

2021 年度 修士論文

RHIC-sPHENIX 実験のための
INTT 検出器の
データ読出し性能の評価

奈良女子大学大学院 人間文化総合科学研究科
数物科学専攻 高エネルギー物理学研究室

森田美羽

2022 年 2 月 28 日

概要

米国ブルックヘブン国立研究所の重イオン衝突型加速器 (Relativistic Heavy Ion Collider: RHIC) を用いて、2023 年より sPHENIX 実験が稼働する。sPHENIX 実験は、クォークとグルーオンが閉じ込めから解放されるクォーク・グルーオン・プラズマ (Quark-Gluon Plasma: QGP) と呼ばれる状態の性質を解明することが目的である。sPHENIX 実験で使用する検出器の 1 つである INTermediate Tracker (INTT) は、シリコンストリップ型飛跡検出器であり、中間に位置する検出器として他の 2 つの検出器とトラッキング情報のマッチングを行うため、精度の高い位置分解能・時間情報のどちらもが求められる。

INTT で測定した大量の生データは 1.3 m 離れた読み出し回路に伝送され、処理される。間をつなぐ高性能なケーブルには、1 m 以上の長尺、3.5 cm の幅に 130 μm 幅の信号線路を 6 2 ペア均一に配置するという高密度、1 ペアあたり 200 Mbps の差動信号 (LVDS) 高速データ転送、そして狭い領域でも曲線を描きながら配置することができる柔軟性の全ての条件が求められる。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) 技術を用いてデータケーブル (Bus-Extender) の独自開発を行ってきた。

本論文では、INTT がデータを読み出す性能を評価するための 3 つの研究を行ったことを報告する。まず、実験中の INTT の動作状況をモニターするために使用する、テストパルスによる INTT 用読み出し回路の応答テスト (キャリブレーションテスト) が、Bus-Extender の使用によってどのような影響を受けるかについて調べた。次に、センサーで測定したデータを記録する能力を評価するために、信号伝送率の悪化の原因となる Bus-Extender による信号波形の減衰・なまりについて調べた。最後に、INTT が粒子を検出できる能力を調べるためにテストビーム実験を行って検出効率を求めた。

その結果、Bus-Extender を使用したキャリブレーションテストでは、大量測定結果から 98.4 % 以上の受信能力があることがわかった。また、LVDS の電流量を 8 mA にすることで、0.47 V の波高を得ることができ、誤送信の基準となるマスクの ± 0.1 V の領域からも十分に離れることがわかった。検出効率は、全てのラダーで 99 % 以上の検出効率を得られることがわかった。これらの結果は、sPHENIX 実験で INTT を運用するための基本データとなる。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	素粒子物理学	1
1.1.1	素粒子の標準模型	1
1.1.2	クォーク・グルーオン・プラズマ	2
1.1.3	重イオン衝突実験	2
1.2	研究背景	2
1.2.1	RHIC 加速器	2
1.2.2	sPHENIX 実験	3
1.3	これまでの研究	3
1.4	研究の目的	4
第 2 章	中間飛跡検出器 INTT	5
2.1	sPHENIX における飛跡検出器群	5
2.1.1	Monolithic active pixel sensor-based VerTeX detector (MVTX)	5
2.1.2	INTermediate Tracker (INTT)	6
2.1.3	Time Projection Chamber (TPC)	6
2.2	INTT ラダー	6
2.2.1	フルラダー	6
2.2.2	シリコンセンサー	7
2.2.3	FPHX チップ	9
2.2.4	HDI(High Density Interconnect)	9
2.3	Bus-Extender	9
2.3.1	長尺 FPC	9
2.4	読出し回路	10
2.4.1	ROC(Read Out Card)	10
2.4.2	FEM(Front End Module) と FEM-IB(FEM Interface Board)	11
2.4.3	Beam Clock Distribution Board	13
第 3 章	Bus-Extender 使用によるキャリブレーションテストの評価	14
3.1	INTT 用テストベンチの構成	14
3.2	INTT ラダーの動作確認	15

3.2.1	キャリブレーションテスト	15
3.3	データ解析	16
3.3.1	ノイズ評価	16
3.3.2	ADC と入力パルスのオフセットとスロープの推定	18
3.3.3	大量測定によるばらつきの評価	19
第 4 章	Bus-Extender の性能評価	22
4.1	物理特性の測定	22
4.1.1	曲げ試験	22
4.1.2	剥離試験	22
4.2	物理特性の評価	23
4.2.1	幅測定	23
4.2.2	曲げ弾性率の測定	24
4.2.3	曲げ測定の議論	25
4.2.4	引き剥がし強度の測定	26
4.3	電気特性の測定	28
4.3.1	出力波形の測定	28
4.3.2	ワードの読出し	32
4.3.3	アイダイアグラム	32
4.3.4	BER (Bit Error Rate)	34
4.3.5	離散フーリエ変換による周波数分解	35
4.4	電気特性の評価	35
4.4.1	アイダイアグラムの評価	35
4.4.2	BER の推定	37
4.4.3	出力波形の評価	37
4.4.4	周波数成分の評価	39
第 5 章	INTT の検出効率の評価	43
5.1	研究手法	43
5.2	実験セットアップ	43
5.2.1	東北大 ELPH での陽電子ビーム	43
5.2.2	実験セットアップ	44
5.2.3	NIM モジュール	46
5.2.4	CAMAC 回路	46
5.2.5	解析手法	46
5.3	結果と考察	52
5.4	まとめと今後	53
第 6 章	結論	54

付録 A	測定中のトラブルとその解決	56
A.1	テストパルスを入力数の 2 倍受け取る	56
A.2	bco	56
A.3	ROC から FEM までのデータの回路図	58
A.4	ハーフエントリー問題	59
A.5	電流量と信号の波高	61
謝辞		63
参考文献		64

目次

1.1	素粒子の標準模型	1
1.2	初期宇宙と現在の素粒子の状態の概略図	2
1.3	RHIC 加速器	3
1.4	sPHENIX 測定器	4
2.1	検出器群の断面	5
2.2	INTT	6
2.3	INTT ラダー	7
2.4	INTT ハーフラダー	7
2.5	INTT フルラダー	7
2.6	pn 接合	8
2.7	シリコンセンサー	8
2.8	チップから出力されるデジタルデータ構成	9
2.9	検出器群中の Bus-Extender の設置位置	10
2.10	Bus-Extender ケーブル	10
2.11	Bus-Extender ケーブルの層構造	11
2.12	ROC	11
2.13	FEM (右) と FEM-IB (左)	12
2.14	Beam Clock Distribution Board	13
3.1	奈良女子大学のテストベンチ	14
3.2	テストベンチの概略図	15
3.3	入力パルスの波高と測定の相関分布。Bus-Extender を使用する前 (左) と後 (右) の比較	16
3.4	ノイズ評価を行うための Fit 関数	17
3.5	Bus-Extender を使っていないとき (左) と使ったとき (右) のチップごとのノイズによる閾値	17
3.6	Bus-Extender を使っていないとき (左) と使ったとき (右) のチップごとのノイズによる閾値のズレ幅	18
3.7	ADC と入力パルスの相関関係を示す分布	18
3.8	信号波高に変換した DAC 閾値と入力パルスのグラフ	19
3.9	対応する値をガウス分布で Fit して得た中央値からスロープを求めた場合 (左) とヒット数を重みとした平均値からスロープを求めた場合 (右) のチップごとのグラフ	19
3.10	全てのチャンネルで求めた傾き (左) と切片 (右) のヒストグラム	20

3.11	各電流量に対するキャリブレーションテストの成功率	21
3.12	2 mA に設定した測定ごとのキャリブレーションテストの成功率	21
4.1	幅測定を行ったマイクロスコープ	23
4.2	幅測定	23
4.3	5 回分の幅測定の結果	24
4.4	万能試験機が試験片を押し曲げる様子	24
4.5	試験片を押しした力と距離	25
4.6	試験片を曲げる力に対する曲率	25
4.7	試験片を曲げたときの弾性域と塑性域	26
4.8	剥離試験	27
4.9	引き剥がす箇所	27
4.10	引き剥がす接着層	28
4.11	剥離試験に使用したサンプル	29
4.12	引き剥がしに成功したサンプル（左）と失敗したサンプル（右）	30
4.13	放射線照射を行っていないサンプルの剥離試験の結果	30
4.14	放射線を 5 kGy 照射したサンプルの剥離試験の結果	31
4.15	重複したサンプルの剥離試験の結果	31
4.16	高速オシロスコープ	31
4.17	出力波形を観測するセットアップの概略図	32
4.18	LVDS の回路図	32
4.19	出力波形の測定箇所である終端抵抗の一つ	33
4.20	差動プローブで終端抵抗を挟む様子	33
4.21	高速オシロスコープで測定した波形	34
4.22	出力波形	34
4.23	アイダイアグラムの作成	34
4.24	電流量を変えた測定でのアイダイアグラムの比較	35
4.25	アイダイアグラムと比較するヒット数	36
4.26	アイダイアグラムとヒットマップの比較	36
4.27	Bus-Extender を使用したときと使用していないときのアイダイアグラムの比較	37
4.28	チップごとのアイダイアグラムの比較	37
4.29	チップごとのアイダイアグラムの波高の測定結果	38
4.30	BER の推定	38
4.31	複数のチップを測定した出力波形を重ねたグラフ	39
4.32	電流量を変えて測定した出力波形を重ねたグラフ	39
4.33	変換ケーブルの長さを変えて測定した出力波形を重ねたグラフ	39
4.34	出力波形のフーリエ変換	40
4.35	出力波形の周波数成分	40
4.36	出力波形のフーリエ変換	40

