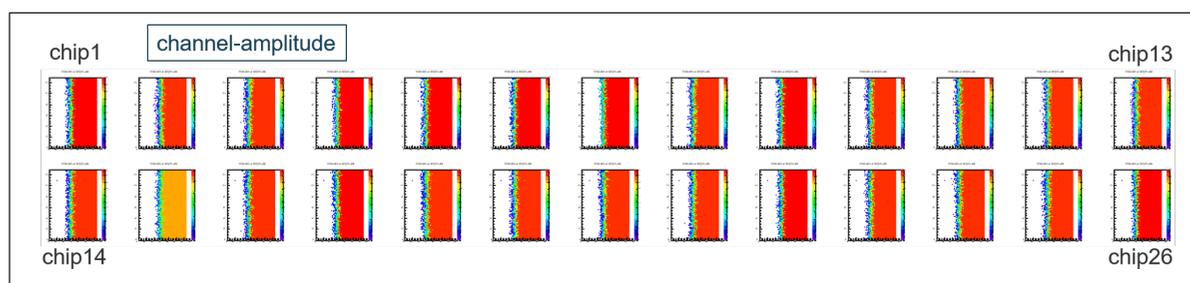


図 3.7 全26チップの channel vs amplitude のヒストグラム

また、キャリブレーションテストを用いてゲイン値の設定値について確認したことについては第5章の5.1で、テストを行った結果からわかった応答回数の問題については同章の5.2で詳しく述べる。

3.2.2 キャリブレーションテストの結果

キャリブレーションテストを行った結果について示す。

図3.6(左)は、1チャンネル分の横軸 amplitude のヒストグラムである。この図は、テストパルスを入力信号の波高 (amplitude と呼ぶ) がある値を超えると徐々にヒット数が増え始め、さらに波高が大きくなるとヒット数は一定になることを示している。このヒット数が増え始める場所は、amplitude が DAC0 閾値付近である。3.2.1 で送信しているテストパルスは10回であると記述したが、ヒット数が一定になるのは20回であることが図3.6(左)からわかる。この問題については、第5章の5.2で詳しく述べる。

図3.6(中央)は、128チャンネル分の amplitude とヒットチャンネル位置の二次元ヒストグラムであり、色がヒット数を示している。この結果から、1チップの全128チャンネルで図3.6(左)と同様の反応が見られることがわかる。

図3.6(右)は、128チャンネル分の横軸 amplitude と縦軸出力 adc の二次元ヒストグラムであり、色がヒット数を示している。この結果から、入力 amplitude と出力 adc には正の相関関係があることがわかる。この相関関係から FPHX チップに設定しているオフセットを求めたが、それについては第5章の5.1.2で詳しく述べる。

図3.6(中央)と図3.6(右)について、全26チップで確認した結果を以下図3.7と図3.8にそれぞれ示す。

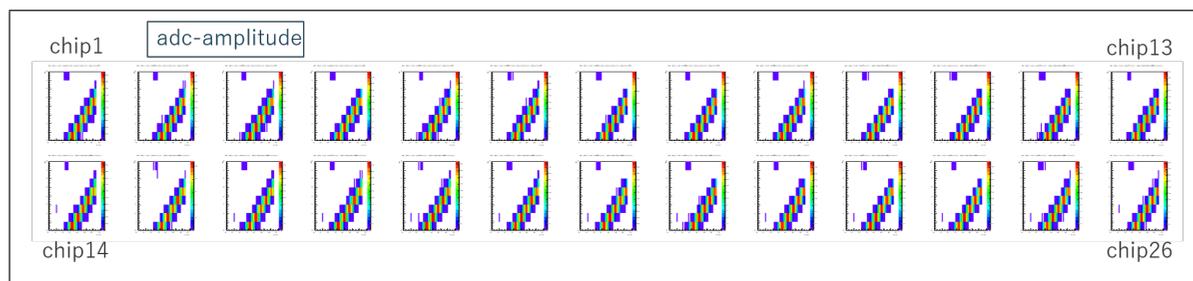


図 3.8 全 26 チップの全 128 チャンネルにおける ADC vs amplitude のヒストグラム

3.3 ノイズ評価

テストパルスの応答を用いてノイズ評価を行う。図 3.6(左) のヒストグラムについてより詳しく確認していく。閾値付近で応答がすると先ほど述べたが、もしノイズがなければ、amplitude が DAC0 の閾値を超えたとき突然 10 回の応答が入る。しかし、キャリブレーションテストの結果からは、10 回を下回る応答回数が確認されグラフは緩やかな立ち上がりを示した。この緩やかさの幅はノイズによるため立ち上がりの傾きからノイズの影響を見積もった。

3.3.1 フィッティング

閾値付近の応答からグラフの緩やかさの幅 σ を見積もるために、Fit 関数 (式 (3.1)) を用いてフィッティングを行う。Fit 関数から σ の値を算出する。

$$\text{Fit 関数: } f(x) = \text{erf}((x - a)/b) + 10 \quad (3.1)$$

$$\sigma = b \quad (3.2)$$

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3.3)$$

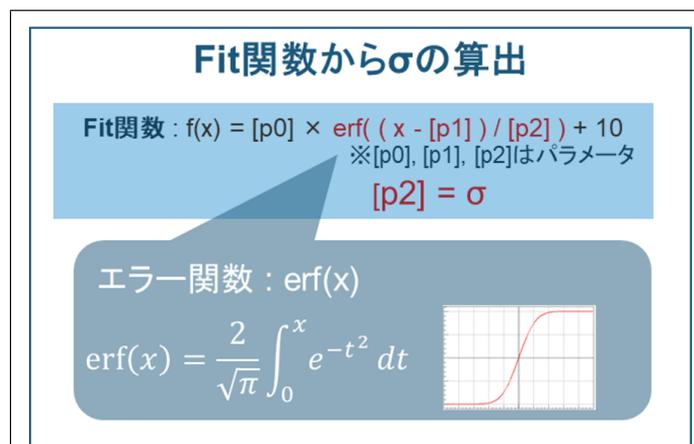
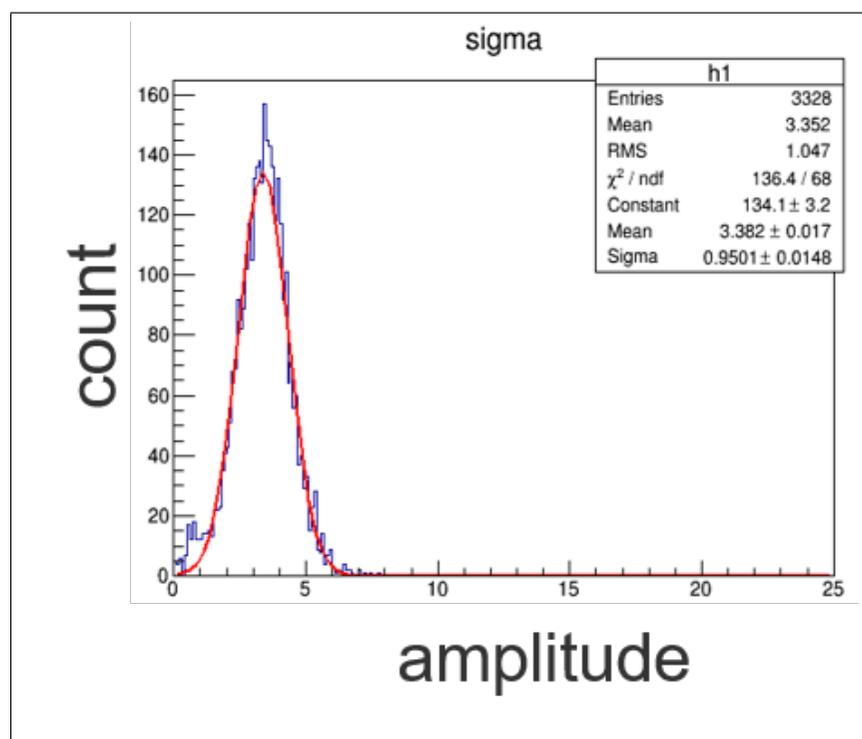
式 (3.1) 中の erf は式 (3.3) のエラー関数である。また、a は x 方向のゼロ点からの差異、b は誤差関数の σ を表すパラメータである。図 3.9 に σ の算出方法をまとめる。

3.3.2 ノイズ評価結果

全 26 チップ全 128 チャンネルをそれぞれフィットし各 σ を算出した。それらの σ のヒストグラムが図 3.10 である。この図をガウス関数でフィッティングして σ の平均値を算出した。

$$\text{ガウス関数: } f(x) = a \times \exp\left(-\frac{(x - b)^2}{2c^2}\right) \quad (3.4)$$