4.37	Bus-Extender を使用する前（黒）とした後（赤）に測定した出力波形のパワースペクトルの比較 . . .	40
4.38	Bus-Extender を使用する前に対する使用した後の減衰率	41
4.39	LVDS を変えて測定した出力波形のパワースペクトルの比較	41
4.40	LVDS が 8 mA の測定結果に対する 2 mA の測定結果の減衰率	41
4.41	同じ条件で測定した出力波形のパワースペクトルの比較	42
4.42	同じ測定の減衰率	42
5.1	研究施設概要	44
5.2	GeV- γ 加速器	44
5.3	GeV- γ 加速器の一部	45
5.4	テストビーム実験を行った実験室	45
5.5	ビームテストでの INTT ラダーのセットアップ	45
5.6	ビームテストの回路図	46
5.7	NIM と CAMAC	47
5.8	データのフォーマット	47
5.9	イベント選択	48
5.10	ヒットマップ	48
5.11	セルごとのストリップヒット	48
5.12	クラスター化後のヒット位置	49
5.13	クラスター化	49
5.14	基準ラダーの差に対するクラスターヒット位置	50
5.15	基準ラダーの相関分布	50
5.16	セルとストリップの位置を厳選した基準ラダーの相関分布	50
5.17	基準ラダーの差の分布	51
5.18	基準ラダーで求めた期待位置に対する注目ラダーのクラスターヒット位置、全てのヒット（上）、 3σ （中央）、 2σ （下）	51
5.19	基準ラダーで求めた期待位置と注目ラダーのクラスターヒット位置の差の分布	52
A.1	チップ 1 チャンネル 1 の入力波高ごとのヒット数分布	56
A.2	3 回連続で来るヒット	57
A.3	チップ 1 つ分のチャンネルごとの入力信号に対するヒット数、bco_1（左）、bco_2（中央）、bco_3（右）	57
A.4	FEM、FEM-IB と ROC をつなぐ光ファイバー	57
A.5	FEM、FEM-IB と ROC をつなぐ光ファイバーの回路の概略図	57
A.6	BCO と START の出力波形	58
A.7	FEM の FPGA 内に書かれている各 ROC port から信号を受け取るための端子の表	58
A.8	FPGA 上で各 port を指定したときの出力波形をオシロスコープで観測した図	59
A.9	波高ごとのヒット数	59
A.10	正常な応答をしているときとハーフエントリー問題になるときのタイミングの比較	59
A.11	オシロスコープでのタイミングの観測	60

A.12	電流量を変えた測定でのアイダイアグラムとヒット数の比較	60
A.13	同じチップの受信に成功したラインと失敗したラインを重ねたグラフ	61
A.14	同じチップの受信に成功したラインと失敗したラインの出力波形のうちワードを重ねたグラフ	61
A.15	LVDS を 8 mA に設定した測定のアイダイアグラム	61
A.16	出力波形のデータワードを重ねたグラフ	62

表目次

3.1	キャリブレーションテストにおける DAC 閾値	15
3.2	理化学研究所の測定表	20
4.1	使用したサンプルと引き剥がす層のパターンの表	26
4.2	高速オシロスコープに関連する使用機器一覧	30
5.1	6 種類の検出効率	52

第1章

序論

1.1 素粒子物理学

素粒子物理学は、高エネルギーの宇宙線や反粒子のような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。

1.1.1 素粒子の標準模型

図1.1は現在発見されている素粒子である。素粒子には、物質を構成する粒子として、スピン $\frac{1}{2}$ をもつフェルミ粒子と、整数スピンをもつボーズ粒子が存在する。フェルミ粒子はレプトンとクォークの2種類あり、それぞれ全6種類である。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、ボーズ粒子には相互作用を媒介するゲージ粒子と質量の起源となるヒッグス粒子が存在し、ゲージ粒子は全4種類である。この、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、強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用の



図1.1 素粒子の標準模型

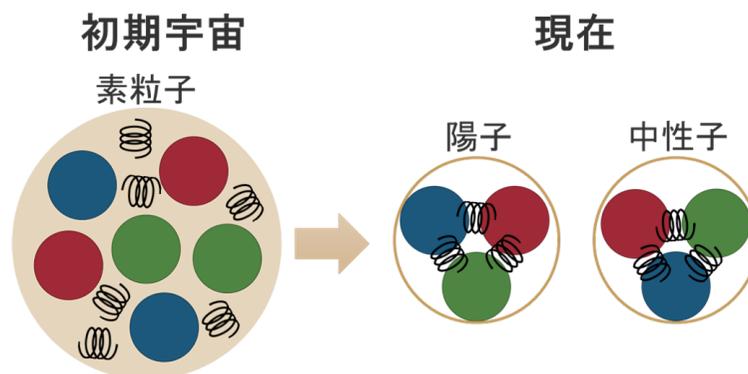


図 1.2 初期宇宙と現在の素粒子の状態の概略図

3つである。

1.1.2 クォーク・グルーオン・プラズマ

全ての物質は、分子・原子で構成されており、原子の中では、中心の原子核とその周りを電子が回っている。原子核は、正電荷を持つ陽子と電氣的に中性な中性子で作られている。陽子や中性子をまとめて核子と呼び、核子はクォークとそれを結びつけるグルーオンで構成されている。このように、物質を構成する要素は階層構造を作っており、クォークとグルーオンは、その最小の構成子である。

通常、核子内のクォークはグルーオンによる強い力で引きつけ合い、核子から単独で出てくることはできない。一方、ビッグバン直後 10^{-5} s の宇宙は超高温状態であり、クォーク・グルーオン・プラズマ (Quark-Gluon Plasma: QGP) と呼ばれる、クォークとグルーオンが核子の束縛から解放されたプラズマ状態だったと考えられている。その後、宇宙の膨張と共に温度が低下し、それに伴ってクォークとグルーオンが凝縮することで核子を作り、現在の宇宙を作る物質ができあがった。図 1.2 は初期宇宙と現在の素粒子の状態を示した概略図である。

1.1.3 重イオン衝突実験

初期宇宙の状態を地球上で唯一再現する方法として確立されたのが、重イオン衝突実験である。金原子核などの重イオンを光速近くまで加速させ衝突させることで、衝突点を高温・高密度にすることができる。

1.2 研究背景

1.2.1 RHIC 加速器

アメリカの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 (Relativistic Heavy Ion Collider: RHIC) を用いて QGP や陽子スピンの起源を研究している。図 1.3 は RHIC の全体を撮影した写真である。RHIC では金原子核や陽子、ヘリウム原子核などを用いた衝突実験を行っており、特に金原子同士の実験では、核子 1 個あたりの重心系衝突エネルギーが最大で 200 GeV、陽子同士の衝突では 510 GeV まで実現可能である。粒子を加速させる 2 つのリングは周長 3.8 km で、106 ns (9.4 MHz) の間隔で粒子ビームが交差しており、6 か所の衝突点にて両方向に走るビームが衝突する。RHIC は 2000 年に完成し、2005 年には

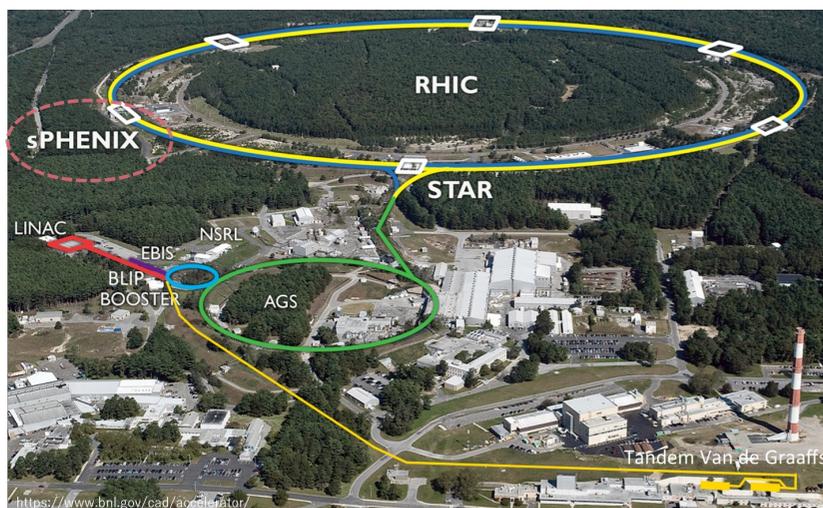


図 1.3 RHIC 加速器

PHENIX 実験による金原子核衝突にて QGP が生み出されていることを確立した。一方、CERN の大型ハドロン衝突型加速器 (Large Hadron Collider: LHC) での鉛原子核衝突型実験が 2010 年より開始し、RHIC よりも 20 倍高い衝突エネルギーにおいても QGP を生成したことで、QGP が実在することを確実なものにした。現在では、QGP の物質としての性質を解明することが主な研究命題となっている。

1.2.2 sPHENIX 実験

the super Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment (sPHENIX 実験) は BNL にある RHIC を用いた 2023 年に稼働予定の新たな実験であり、QGP を発見した PHENIX 実験を高度化した次期実験にあたる。sPHENIX 実験も PHENIX 実験同様に QGP の生成とその性質の研究を目的としている。図 1.4 は sPHENIX 測定器の概略図であり、飛跡検出器群、ソレノイド電磁石、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータで構成されている。この実験には世界中の研究者が参加し、PHENIX 実験で測定することができなかったジェットやウプシロン粒子の観測が計画されている。sPHENIX のラビディティ領域は $|\eta| \leq 1.1$ であり、方位角は $\Delta\phi = 2\pi$ である。

1.3 これまでの研究

INTT ラダーの動作をモニターするために、テストパルスを用いて INTT 読出し回路の応答を調べる。このテストをキャリブレーションテストと呼ぶ。これまでの INTT の開発においても、キャリブレーションテストを用いて INTT ラダーおよび読出しシステムの動作確認や性能評価を行ってきた。これまでの評価では、Bus-Extender を使用せず INTT の単体性能を評価してきたが、sPHENIX 実験時には、INTT のデータは Bus-Extender を通って読み出される。Bus-Extender は 1.2 m と長尺であるため、キャリブレーションテストの応答が信号のなまりやノイズにより、影響を受ける可能性があり、これをあらかじめ調べ、理解しておく必要がある。この章では、Bus-Extender により、キャリブレーションテストがどのような影響を受けるかを、ノイズ量の測定、入力パルスと測定値との対応関係 (スロープとオフセットの測定)、そして大量測定によるキャリブレーションテストの安定性の 3 つの点で評価する。

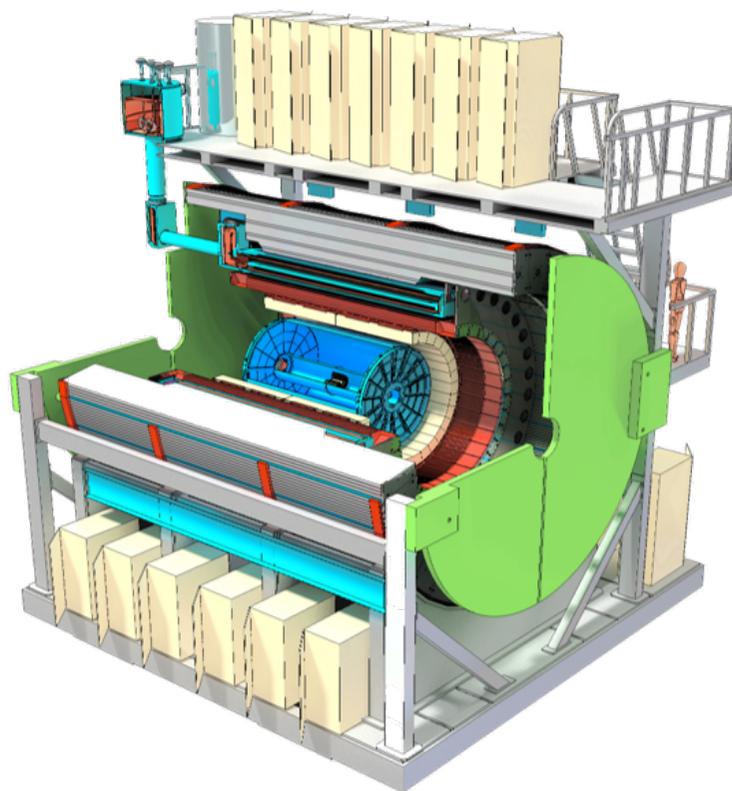


図 1.4 sPHENIX 測定器

1.4 研究の目的

本研究では、単体の開発が完了した INTT と Bus-Extender を実機につないで、データ読出し性能の評価を行うことを目的としている。評価項目は3つあり、それらについて各章にて報告する。第2章では INTT 用シリコン検出器について、第3章では、1つ目の評価項目である Bus-Extender 使用によるキャリブレーションテストのノイズ評価について、第4章では、2つ目の評価項目である Bus-Extender の物理特性と電気特性の評価について、第5章では3つ目の評価項目であるテストビーム実験による INTT の検出効率の評価について詳しく述べ、第6章では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

図 2.1 は 3 つの検出器群を設置したときの断面図である。飛跡検出器群は、内側から MVTX、INTT、TPC で構成されている。INTT は我々が開発・建設を進めてきた検出器である。この章では、MVTX、INTT、TPC について記述するとともに、本研究で行う INTT について、検出器の構成要素や読み出しケーブル・Bus-Extender について記述する。

2.1.1 Monolithic active pixel sensor-based VerTeX detector (MVTX)

MVTX は、3 つの飛跡検出器のうち最も内側の 2~6 cm に位置する。Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS) を用いた 30 μm 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り、高精度の飛跡検出が可能である。衝突点近傍での崩壊を精密に測定し、長寿命粒子であるボトムハドロンや b-jet の識別を担っている。

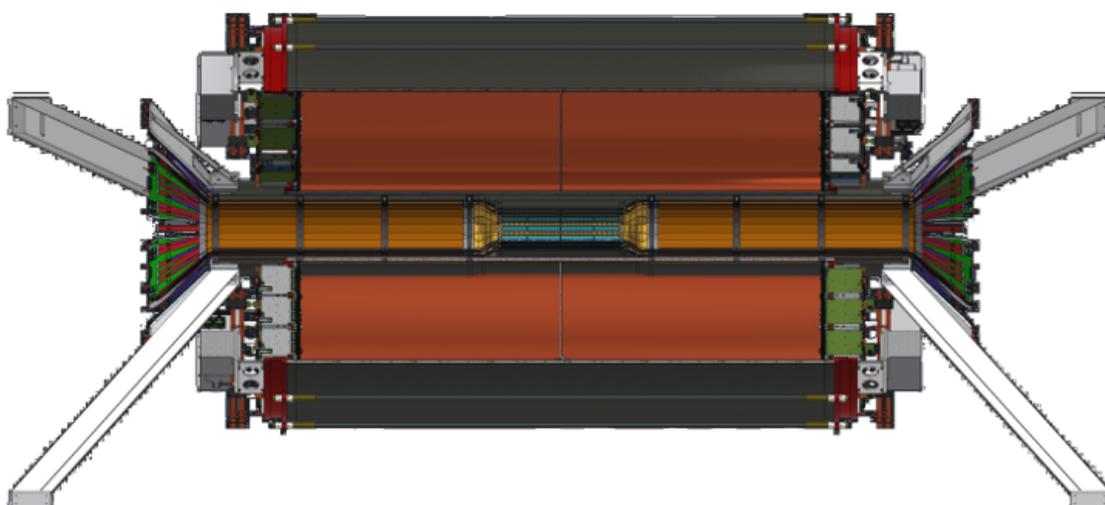
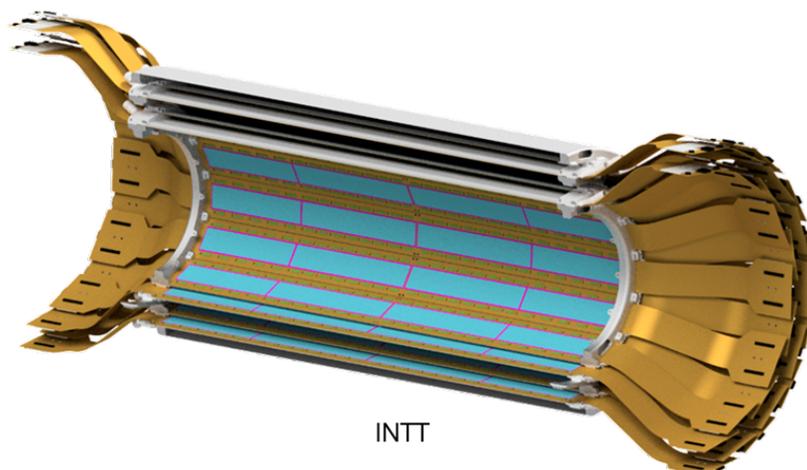


図 2.1 検出器群の断面



INTT

図 2.2 INTT

2.1.2 INTermediate Tracker (INTT)

INTT はビームパイプから 6~12 cm に位置し、ストリップ型シリコンセンサーを 2 層のバレル構造に配置する。図 2.2 は INTT の断面図である。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間隔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測ることで、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 には計 56 本のラダーを使用する。INTT で検出した大量の生データは 1.3 cm 離れた後段の読み出し回路へ伝送・処理される。この間をつなぐケーブルを Bus-Extender と呼び、INTT からの信号を適切に伝送できるよう独自開発を行ってきた。Bus-Extender は 56 本のラダーにそれぞれ 1 本ずつ接続する。