その結果、 σ の平均値は 3.382 ± 0.017 [amplitude] であった。電圧値に換算するために、先行研究より算出された amplitude と電圧値 [mV] との変換係数 $2.81 \left[\frac{\text{mV}}{\text{ampl}}\right]$ を用いて計算すると

図 3.9 Fit 関数から σ の算出図 3.10 全 2 6 チップ全 1 2 8 チャンネルの σ 分布

$$2.81 \left[\frac{\text{mV}}{\text{ampl}} \right] \times 3.38 [\text{ampl}] = 9.50 [\text{mV}] \quad (3.5)$$

に相当することがわかる。DAC0 の閾値 290mV からオフセットの 200mV(小数点以下切り捨て) を引いて比較すると

$$\frac{9.50 [\text{mV}]}{90 [\text{mV}]} = 0.106 \quad (3.6)$$

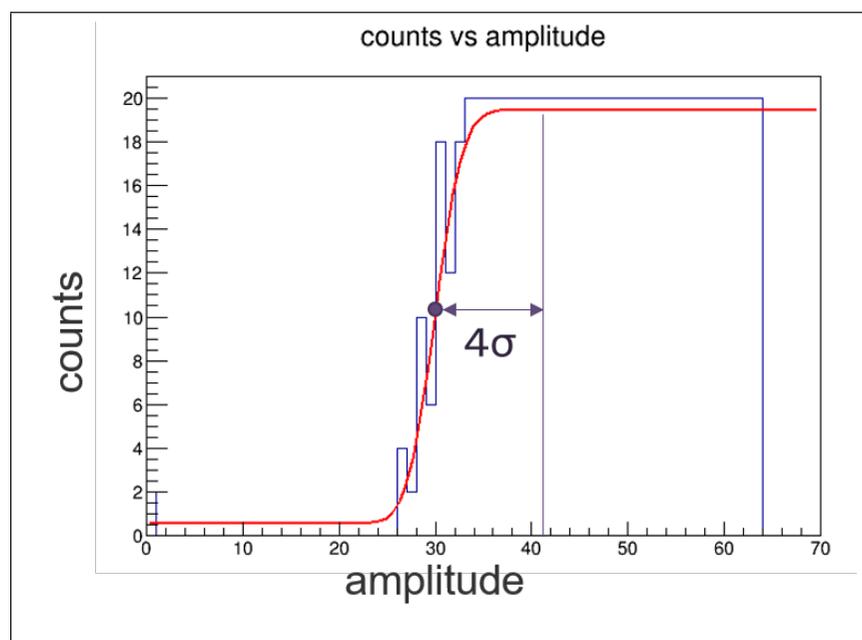


図 3.11 チップ 1 チャンネル 1 の count vs amplitude のヒストグラム。レートを計算する始点を示す

よって、 σ は DAD0 の閾値設定の約 $1/10$ であることがわかった。計算でオフセットの推定については、第 5 章の 5.1 で詳しく述べる。

3.3.3 レートの計算

FPHX チップからのデータ伝送効率を見積もるためにレートを計算する。レートとは、閾値より十分高い波高のテストパルスの応答回数と ROC で送信したデータ数の比のことである。図 3.11 より、応答回数が安定する値を基準として、Fit 関数とその半分の応答を確認した位置から 4σ 離れた amplitude を始点とする。図 3.11 からは、安定する値が 20 回、その半数は 10 回であることがわかる。始点から最大値 amplitude=63 までの範囲で応答回数が 20 回確認できた割合をレートと呼び、全 26 チップ全 128 チャンネルの各レートを求めた。問題点として、安定する応答回数が 10 回であるチップが数個存在したが、その場合は 5 回の応答が確認できた位置から 4σ 離れた amplitude を始点とし、同様の範囲で 10 回確認できた割合を計算している。図 3.12(左) はチップ 1 の各チャンネルのレート、3.12(右) はチップ 14 の各チャンネルのレートを求めたグラフを示している。

$$\Delta A = \frac{\sqrt{\sum_n (A_i - \langle A \rangle)^2}}{N} \quad (3.7)$$

$$\text{レートの算出式: } rate(\%) = \left(1 - \frac{\Delta A}{\langle A \rangle}\right) * 100 \quad (3.8)$$

A_i は実際の応答回数、 $\langle A \rangle$ は応答回数の期待値 (20)、 ΔA は応答回数からのずれ、 N は各チップ各チャンネルの始点から amplitude=63 までの差である。

全 26 チップ全 128 チャンネルのレートをプロットしたものが図 3.13 である。このグラフより、レートの平均値は 99.56% であり全 26 チップ全 128 チャンネルでレートは 93% 以上であったことがわかる。また、全 3328 チャンネル中で約 54.5% の 1814 チャンネルが 100% のレートを得られていた。

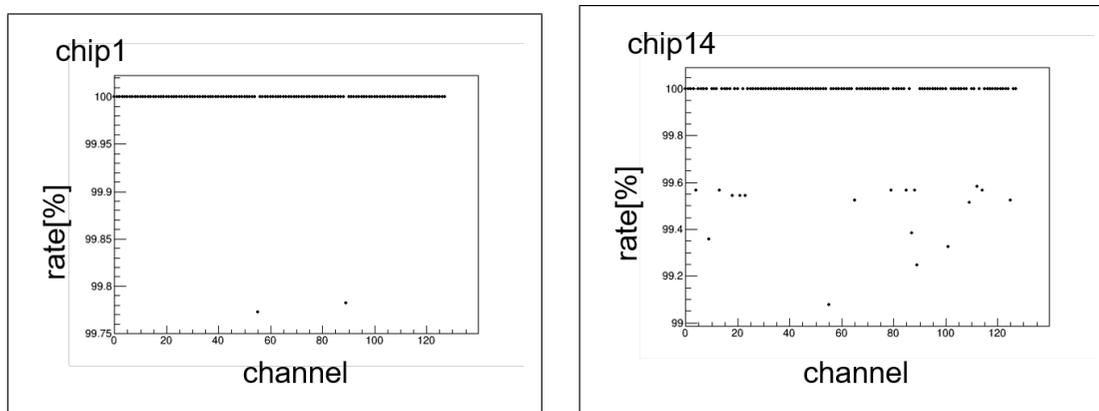


図 3.12 チップ 1 の rate vs channel のグラフ (左) とチップ 14 の rate vs channel のグラフ (右)

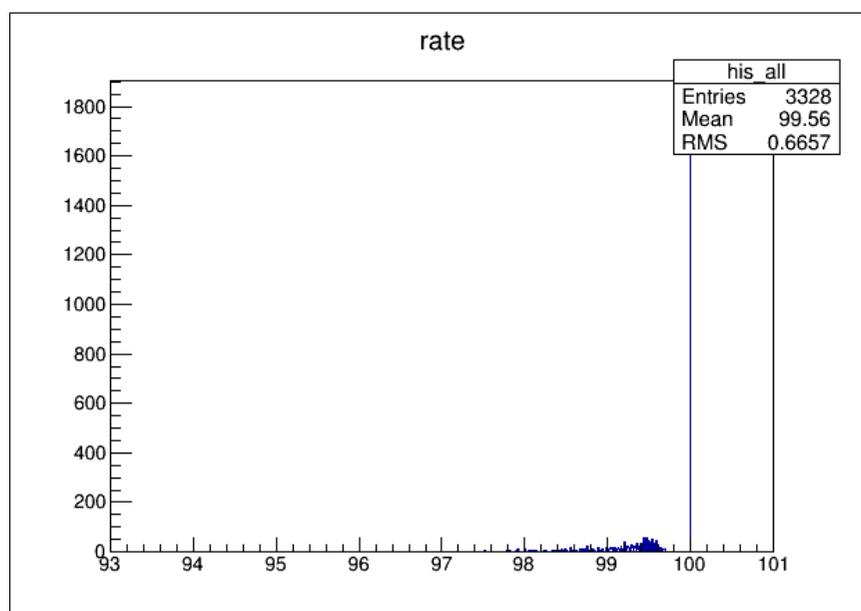


図 3.13 全 26 チップ全 128 チャンネルのレートの分布

第 4 章

Bus-extender を用いた測定

次に、Bus-extender を用いてキャリブレーションテストを行いノイズやレート进行评估する。

4.1 Bus-extender を用いた測定と用いない測定の比較

Bus-extender を用いた測定のノイズ評価をするにあたって、Bus-extender を用いずに行った測定の結果と比較することで、Bus-extender の性能を確認する。また、オシロスコープで観測した LVDS 波形についても議論する。