2.1.3 Time Projection Chamber (TPC)

TPC は 3 つの検出器のうち最も外側の 30~80 cm に位置する。衝突中心からビーム方向に ± 1 m ずつを覆う大型のガス検出器である。荷電粒子の飛跡を再構成し、曲率半径から運動量を測定する。また、エネルギー損失量 $\frac{dE}{dx}$ を用いて、電子、 π 中間子、K 中間子、陽子など、荷電粒子の種類を識別する。

2.2 INTT ラダー

2.2.1 フルラダー

図 2.3 は、INTT を構成している各パーツの概略図である。INTT ラダーから送信される信号は Bus-Extender、変換ケーブルを経由して読み出し回路へと伝送される。INTT ラダーは、シリコンセンサーと読み出しチップ、読み出し基板、それらを支える構造体（ステーブ）で構成されている。INTT ラダー上のシリコンセンサーと読み出しチップ、基板は電氣的に左右に分かれており、センサーで測定したデータは左右独立に読み出している。この独立した半分部をハーフラダーと呼び、2 つのハーフラダーで構成される INTT ラダーをフルラダーと呼ぶ。図 2.4 がハーフラダー、図 2.5 がフルラダーを撮影した写真である。ステーブには、ラダーを支えることの他に、測定邪魔になら

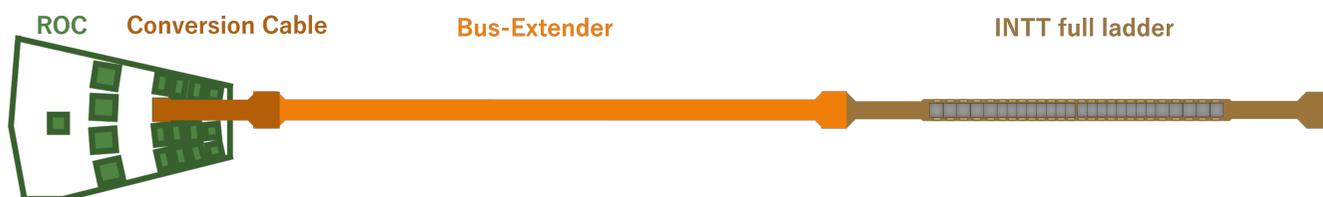


図 2.3 INTT ラダー

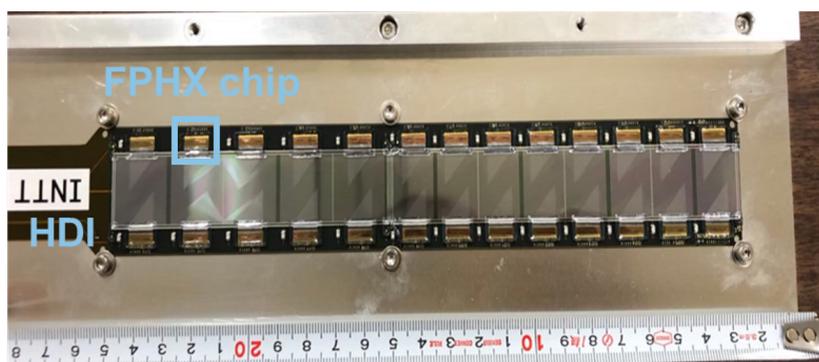


図 2.4 INTT ハーフラダー



図 2.5 INTT フルラダー

ないようにできるだけ物質量を減らすこと、熱を発散させることが求められる。これらを実現するため、高熱伝導グラファイトシートを用いたカーボンファイバー強化プラスチック（CFRP）を用いている。ステープの裏面には、ラダーを冷却するために、CFRP 製パイプが取り付けられている。

2.2.2 シリコンセンサー

シリコンにホウ素を少量加えると電子が足りない状態になる。この抜けた穴を正孔と呼び、電子が陽極方向にある正孔へ移動することで、正孔が陰極方向へ移動しているように見える。これが p 型半導体である。一方で、シリコンにリンを少量加えると電子が余る状態になり、この自由電子によって電流が流れる。これが n 型半導体である。これらを金属接合 (pn 接合) すると、接合部分で n 型半導体の電子が p 型半導体へ移動し、電子正孔対の再結合が起こる。この時接合部に生じる、キャリアの存在しない電場勾配を空乏層と呼ぶ。空乏層に逆バイアス電圧をかけることで、図 2.6 のように正孔と電子がお互いから遠ざかる方向へ移動し空乏層が広がる。ここに荷電粒子が通過すると、落としたエネルギーに比例して電離作用による電子正孔対が生成される。1つの電子正孔対を作るのに必要なエネルギーは約 3.62 eV である。発生した電子は陽極へ、正孔は陰極へと移動し正孔は電気信号として現れる。これを利用した検出器がシリコン検出器である。図 2.7 は INTT ラダーのシリコンセンサーの概略図である。図の右側に読み出し回路が

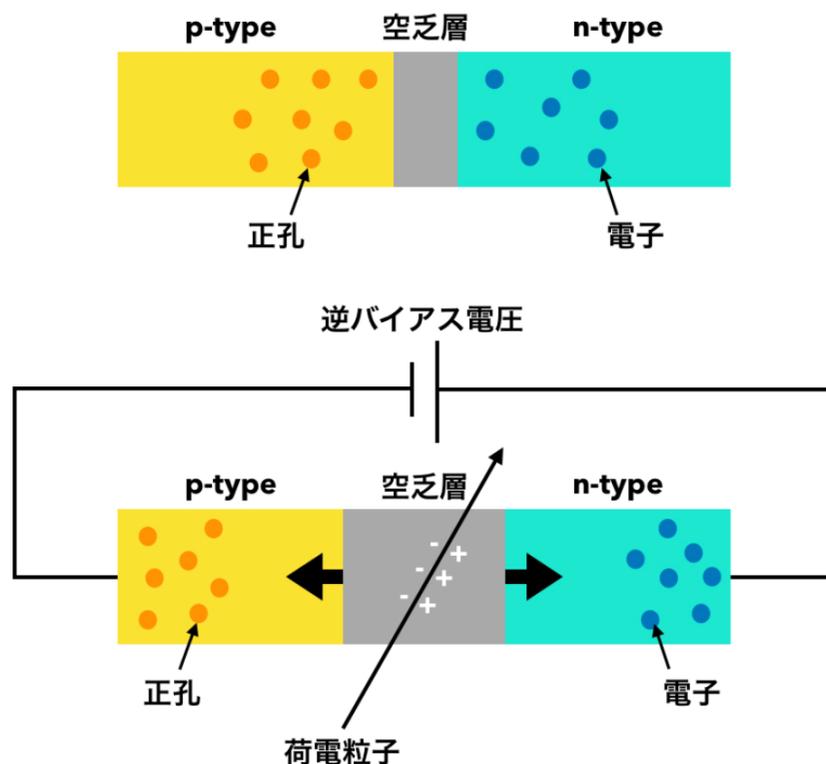


図 2.6 pn 接合

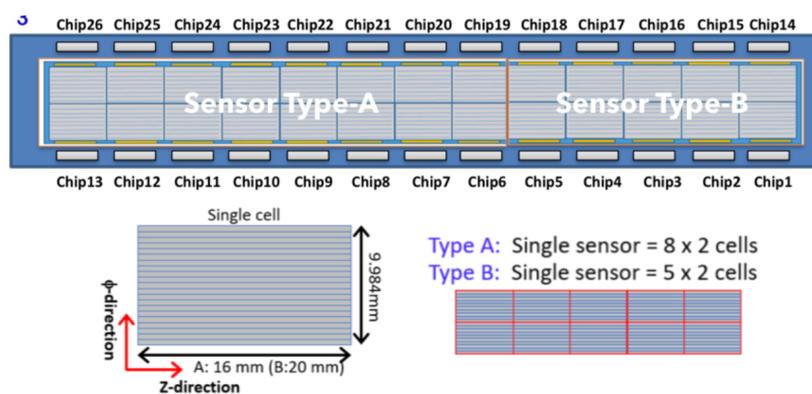


図 2.7 シリコンセンサー

続く。INTT ラダー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 2.7 のように構成されている。1 モジュールあたり 2 列にそれぞれ 13 セルずつ存在する。1 セルあたり 128 本ストリップが並んで 9.984 mm であり、1 ストリップ幅は 78 μm である。1 ハーフラダーあたり、 $2_{(column)} \times 13_{(cell)} \times 128_{(strip)} = 3328$ (本) のストリップがある。13 対のセルのうち、ストリップ長の異なる 2 種類のセンサーがあり、図 2.7 より左側 8 対が 16 mm \times 9.984 mm (Type-A) と、右側 5 対が 20 mm \times 9.984 mm (Type-B) である。Type-A (8 pair) と Type-B (5 pair) はそれぞれ 1 つのセンサーであり、異なる配線により逆バイアス電圧が供給されている。

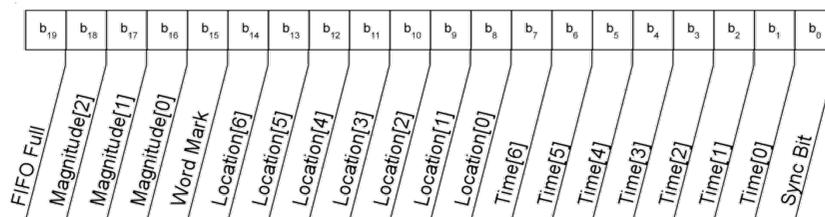


図 2.8 チップから出力されるデジタルデータ構成

2.2.3 FPHX チップ

シリコンセンサーからの信号パルスは、センサーのすぐ横に置かれた読み出しチップで処理され、デジタル信号に変換される。このチップを FPHX チップと呼んでいる。FPHX チップは、以前の PHENIX-FVTX (Forward silicon VerTeX detector) で使用されており、動作実績がある。INTT では、1 モジュールあたり 26 チップ搭載されており、各セルに含まれる 128 本のストリップのデータを読み出す。HDI より電力が供給される。チップ 1～13、14～26 がそれぞれ同じ供給配線に繋がっている。各チャンネルにおいて波形形成を行い、3 bit の ADC を出力する。可変閾値型の 3 bit ADC の 8 段階の閾値は、それぞれ 8 bit DAC で設定することができる。これにより 3 bit という少ない情報でも、粒子のエネルギー損失の情報を有効に使うことができる。入出力は LVDS 信号で行われ、通信速度は入力 10 Mbps、出力が 200 Mbps である。入力信号を用いて、LVDS 電流量や ADC 閾値など、チップ設定を変更することができる。図 2.8 は 1 チップから出力される 20 bit のデジタルのデータ構成であり、1 つのデータには ADC や位置・時間情報が含まれる。

2.2.4 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行う基板である。FPC (Flexible Printed Circuits) と呼ばれる柔軟性の高い薄いフィルム基板で作られている。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。

2.3 Bus-Extender

2.3.1 長尺 FPC

INTT で測定した大量の生データは、1.3 m 離れた ROC でデジタル処理され、より後段の処理回路に送られる。INTT と読み出し回路をつなぐケーブルには、1 m 以上の長尺、3.5 cm の幅に 130 μm の信号線路を 62 ペア均一に配置する高密度、場所を撮らずに狭い空間に一部曲線を描きながら設置することができる柔軟さが求められる。しかしながら、これらの条件の満たす伝送媒体は市販品では存在しないため、多層フレキシブルプリント基板 (FPC) 技術を応用し、INTT の要求を満たす特別ケーブルを開発した。このケーブルを Bus-Extender と呼ぶ。フレキシブル基板の誘電体として、ポリイミド (PI) を用いることが最も一般的であるが、PI フィルムに銅箔をラミネートしたサブストレート (Flexible Copper Clad Lamination: FCCL) は 50 μm 厚のものしか流通しておらず、製造上の制限内で無理なく伝送線路を構成することが困難である。一方、液晶ポリマー (LCP) は PI よりも誘電正接に勝り、ま

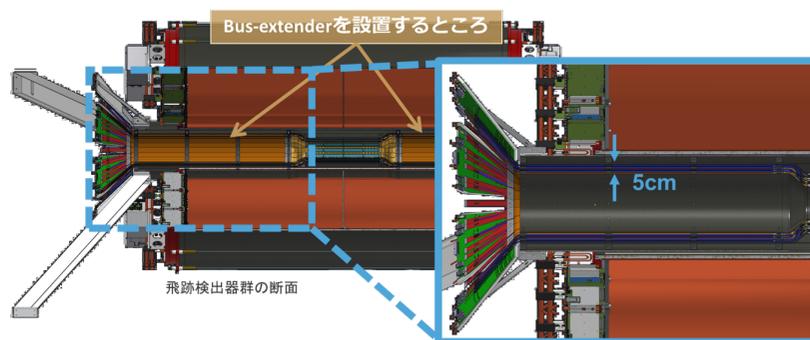


図 2.9 検出器群中の Bus-Extender の設置位置



長尺ケーブル

図 2.10 Bus-Extender ケーブル

た 100 μm 厚までの FCCL の流通が確認されている。この 100 μm 厚の LCP-FCCL を用いることにより、伝送による信号の減衰を抑制でき、さらに製造上の課題を解決した。そのため、Bus-Extender のサブストレートには液晶ポリマー (LCP) が採用されている。図 2.9 は Bus-Extender を実際に INTT ラダーに接続したときの設置位置を示した図である。

図 2.10 は Bus-Extender ケーブルの全長を撮影した写真である。現在、実機に接続する最新版の Bus-Extender の開発は完了しており、量産を進めているところである。

図 2.11 は Bus-Extender の層構造を図示している。Bus-Extender は信号配線層、電源層、アナロググランド層、デジタルグランド層で構成されている。3つの FCCL を接着するための接着剤が図 2.11 中に含まれている。

2.4 読出し回路

2.4.1 ROC(Read Out Card)

図 2.12 は読み出し回路の内、いちばん INTT ラダーに近い ROC (Read Out Card) と呼ばれる回路を撮影した写真である。これは、PHENIX で実際に稼働していた実績があり、接続パーツのアップデートなどを行い sPHENIX でも使用する。4種類の読出しポートがあり、図下から A、B、C、D の順である。4種類の読出しポートはそれぞれ4つの INTT ラダーと接続用のポートを持っており、最大16本の INTT ハーフラダーを接続することができる。それらのラダーから生じるデータを受信し、データの整形や順番の整理などのデジタル信号処理をしたのち、高速光

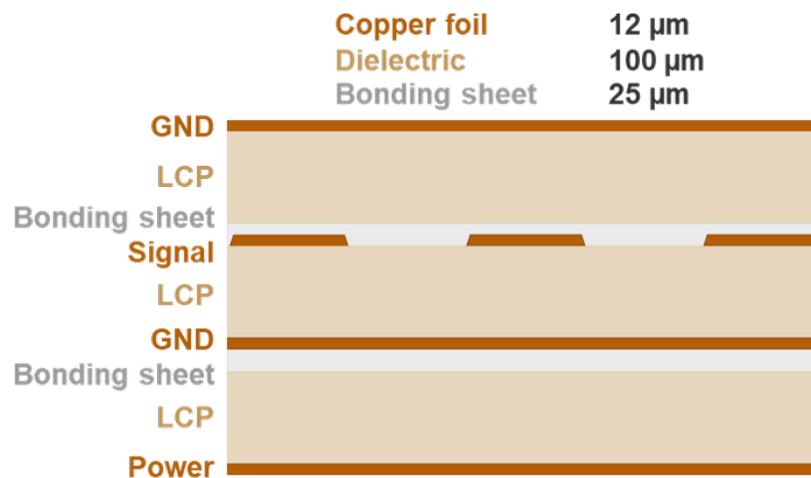


図 2.11 Bus-Extender ケーブルの層構造

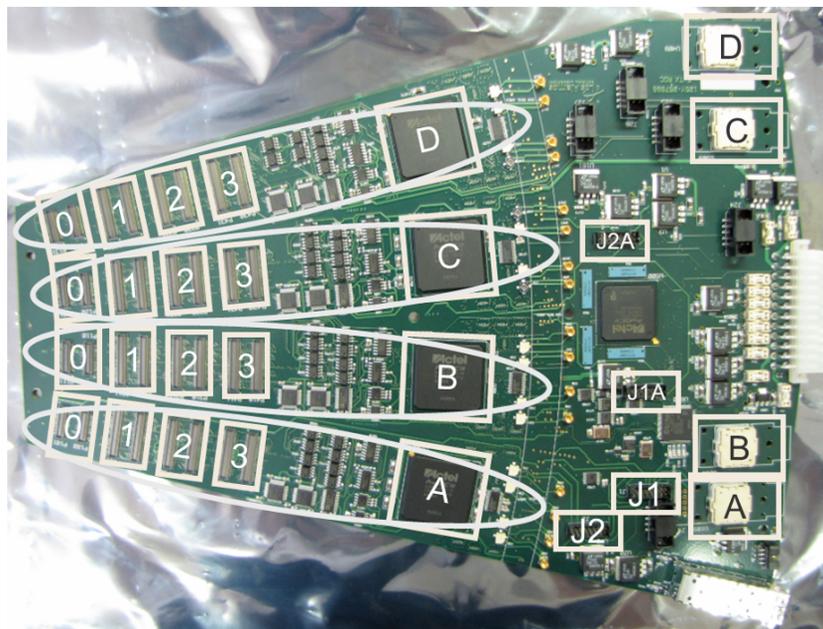


図 2.12 ROC

信号として、後段の FEM に送信する。実装時はこのうち 4 つの接続用ポートのうち 1 と 3 を主に使用する計画である。

また、ROC にはアナログパルスを生成する機能があり、キャリブレーションテストを行う際は ROC から INTT へテストパルスを送信する。

2.4.2 FEM(Front End Module) と FEM-IB(FEM Interface Board)

図 2.13 に示す 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したがって並び替え、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へ送られ