4.1.1 Bus-extender を用いた測定でのノイズ評価結果

Bus-extender を用いずに行ったキャリブレーションテストと同様の方法でノイズ評価を行う（ノイズ評価の方法については第 3 章の 3.3 参照）。Bus-extender を用いた測定の結果では、図 4.1(左) のように Bus-extender を用いずに行った測定と同様の結果が得られる箇所と、図 4.1(右) のように波高が大きくなってもヒットが一定にならない箇所が見つかった。

Bus-extender を用いずに行った測定と用いた測定の結果を、縦軸 amplitude(波高) 横軸チップの二次元ヒストグラムを用いて図 4.2 で比較する。図 4.2 は色でヒットを表す二次元ヒストグラムである。図 4.2(左) が Bus-extender を用いずに行った測定、図 4.2(右) が Bus-extender を用いて行った測定である。図 4.2(右) のように Bus-extender

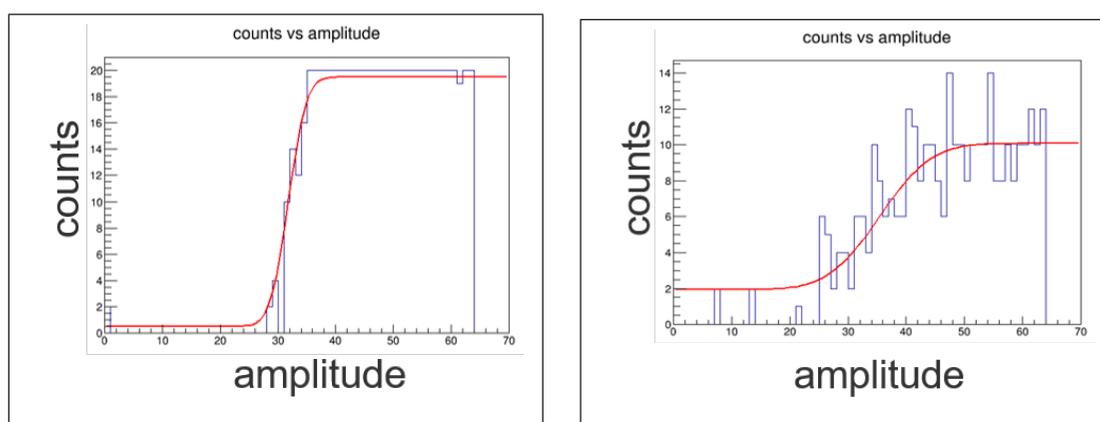


図 4.1 Bus-extender 用いた測定での応答回数が安定なチップ (左) と不安定なチップ (右) の Counts vs amplitude のヒストグラムの比較

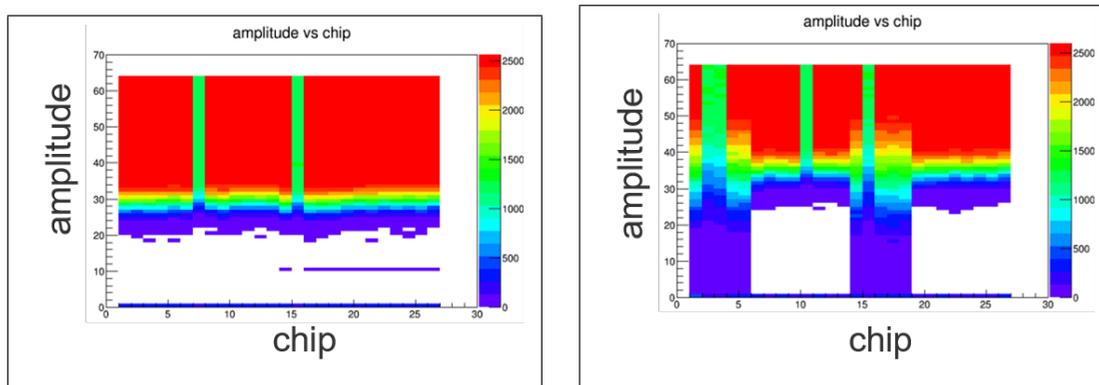


図 4.2 Bus-extender 用いた測定 (右) と用いずに行った測定 (左) での amplitude vs chip のヒストグラムの比較

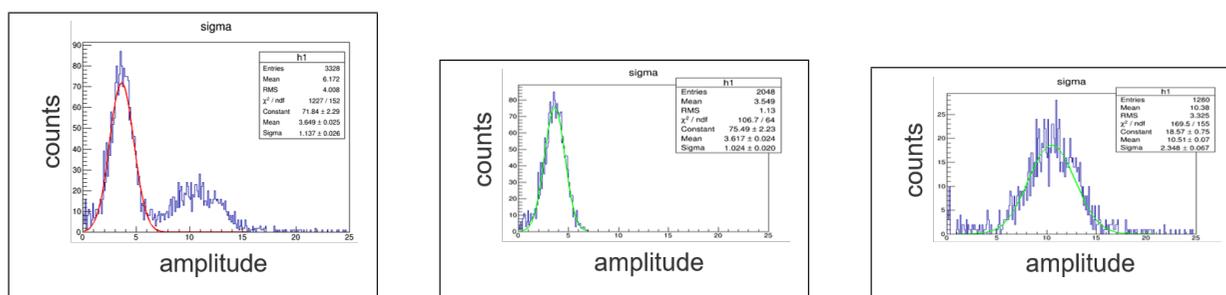


図 4.3 Bus-extender 用いた測定での σ 分布 (左)、一つ目のピーク位置の σ 分布 (中央)、二つ目のピーク位置の σ 分布 (右)

を用いた測定ではヒットの増加の傾向が2種類あるように見える。これらがチップによって図 4.1 のような違いを示していると推測できる。図 4.2(左) と図 4.2(右) のどちらの図からも、ヒットが安定する位置でのヒットが赤色を示すチップと緑色を示すチップが存在することがわかり、赤色を示すチップに比べて約半数のヒットしか得られていないことを表している。これらは各ケーブルのどこかで起こっている接続不良が原因であると推測できるため、今回 Bus-extender を用いた測定と用いずに行った測定を比較する場合の議論点ではないと考える。図 4.2(右) のチップ 6 ~ 13、19 ~ 26 (Type-A) では図 4.2(左) と同様にある値から徐々にヒットが増加しているように見えるが、チップ 1 ~ 5、14 ~ 18 (Type-B) では amplitude=0 からヒットが確認できる。この図から Type-B のチップでは閾値の設定がうまく動作していないと推測できる。

Bus-extender を用いて測定した結果の σ 分布を図 4.3(左) に示す。図 4.3(左) の σ 分布を確認すると、Bus-extender を用いた測定ではピーク位置が2つあることがわかる。これらは Type-A のチップと Type-B のチップでヒットの開始位置やヒットの増加の仕方が異なることから、 σ 分布に2種類のピークができたと推測できる。Type-A(図 4.3(中央)) と Type-B(図 4.3(右)) のチップで別の σ 分布を作成した。図 4.3(中央) のピーク位置は 3.61 ± 0.02 amplitude であり、図 4.3(右) のピーク位置は 10.51 ± 0.07 amplitude である。図 4.3(中央) のピーク位置は図 4.3(右) のピーク位置と比較して、Bus-extender 用いずに行った測定での結果とより近い結果であると言える。

それぞれのタイプ別でノイズの影響を見積もる。計算方法は第3の3.3で詳しく述べている。求めた σ の値から計算すると Type-A のチップのノイズの影響は約 $1/10$ であるが、Type-B のノイズの影響は約 $1/3$ であった。

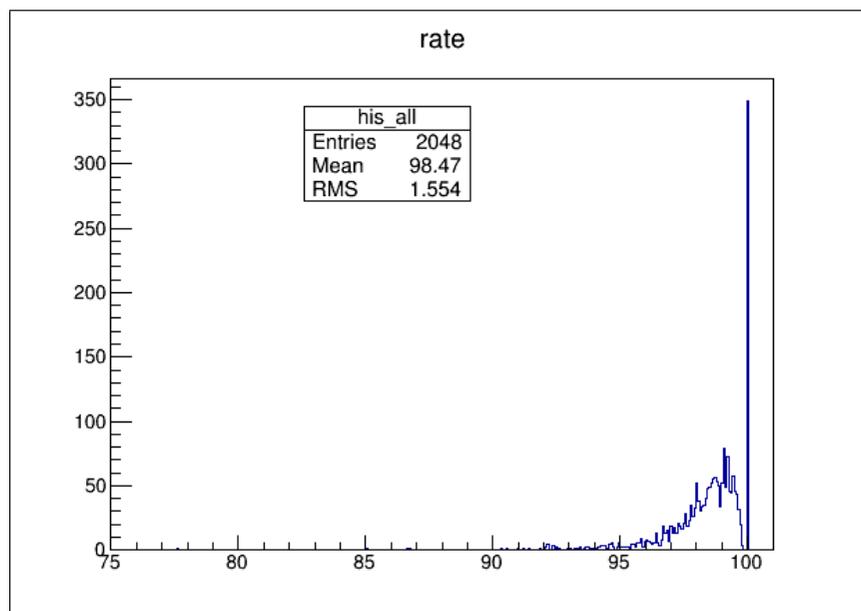


図 4.4 Bus-extender を用いて測定した結果のチップ 6~13、19~26(Type-A) での count vs rate のヒストグラム

4.1.2 Bus-extender を用いた測定でのレートの計算

Bus-extender を用いたキャリブレーションテストでレートを求める。Bus-extender を用いずに行った測定では、レートを求める計算で開始点の決定に 4σ を採用していた。Bus-extender を用いた測定での Type-B の σ の平均は 10.51 ± 0.07 amplitude であったため、 4σ を採用すると amplitude=63 を超えてしまう箇所が存在してしまい、全 3328 チャンネル中で約 33.6% である 1117 チャンネルでレートを求めることができなかった。そのため、チップの Type-A と Type-B のレートを別々に確認する。