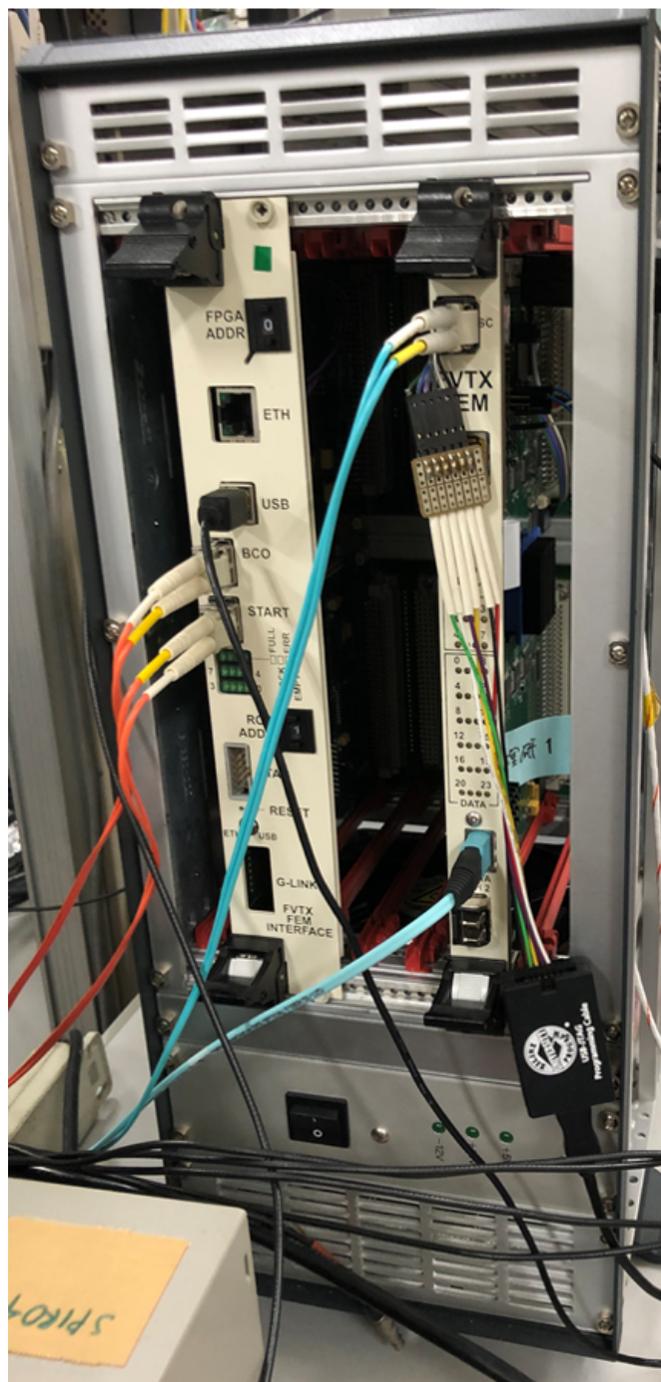


図 2.13 FEM (右) と FEM-IB (左)

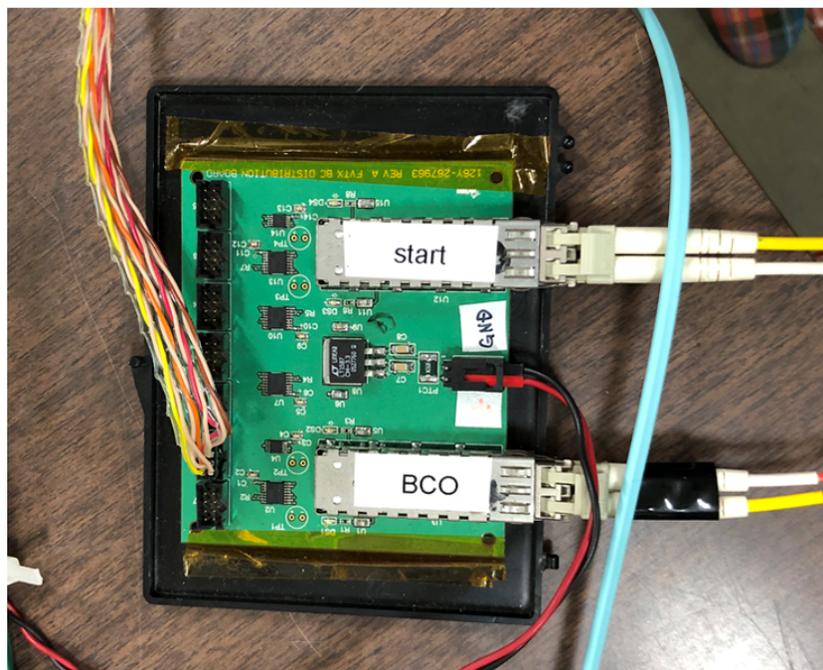


図 2.14 Beam Clock Distribution Board

る。FEM 1 枚で ROC の出力の半分を担っているため、ROC 1 枚の全出力を処理するためには FEM が 2 枚必要である。また、FEM 基板上には 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。FEM-IB は 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 INTT のシリコンセンサーに転送する制御信号を受け取り、FEM に供給する。

2.4.3 Beam Clock Distribution Board

INTT のデータ読み出しシステムは、単一クロックによる同期式駆動系を構成している。sPHENIX 実験運用時は、単一クロックとして RHIC 加速器の動作クロック (9.4 MHz) を使用する。テストベンチでは、これに代わり、同じ速度のクロックを FEM-IB で生成し、使用している。図 2.14 に示すビームクロックボードでは、FEM-IB から送信されるビームクロックを光から電気信号に変換して ROC や INTT へと送信している。

第3章

Bus-Extender 使用によるキャリブレーションテストの評価

奈良女子大学や理化学研究所、台湾の NCU (National Central University)、BNL にテストベンチを構築し、2018 年から INTT ラダーの性能評価や読み出しシステムの動作確認を行ってきた。主に、テストパルスを用いて測定を行った。今回は Bus-Extender を取り付けたことによるノイズの評価を行う。これは、実験中の INTT の動作状況をモニターするために、Bus-Extender 使用によるキャリブレーションテストの影響を調べるためである。ノイズ評価として、ノイズ量の測定、スロープとオフセットの推定、そして大量測定によるばらつきを測定した。

3.1 INTT 用テストベンチの構成

図 3.1 は実際のセットアップを撮影した写真である。テストベンチの構成として、INTT ラダー、Bus-Extender、読み出し回路、PC がある。読み出し回路には ROC、FEM、FEM-IB がある。図 3.2 に示すように、テストパルスを使った測定では、ROC でテストパルスを生成し、INTT ラダーでデジタル信号に変換した信号は、後段の読み出し

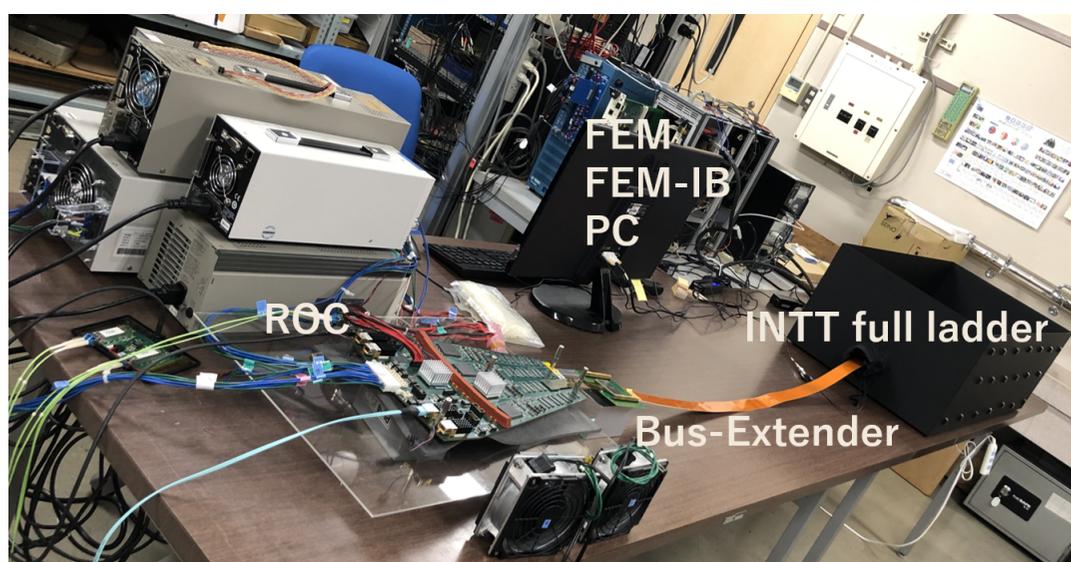


図 3.1 奈良女子大学のテストベンチ

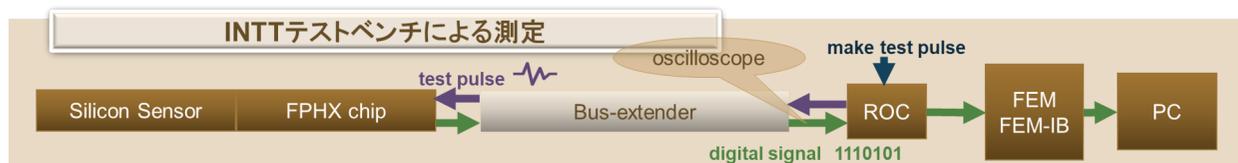


図 3.2 テストベンチの概略図

回路へと送られ、PC へと送られる。上段が Bus-Extender を使用する前で下段が使用しているセットアップである。ノイズ評価では、この2つの測定を比較することで、Bus-Extender によるデータ伝送性能へのノイズの影響を調べることができる。

3.2 INTT ラダーの動作確認

3.2.1 キャリブレーションテスト

テストパルスを用いて FPHX チップの反応を観測し、INTT の読出しシステムの確認を行う。このテストのことをキャリブレーションテストと呼ぶ。INTT 用シリコンセンサーの全 3328 チャンネルへ 64 段階の波高を 10 回ずつ入力している。ROC で生成したテストパルスは FPHX チップへ送られる。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 を通過して PC で保存される。入力したパルス数や波高と、FPHX で測定したデータ数や ADC 値の相関を見ることで、FPHX チップのノイズ量や ADC 分解能などを調べることができる。表 3.1 はキャリブレーションテストで設定している 3 bit ADC の各値

表 3.1 キャリブレーションテストにおける DAC 閾値

ADC number	DAC threshold	signal height[mV]
ADC 0	20	290
ADC 1	25	310
ADC 2	30	330
ADC 3	35	350
ADC 4	40	370
ADC 5	45	390
ADC 6	50	410
ADC 7	55	430

である。

$$[\text{mV}] = \text{DAC} \times 4 + 210 \quad (3.1)$$

各閾値は 8 bit DAC で設定でき、それぞれ信号波高を分別する閾値電圧には式 3.1 で変換できる。

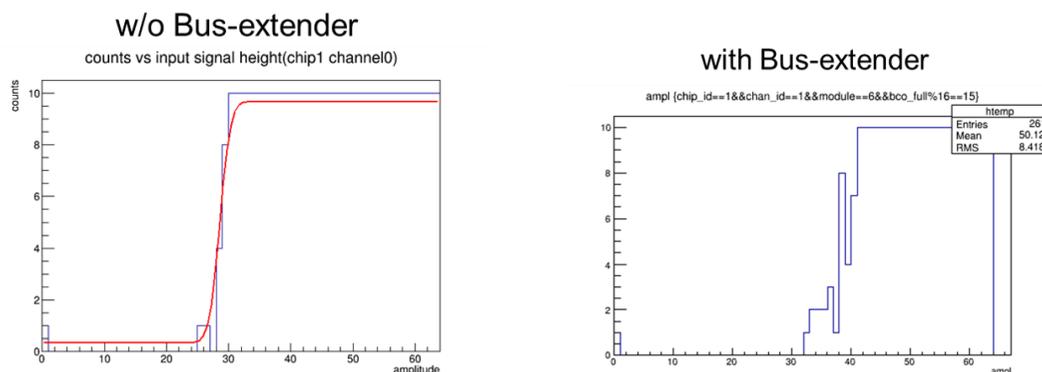


図 3.3 入力パルスの波高と測定の相関分布。Bus-Extender を使用する前（左）と後（右）の比較

3.3 データ解析

3.3.1 ノイズ評価

キャリブレーションテストのデータを用いて、INTT のデータに含まれるノイズを評価する。ノイズの評価方法は以下の通りである。まず、テストパルスの波高（amplitude）と出力データ数の相関を測定する。パルス波高が閾値より低い場合、INTT は応答せず測定データは生じないが、波高が閾値より高くなると、測定データが生じる。キャリブレーションテストでは、波高あたりテストパルスを 10 回入力し、その応答回数を測定している。そのため、波高が閾値以下では応答は 0 であり、閾値以上では 10 回となる。図 3.3 はチャンネル 1 つ分の波高と測定の相関を示している。閾値付近では、ノイズの影響を受け応答回数がなだらかに 0 から 10 回に推移する。この推移の中央部分が閾値を示している。また、なだらかさはノイズにより閾値が由来だ結果であるため、このなだらかさ（振れ幅）からノイズ量を評価できる。

図 3.3（左）は Bus-Extender を使用する前の入力パルスの波高ごとの応答回数の分布であり、図 3.3（右）は Bus-Extender を使用した後の分布である。分布を比較すると、Bus-Extender 使用前の分布は閾値が 30 amplitude 前後であるのに対し、使用後の分布は 40 amplitude であることがわかる。つまり、Bus-Extender 使用によって 10 amplitude 程度閾値が高くなったことで、チャンネル 1 つ分あたりの出力データ数が 100 個程度減少してしまうことになる。これは、長尺のケーブルを使うことによる信号の減衰が原因であると考えた。

INTT 用読み出しシステムでは LVDS の電流量を 1~8 mA で 1 mA 間隔で設定できる。LVDS の終端抵抗が 100 Ω なので、電流量を 1 mA 変えることで理論上信号波高を 200 mV 変えることができる。これまでキャリブレーションテストは LVDS を 2 mA に設定して行ってきたが、電流量を増やすことで出力データ数が変化するかを調べるために、LVDS の電流量を 2 mA から 8 mA まで変えながら測定を行った。定量的に評価するため、Fit 関数を用いて閾値と閾値の振れ幅を求める。図 3.4 は、図 3.3 からの閾値とその振れ幅を求めるための Fit 関数である。この関数の p1 を閾値、p2 を閾値の振れ幅として評価する。図 3.5 はチップごとの閾値のグラフを電流量ごとに示したグラフである。図 3.5（左）は Bus-Extender を使っていない測定で、図 3.6（右）は Bus-Extender を使った測定の結果を示す。それぞれの分布がチップが 1 から 26 になるにつれて閾値の値が高くなっている。また、どちらの分布も 13 と 14 チップの間で高くなっていた閾値が一度大幅に低くなっている。これは、読み出し回路との距離が関係していると考えた。チップ 1 と 14 が読み出し回路に最も近く、13 と 26 が最も遠い位置に配置されている。しかしなが

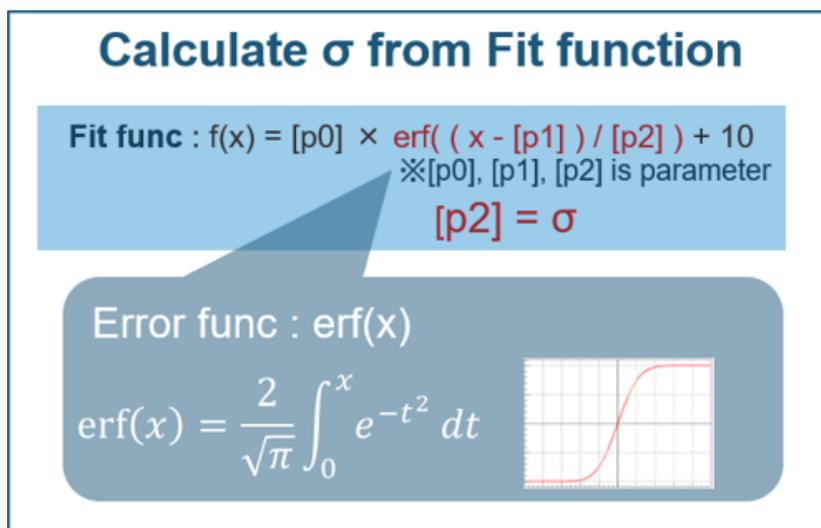


図 3.4 ノイズ評価を行うための Fit 関数

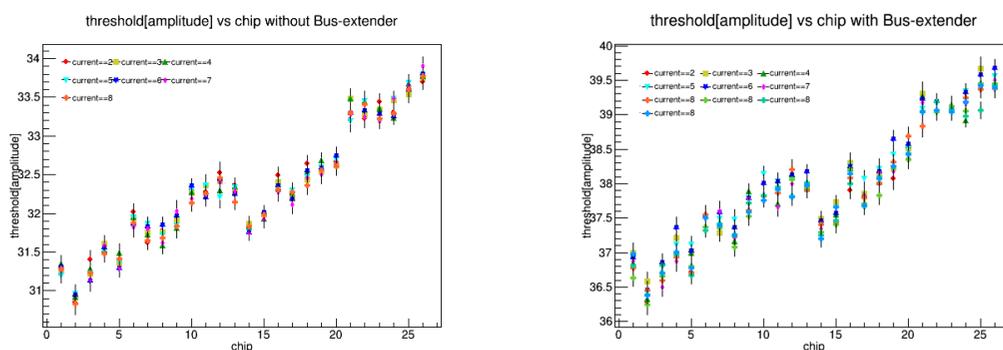


図 3.5 Bus-Extender を使っていないとき（左）と使ったとき（右）のチップごとのノイズによる閾値

ら、これまでチップの設置位置による信号伝送距離はほとんど差がないと考えられていたが、今回の結果から、読み出し回路に近いチップ 1 と遠いチップ 26 では 3.5 amplitude の差があることがわかった。チップ 1 と 14 で差があるが、チップの設置位置は 1 と 14 が対になっているため、近い値が得られるはずである。チップ 1 ～ 13 に対して 14 ～ 26 の閾値が同程度高いため、電源供給の配線や設置に違いがある可能性がある。