図 4.4 は Type-A のチップのレートである。Bus-extender を用いずに行った測定と同様に、開始点の決定には 4σ を採用している。レートの平均値は図 4.4 より 98.5% であり、Type-A のチップのすべてのチャンネルでレートが 75% 以上であることがわかった。Type-B のチップでは 4σ を採用したことで 1117 個のチャンネルでレートを求めることができなかった。ここで、Type-B のチップの σ の値が大きいことを考慮するため、開始点を変更して再度レートを計算した。もともとは期待値 (20) の半数 (10) の応答が確認できた amplitude から 4σ 離れた amplitude を開始点としていたが、Type-B のチップでは σ の値が Type-A のチップの σ の値に比べて約 4 倍近くあることを考慮して、図 4.5 のように 1σ 離れた amplitude を開始点として再度レートを求める。

図 4.6 は Type-B のチップのレートを求めた結果である。レートは平均 93.4% であり、ほとんどのチャンネルが 70% 以上であることがわかる。Bus-extender を用いずに行った結果では全体の 54.5% で 100% のレートを得られていたが、Bus-extender を用いた測定で 100% のレートを得られたのは 350 チャンネルであり、全体の 10.5% であり Bus-extender を用いずに行った測定の約 2 割であった。

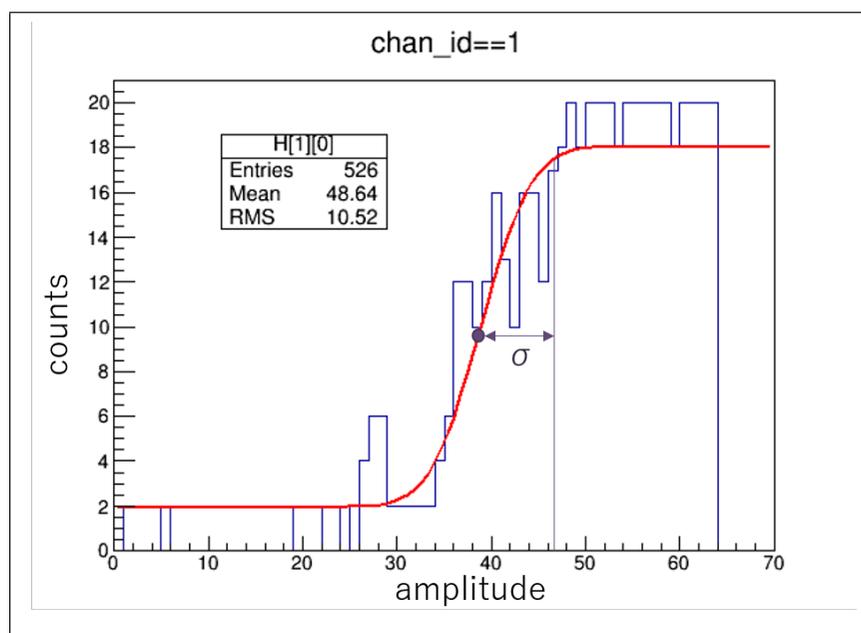


図 4.5 チップ1チャンネル1の count vs amplitude のヒストグラム。レートを計算する始点を再度示す

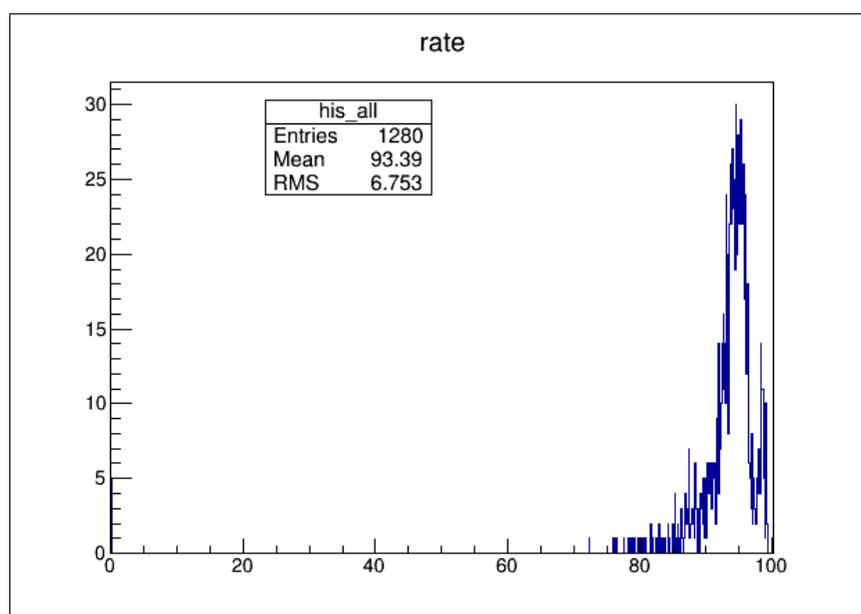


図 4.6 Bus-extender を用いて測定した結果のチップ 1~5,14~18(Type-B) でレート計算の開始点を 1σ 離れた位置から求めたレートの分布

4.2 オシロスコープを用いた測定での伝送効率の評価

HDI の出力信号を評価するため、INTT テストベンチ環境でテストパルスを流しその波高をオシロスコープを用いて測定した。オシロスコープを含めたセットアップは図 4.7 に実際の写真は図 4.8 に示す。ROC 基板上にある 100Ω 終端抵抗の両端を差動プローブで測定した。用いた機器は以下の表 4.1 のとおりである。測定した条件は表 4.2 に示す。

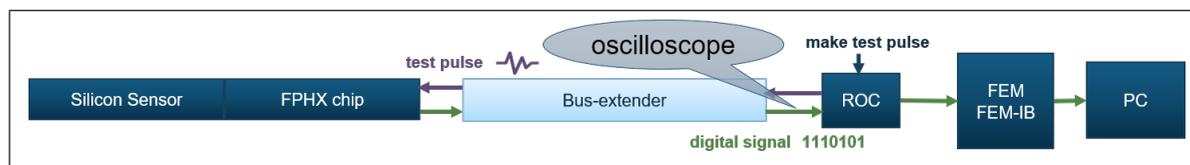


図 4.7 キャリブレーションテスト中でのオシロスコープの測定位置



図 4.8 テストベンチ中のオシロスコープの写真

| 名称 | 型式/製品名 | 製造者 |
|------------|-------------------|-----------------------|
| オシロスコープ | DSO80304B | Keysight Technologies |
| 差動プローブアンプ | 1131B | Keysight Technologies |
| 差動ブラウザーキット | E2675 | Keysight Technologies |
| 波形解析ソフトウェア | TekScope Anywhere | Tektronix |

表 4.1 使用機器一覧

| file # (**.bin) | FPGA | | HDI | | DATA BUS | ROC (Probe) | |
|--------------------|------------------|------------------------|--------|--------|------------------------|----------------|------|
| | I _{set} | Mag _{-theory} | Sensor | Chip # | | | |
| 04 05 06 | 1 mA | 0.2 V _{pp} | INTT | ?? | Conv. Bd | R963 | |
| 25 26 27 | 2 mA | 0.4 V _{pp} | | | | | |
| 28 29 30 | 3 mA | 0.6 V _{pp} | | | | | |
| 31 32 33 | 4 mA | 0.8 V _{pp} | | | | | |
| 34 35 36 | 5 mA | 1.0 V _{pp} | | | | | |
| 37 38 39 | 6 mA | 1.2 V _{pp} | | | | | |
| 40 41 42 | 7 mA | 1.4 V _{pp} | | | | | |
| 43 44 45 | 8 mA | 1.6 V _{pp} | | | | | |
| 46 47 48 | 2 mA | 0.4 V _{pp} | INTT | #01 | Conv. Bd + 英尺FPC | R972 | |
| 49 50 51 | 1 mA | 0.2 V _{pp} | | | | | |
| 52 53 54 | 3 mA | 0.6 V _{pp} | | | | | |
| 55 56 57 | 4 mA | 0.8 V _{pp} | | | | | |
| 58 59 60 | 5 mA | 1.0 V _{pp} | | | | | |
| 61 62 63 | 6 mA | 1.2 V _{pp} | | | | | |
| 64 65 66 | 7 mA | 1.4 V _{pp} | | | | | |
| 67 68 69 | 8 mA | 1.6 V _{pp} | | | | | |
| 70 71 72 | 2 mA | 0.4 V _{pp} | FVTX | #01 | 英尺FPC | R972 | |
| 73 74 75 | 1 mA | 0.2 V _{pp} | | | | | |
| 76 77 78 | 3 mA | 0.6 V _{pp} | | | | | |
| 79 80 81 | 4 mA | 0.8 V _{pp} | | | | | |
| 82 83 84 | 5 mA | 1.0 V _{pp} | | | | | |
| 85 86 87 | 6 mA | 1.2 V _{pp} | | | | | |
| 88 89 90 | 7 mA | 1.4 V _{pp} | | | | | |
| 91 92 93 | 8 mA | 1.6 V _{pp} | | | | | |
| 94 95 96 | 2 mA | 0.4 V _{pp} | INTT | #13 | Conv. Bd | R969 | |
| 97 98 99 | | | | | | #07 | R815 |
| 100 101 102 | | | | | | #14 | R973 |
| 103 104 105 | | | | | | #20 | R956 |
| 106 107 108 | | | | | | #26 | R930 |
| 109 110 111 | | | | | | FVTX | #07 |
| 112 113 114 | 2 mA | 0.4 V _{pp} | FVTX | #13 | 英尺FPC | R969 | |
| 115 116 117 | | | | | | #14 | R973 |
| 118 119 120 | | | | | | #20 | R956 |
| 121 122 123 | | | | | | #26 | R930 |

表 4.2 オシロスコープを用いて観測した波形についての条件の表

オシロスコープで測定した波形の座標データをプロットすることでグラフを作成した。この表 4.2 のうちこの研究で示すグラフは、INTT テストベンチで Bus-extender を用いずにキャリブレーションテストを同条件で 3 回測定した 25,26,27 のデータと、Bus-extender を用いてキャリブレーションテストを同条件で 3 回測定した 46,47,48 のデータである。オシロスコープを用いて観測した Bus-extender を実装しないテストベンチ環境での波形を図 4.9(左) に、Bus-extender 実装時のテストベンチ環境での波形を図 4.9(右) に示す。

4.2.1 アイダイアグラム

オシロスコープで測定したデジタル波形を重ね合わせアイダイアグラムを作成した。アイダイアグラムはグラフから幅や時間、波高のばらつき具合を測ることができる。また、中央にできる空白の面積からデータ伝送率を確認す

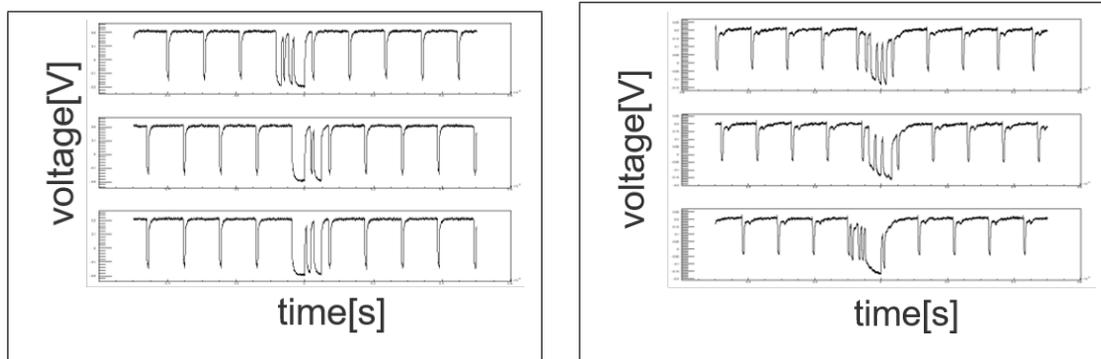


図 4.9 オシロスコープを用いて観測した Bus-extender を実装しないテストベンチ環境での波形 (左) と Bus-extender 実装時のテストベンチ環境での波形 (右)

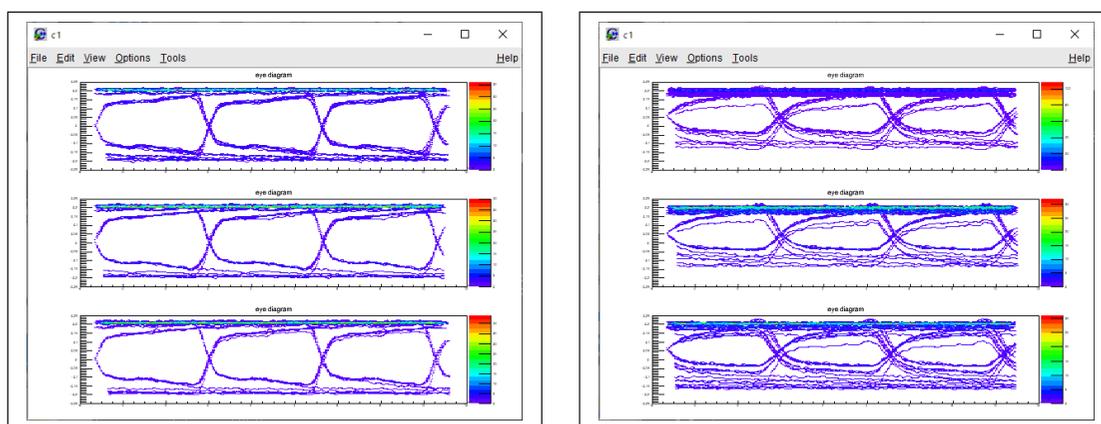


図 4.10 Bus-extender を用いない測定波形から作成したアイダイアグラム、上から 25、26、27 のデータ (左) と Bus-extender を用いた測定波形から作成したアイダイアグラム、上から 46、47、48 のデータ (右)

ることができるが、本研究では波高のばらつきと面積を求めることができなかつたため今後の課題とする。今回は、Bus-extender を用いない測定を基準として、Bus-extender を実装した場合でどれ程信号が劣化するかについて確認する。

図 4.10(左) は Bus-extender を用いない測定波形から作成したアイダイアグラムで、上から順に 25、26、27 のデータを使用したものを示している。図 4.10(右) は Bus-extender を用いた測定波形から作成したアイダイアグラムで、上から順に 46、47、48 のデータを使用したものを示している。

図 4.11 の左右どちらの図も多くの信号が重ね合わさっている水色の位置をそれぞれ基準点とし、そこから中央の空間の最も低くなる内側の線までの長さを求める。図に示した矢印の長さを比較する。Bus-extender 実装時では矢印の長さが 2.24、Bus-extender を実装せずに測定した場合は 2.9 という結果になった。Bus-extender を実装せずに測定した場合を 100% としたとき Bus-extender 実装時の結果は 77.2% の高さであることがわかった。この結果は、Bus-extender を開発したときの単体の測定でも約 70% に減衰することがわかっていて、実装時でも同様の結果が得られた。

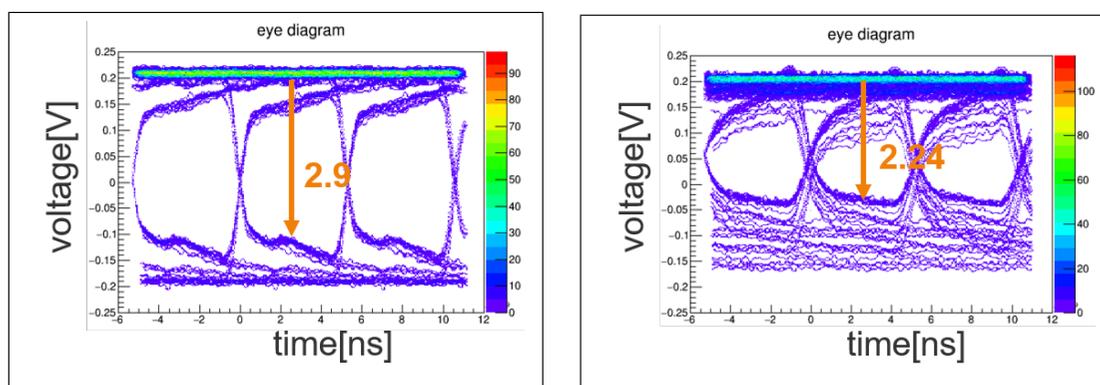


図 4.11 Bus-extender を用いない測定の波形から作成したアイダイアグラム、25、26、27 のデータの重ね合わせ (左) と Bus-extender を用いた測定の波形から作成したアイダイアグラム、46、47、48 のデータの重ね合わせ (右)

第5章

ゲイン値設定の問題と解決およびキャリブレーションテストの問題点

5.1 ゲイン値

FPHX チップでは受信したアナログ信号を増幅させてデジタル信号に変えている。この増幅率は変更することが可能であり、この増幅値のことをゲイン値と呼び GSel という 3bit で表せる設定値を用いて決定している。ゲイン値を変えることで DAC 値と電圧値の相関関係が変わる。これまでの研究でのこのゲイン値の扱いが、今回の測定によって改められたためここに示す。また、ゲイン値とオフセットに相関関係がないと考えられることもここで示す。

5.1.1 GSel

FPHX チップは、GSel というゲイン番号を変えてゲイン値を設定することができる。3bit で表されているため 8 段階変更できる。今回、宇宙線測定の結果からゲイン値の設定を誤って解釈していたことがわかり、テストパルスでゲイン値を変えてゲイン値ごとに作成したヒストグラムから、DAC 値と電圧値との相関係数を求めた。GSel とゲイン値の対応を表 5.1 に示す。

| ゲイン値番号 | これまでの解釈 | 今回 |
|--------|---------|-----|
| GSel=0 | 46 | 200 |
| GSel=1 | 50 | 150 |
| GSel=2 | 60 | 100 |
| GSel=3 | 67 | 85 |
| GSel=4 | 85 | 67 |
| GSel=5 | 100 | 60 |
| GSel=6 | 150 | 50 |
| GSel=7 | 200 | 46 |

表 5.1 ゲイン値番号と対応する増幅値

初めに Bus-extender を用いずに測定した結果を示す。図 5.1 は上段左から右に順に GSel=0,1,2,3、下段左から右

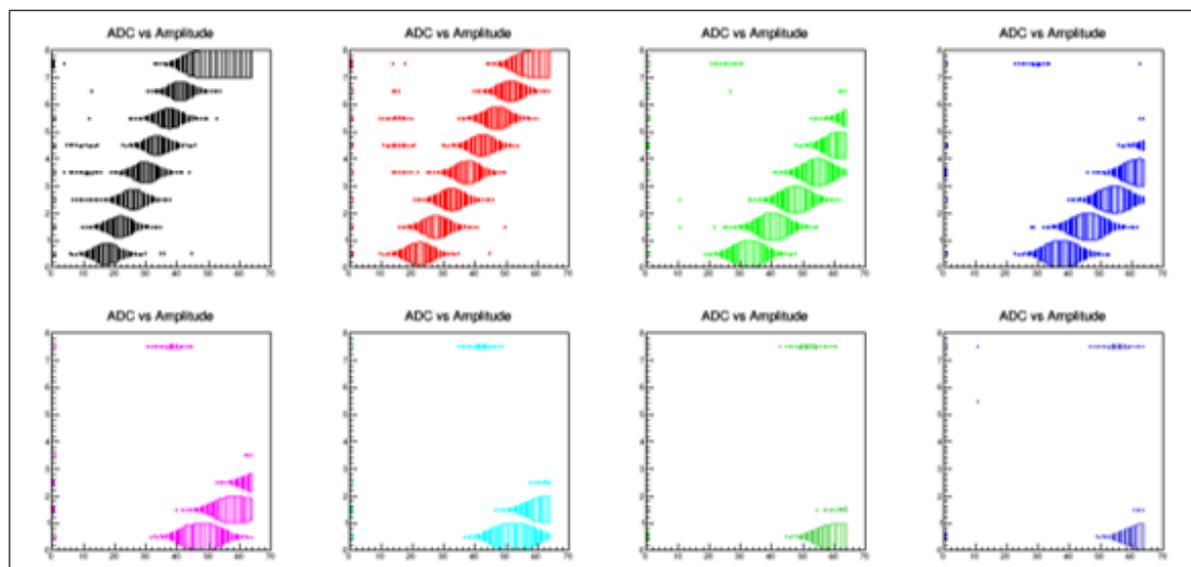


図 5.1 adc vs amplitude、上段左から右に順に GSel=0,1,2,3、下段左から右に順に GSel=4,5,6,7

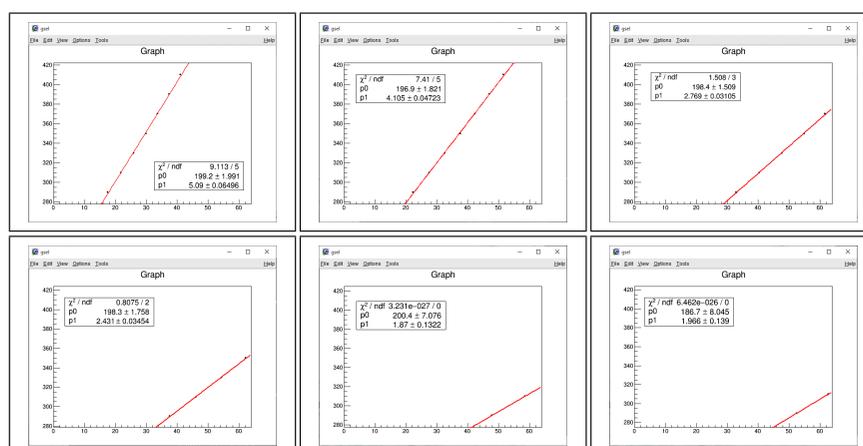


図 5.2 左から順に上段 GSel=0, 1, 2、下段 GSel=3, 4, 5 の時の電圧値 [mV] vs amplitude のグラフ

に順に GSel=4,5,6,7 の時の縦軸 adc(出力)、横軸 amplitude(入力)の二次元ヒストグラムで、図中の長方形の面積でヒットの比を表している。これらの内、GSel=0,1,2,3,4,5 の時の縦軸電圧値 [mV](出力)、横軸 amplitude(入力)のグラフを図 5.2 に左から順に示す。表 5.2 には電圧値 [mV](出力) と amplitude(入力) の相関関係から求めた傾きとオフセットを示す。

Bus-extender を用いた測定を同様の手順で行っており、その結果をここに示す。図 5.3 は上段左から右に順に GSel=0,1,2,3、下段左から右に順に GSel=4,5,6,7 の時の縦軸 adc(出力)、横軸 amplitude(入力)の二次元ヒストグラムで、図中の長方形の面積でヒットの比を表している。これらの内、GSel=0,1,2,3 の時の縦軸電圧値 [mV](出力)、横軸 amplitude(入力)のグラフを図 5.4 に左から順に示す。表 5.3 には電圧値 [mV](出力) と amplitude(入力) の相関関係から求めた傾きとオフセットを示す。

| DAC | ゲイン値 | オフセット | DAC 値と電圧値の相関係数 |
|------|------|-------|----------------|
| DAC0 | 200 | 199.2 | 5.09 |
| DAC1 | 150 | 196.9 | 4.105 |
| DAC2 | 100 | 198.4 | 2.769 |
| DAC3 | 85 | 198.3 | 2.431 |
| DAC4 | 67 | 200.4 | 1.87 |
| DAC5 | 60 | 186.7 | 1.966 |

表 5.2 オフセットと相関係数

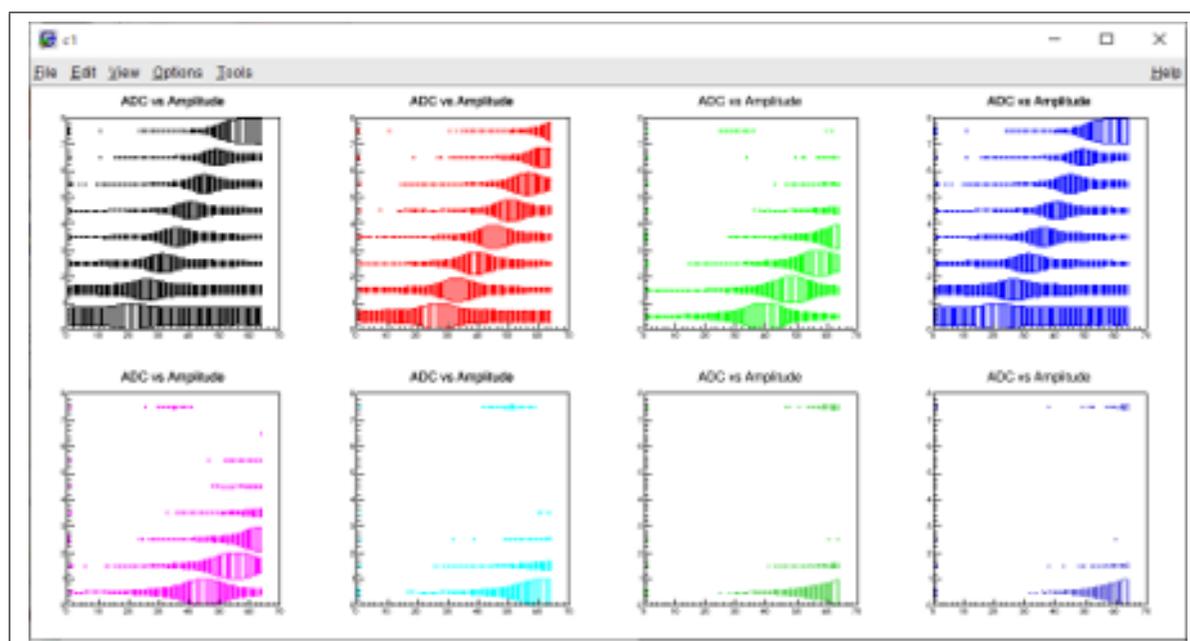


図 5.3 Bus-extender を用いた測定での adc vs amplitude、上段左から右に順に GSel=0,1,2,3、下段左から右に順に GSel=4,5,6,7

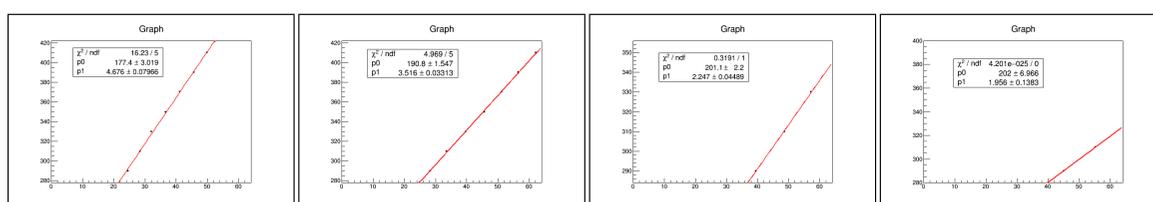


図 5.4 Bus-extender を用いた測定での左から順に GSel=0,1,2,3 の時の電圧値 [mV] vs amplitude のグラフ

| DAC | ゲイン値 | オフセット | DAC 値と電圧値の相関係数 |
|------|------|-------|----------------|
| DAC0 | 200 | 177.4 | 4.676 |
| DAC1 | 150 | 190.8 | 3.516 |
| DAC2 | 100 | 201 | 2.247 |
| DAC3 | 85 | 202 | 1.956 |

表 5.3 Bus-extender を用いた測定でのオフセットと相関係数

| Data | GSel | Gain value | P0 (offset) | P1 (coefficient) | Threshold |
|---------------|------|------------|-------------|------------------|--------------------|
| 20200124-1826 | 0 | 200 | 199.2 | 5.09 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200124-1828 | 1 | 150 | 196.9 | 4.105 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200124-1914 | 2 | 100 | 198.4 | 2.769 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200124-1835 | 3 | 85 | 198.3 | 2.431 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200124-1838 | 4 | 67 | 200.4 | 1.87 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200124-1840 | 5 | 60 | 186.7 | 1.966 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200304-1836 | 2 | 100 | 206.6 | 2.333 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200304-1852 | 2 | 100 | 207 | 2.314 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200304-1903 | 2 | 100 | 207 | 2.315 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200304-1909 | 2 | 100 | 207 | 2.312 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200304-1923 | 2 | 100 | 206.8 | 2.308 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200304-1943 | 0 | 200 | 197.9 | 4.148 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200304-1948 | 1 | 150 | 201.2 | 3.348 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200304-1954 | 2 | 100 | 206.9 | 2.305 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200304-2010 | 3 | 85 | 196 | 2.573 | DAC0:12~DAC7:40(4) |
| 20200304-2018 | 4 | 67 | 200.4 | 2.186 | DAC0:12~DAC7:40(4) |
| 20200304-2023 | 5 | 60 | 190.8 | 2.002 | DAC0:6~DAC7:27(3) |
| 20200305-1607 | 2 | 100 | 209.4 | 2.258 | DAC0:20~DAC7:55(5) |
| 20200305-1618 | 6 | 50 | 203.5 | 1.556 | DAC0:4~DAC7:18(2) |
| 20200305-1627 | 7 | 46 | 196.3 | 1.435 | DAC0:4~DAC7:18(2) |

表 5.4 ゲイン値と閾値の設定を変えた測定でのデータの表

5.1.2 オフセット

オフセットとは信号がない状態の電圧値のことである。ゲイン値や閾値の設定を変えてデータを取ることでオフセットを見積もる。

表 5.4 に表示したデータはすべて Bus-extender を用いずに行った測定である。表 5.4 の Threshold に示す括弧内の数値は DAC 間の差である。この表から、オフセットの設定値は測定によりばらつきはあるものの、ゲイン値によって変化するというような関係は見られないことがわかった。それによりオフセットの平均値を求めると $(200.8 \pm 6.0) \text{mV}$ である。

5.2 打ち込み数への評価

第 3 章の 3.2.1 で詳しく述べたが、テストパルスは全 26 チップの全 128 チャンネルに amplitude0~63 の 64 段階をそれぞれ 10 回ずつ打ち込んでその応答を確認している。しかし、実際に測定すると応答回数が約 20 回ずつであることを確認した。20 回の応答について今回わかったことをここで述べる。

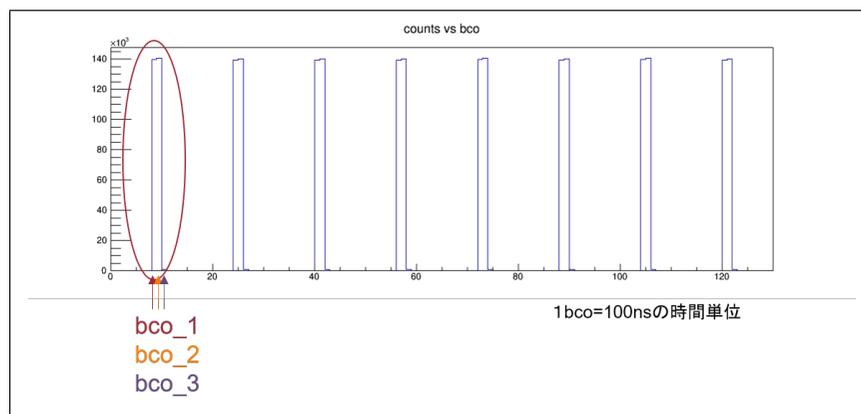


図 5.5 counts vs bco のヒストグラム

5.2.1 bco

キャリブレーションテストによって得られた、各チップ各チャンネルへの amplitude に打ち込まれるそれぞれ 20 回ずつのデータを bco (beam clock) という時間単位に注目して確認した。bco とは $1\text{bco}=100\text{ns}$ の時間単位のこと、INTT 用テストベンチ環境では時間データを bco で表している。bco は 7bit で表され $0\sim 127\text{bco}$ を繰り返している。

5.2.2 応答回数

キャリブレーションテストによって得られた、各チップ各チャンネルへの amplitude に打ち込まれるそれぞれ 20 回ずつのデータを bco (beam clock) という時間単位に注目して確認した。図 2.4 のように上下段でチップが前後半に分かれており、テストパルスは前半のチップ 1 ~ 13 のすべてのチャンネルにデータを送った後、後半のチップ 14 ~ 26 へデータが送られる。テストパルスはチャンネル 0 から順に amplitude $0\sim 63$ へ 10 回ずつチャンネル 127 まで入力される。1 回のデータで 13 チップ分送信されている。閾値が設定されているため、これらの順序に従って送られてくるテストパルスの内、amplitude は閾値付近から応答が確認される。

5.2.3 応答回数の問題点

応答回数を確認すると、実際にはあるチップあるチャンネルの各 amplitude には 20 回前後のテストパルスが送られてきているように見えていた。それらがいつ来ているのかを確認するために、bco を横軸としたヒストグラムを作成した。

図 5.6 は横軸が bco のヒストグラムである。図 5.6 で示すように、テストパルスが確認される最も小さい bco を bco_1 とし、それに連続の bco をそれぞれ bco_2、bco_3 とする。

これらがどのようなデータかを確認するために、それぞれ縦軸 amplitude、横軸チップでヒストグラムを作成した。図 5.6 はそれぞれ bco_1 (左) bco_2 (中央) bco_3 (右) で分けて作成した縦軸 amplitude、横軸チップのヒストグラムである。

これらのヒストグラムを確認すると、bco_1 と bco_2 はヒストグラムの様子が似ているように見える。また、bco_3

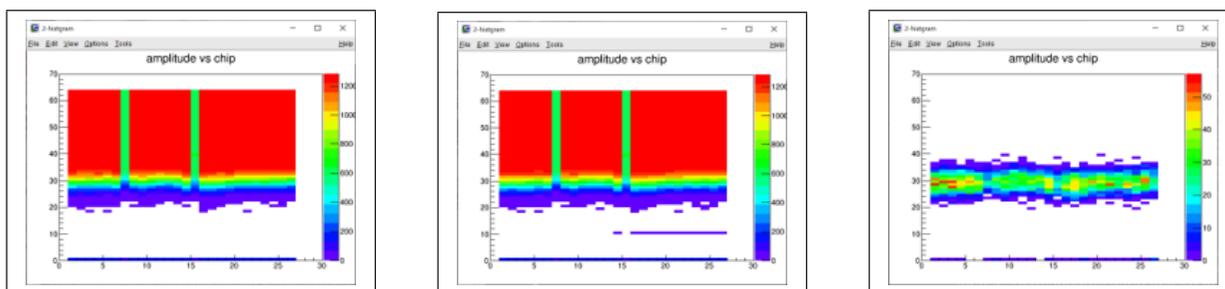


図 5.6 bco_1(左)bco_2(中央)bco_3(右) で分けて作成したそれぞれの amplitude vs chip のヒストグラム

| * Row * | * event * | * chip_id * | * chan_id * | * ampl * | * bco * | * Row * | * event * | * chip_id * | * chan_id * | * ampl * | * bco * |
|-----------|-----------|-------------|-------------|----------|---------|-----------|-----------|-------------|-------------|----------|---------|
| * 23165 * | 23165 * | 13 * | 1 * | 50 * | 120 * | * 23177 * | 23177 * | 13 * | 1 * | 50 * | 121 * |
| * 23166 * | 23166 * | 4 * | 1 * | 50 * | 120 * | * 23178 * | 23178 * | 4 * | 1 * | 50 * | 121 * |
| * 23167 * | 23167 * | 5 * | 1 * | 50 * | 120 * | * 23179 * | 23179 * | 5 * | 1 * | 50 * | 121 * |
| * 23168 * | 23168 * | 6 * | 1 * | 50 * | 120 * | * 23180 * | 23180 * | 6 * | 1 * | 50 * | 121 * |
| * 23169 * | 23169 * | 8 * | 1 * | 50 * | 120 * | * 23181 * | 23181 * | 8 * | 1 * | 50 * | 121 * |
| * 23170 * | 23170 * | 9 * | 1 * | 50 * | 120 * | * 23182 * | 23182 * | 9 * | 1 * | 50 * | 121 * |
| * 23171 * | 23171 * | 1 * | 1 * | 50 * | 120 * | * 23183 * | 23183 * | 1 * | 1 * | 50 * | 121 * |
| * 23172 * | 23172 * | 2 * | 1 * | 50 * | 120 * | * 23184 * | 23184 * | 2 * | 1 * | 50 * | 121 * |
| * 23173 * | 23173 * | 3 * | 1 * | 50 * | 120 * | * 23185 * | 23185 * | 3 * | 1 * | 50 * | 121 * |
| * 23174 * | 23174 * | 10 * | 1 * | 50 * | 120 * | * 23186 * | 23186 * | 10 * | 1 * | 50 * | 121 * |
| * 23175 * | 23175 * | 11 * | 1 * | 50 * | 120 * | * 23187 * | 23187 * | 11 * | 1 * | 50 * | 121 * |
| * 23176 * | 23176 * | 12 * | 1 * | 50 * | 120 * | * 23188 * | 23188 * | 12 * | 1 * | 50 * | 121 * |

表 5.5 bco_1 と bco_2 で同様のデータが来ていることを示す表

では閾値付近に多くデータが来ていることがわかる。bco_1 と bco_2 のそれぞれのデータは、実際にイベントで確認すると同様のデータが2連続で来ていることがわかった。表 5.5 はチャンネル 1 の amplitude=50 の時の 1 回分のデータである。表 5.5 から bco が 1 つずれてまったく同じデータが連続で来ていることがわかる。

これらが常に同じであることを確認するため今後解析を進める。

第6章

結論

今回の研究では、INTT 用テストベンチ環境で Bus-extender を実装した場合と実装せずにテストした場合の結果を解析し比較することで、Bus-extender 実装時のノイズ評価と伝送効率について議論した。ノイズ評価では、Bus-extender を用いて測定した場合、タイプの異なるチップで結果が大きく異なり、Type-B のチップの方がノイズの影響をより受けるということがわかった。また、Bus-extender を実装した場合では応答回数にばらつきが多くあったため、Bus-extender を実装しなかった場合に比べてレートが下がることがわかった。オシロスコープを用いた測定では、アイダイアグラムを作成することで伝送されるテストパルスの波高の高さを比較し、Bus-extender を実装しないで行った測定での波高を 100% としたとき Bus-extender 実装時では波高が 77.2% に下がることを確認した。

キャリブレーションテストの設定について、ゲイン値とオフセットについての測定をしその結果従来の解釈とゲイン値の真の値が異なることがわかった。今後は、アイダイアグラムの中心の面積から伝送効率を評価することと、キャリブレーションテストのテストパルスによるデータ収集について応答回数が設定の 2 倍あることについて、より深く解析を進める。

謝辞

本研究を進めるにあたり、たくさんの方々にお世話になりました。

初めに、このような研究の機会と場を与えてくださった研究室の林井先生、宮林先生、下村先生、蜂谷先生に厚く感謝申し上げます。特に指導教官である蜂谷先生には、人に自分の考えを伝えるためには用いる言葉を自身がどのような意図で使っているのか、目的のためにどの順序で何を行ったのか、時には図やグラフを使って説明する必要性とその場合の欠かせない情報など、誰かに発信することでの重要なことをこの1年間で教えていただきました。まだまだできているとはとても言えない状態ではありますが、意識して考えることの大切さと、正確な情報を相手に伝える難しさを学ぶことができました。

INTTの開発に携わらせていただくことで、理化学研究所の中川さんや都立産業技術研究センターの近藤さん、台湾で共同で研究している皆様など多くの方々に関わる機会をいただき、海外での出張に参加させていただいたり、学部生では学ぶことができなかった専門分野以上の多くの知識にも触れることができました。開発グループでのMTや台湾出張では、英語を用いて発表することや会話することもあり、未完成な英文と英単語、ジェスチャーのみでしか伝えることができなかった私を皆様は根気強くたくさんフォローしてくださり、ほんの少しずつ聞き取りや話すことができるようになりました。

:q 同じ研究グループの鈴木先輩は、INTTテストベンチに関する用語や扱い方、その手順すべてを丁寧に教えてくださり、トラブルへの対処や私たちの拙い質問にもいつも真摯に答えてわかりやすく説明をしてくださいました。同期の柴田さんとは、お互いに得意な分野でカバーしながら協力して実験を進めることができ、また彼女の研究に対する姿勢は常に刺激になりました。研究室外での友人たちには、発表の練習相手になってもらったり研究で煮詰まった時の逃げ道になってもらったりして、研究を進めるうえで研究外での大切な存在でした。

ここでの経験は、これからの私にとって進学する大学院での研究だけでなく、社会に出たときにも必ず支えになると確信しています。私に関わって下さったすべての方、本当にありがとうございました。

最後に、私のやりたいことを尊重していつもサポートしてくれている両親に感謝の意を表したいと思います。

参考文献

- [1] 一色萌衣 呉羽広子 杉野和音、RHIC-sPHENIX 実験における中間飛跡検出器 INTT 用シリコンセンサーの性能評価とテストベンチ構築、奈良女子大学学士学位論文
- [2] 鈴木彩香、RHIC-sPHENIX 実験における INTT シリコンモジュールの性能評価/ビームテスト実験のデータ解析、奈良女子大学修士学位論文
- [3] 柴田実香、RHIC-sPHENIX 実験における中間飛跡検出器 INTT 用シリコンセンサーによる宇宙線測定、奈良女子大学学士学位論文
- [4] 益田英知、RHIC-sPHENIX 実験におけるシリコンストリップ検出器の開発、立教大学修士学位論文
- [5] PHENIX 2003 *PHENIX Detector Overview*.
- [6] *sPHENIX 2014 An Upgrade Proposal from PHENIX Colaboration*.