さらに、Bus-Extender を使うことで全てのチップの閾値の値が 5.5 amplitude 程度高くなった。これは伝送距離が長くなったことで信号が 5.5 amplitude 程度減衰している。この結果から、次項の 3.3.3 では閾値を越えて十分にヒットがある 54～63 amplitude のヒット数について評価を行う。

電流量による閾値の違いは Bus-Extender を使う前と後で特に見られなかった。

図 3.6（左）は電流量を変えて行った Bus-Extender を使っていない測定で、図 3.6（右）は Bus-Extender を使った測定のチップごとの閾値の振れ幅のグラフである。どちらの分布も、閾値と異なりチップと読み出し回路との距離による依存性は見られず、Bus-Extender を使用する前はほとんどのチップの振れ幅が 3.8～4.4 amplitude 程度で安定しており、使用した後は 4.6～5.4 amplitude 程度で安定している。これは、Bus-Extender の使用によって閾値の分布同様に振れ幅の値も全体的に値が大きくなっていることを示している。しかし、振れ幅の違いは 1 amplitude 程度であり、チップごとのばらつきと同程度の違いである。また、Bus-Extender を使用した測定の分布では一部 5.5～

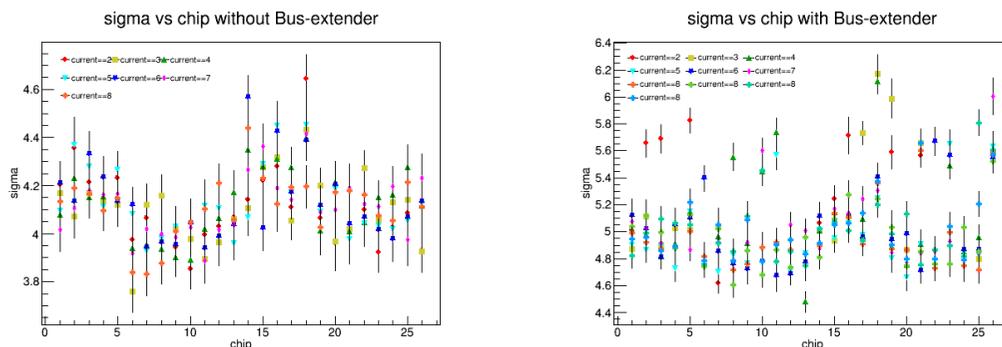


図 3.6 Bus-Extender を使っていないとき (左) と使ったとき (右) のチップごとのノイズによる閾値のズレ幅

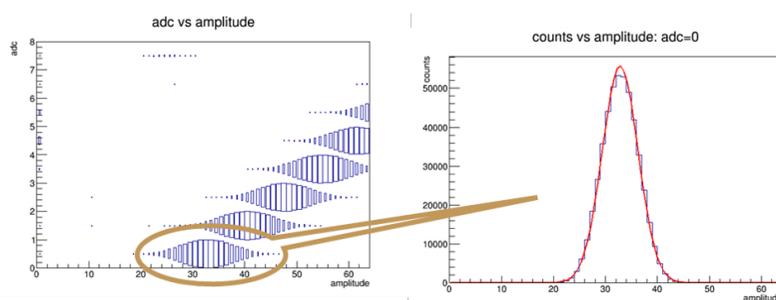


図 3.7 ADC と入力パルスの相関関係を示す分布

6.2 amplitude 程度のチップがあるが、これは電流量が 2~5 mA の測定が多くあり、信号の減衰が大きいためであると考えられる。これについては 4.4.1 で詳しく述べる。これらの結果から、Bus-Extender 使用による INTT のデータ読出し性能への影響は大きくないことがわかった。

3.3.2 ADC と入力パルスのオフセットとスロープの推定

オフセットとは、信号がない時の入力パルスが 0 V 程度にならないように、あらかじめ持たせている値のことである。これは、実際のパルスが常に 0 V ではなく、0 V を中心に正規分布の統計的にばらつくことでパルスが負の値になることを避けるために設定されている。

ADC は出力信号の波高を示すパラメータであり、入力パルスとは正の相関関係を期待する。これは、INTT に設定した DAC 閾値のパラメータの値が一様であることを示す。この相関関係を直線で近似したときの傾きがスロープである。

オフセットとスロープを調べることで、FPHX チップがもつチャンネル間の DAC 閾値のばらつきを求めることができる。図 3.7 はキャリブレーションテストで測定した ADC と入力パルスの相関関係を示す分布 (左) と、ADC=0 の時の入力パルスの分布 (右) である。図 3.7 (左) より、期待通り ADC と入力パルスに正の相関関係があることがわかる。ADC と入力パルスの関係式を求めるために、ADC に対して相関のある入力パルスの値を一意に定める必要がある。図 3.8 は、図 3.7 より全ての ADC で対応する入力パルスを一意に定め、一次関数で近似したグラフである。この式からオフセットとスロープを得る。また、ADC を対応する DAC の閾値として変換した値との相関を示している。ADC に対応する入力パルスの値を求めるとき、図 3.7 (右) に分布にガウス分布を Fit してその中央値を採用する方法と、ヒット数を重みとした平均値を採用する方法があった。図 3.9 (左) は前者の方法でスロープを求

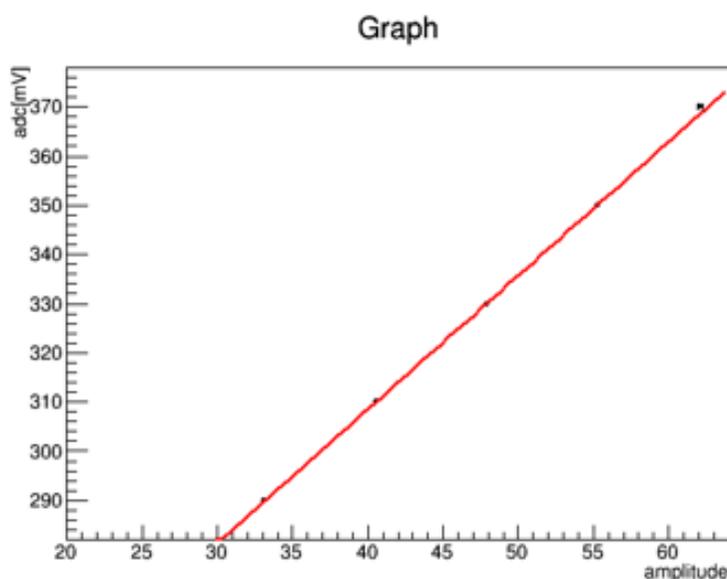


図 3.8 信号波高に変換した DAC 閾値と入力パルスのグラフ

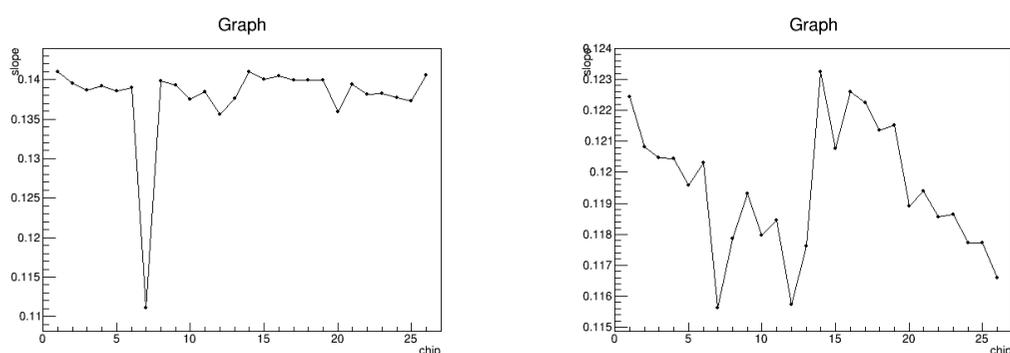


図 3.9 対応する値をガウス分布で Fit して得た中央値からスロープを求めた場合（左）とヒット数を重みとした平均値からスロープを求めた場合（右）のチップごとのグラフ

め、図 3.9（右）は後者の方法でスロープをチップごとに求めたグラフである。図 3.9 の分布はどちらも縦軸がスロープ $\text{adc}/\text{amplitude}$ 、横軸がチップである。今回はノイズによるばらつきを評価するため、前者の方法を採用することにした。図 3.8 は前者の方法で求めたグラフである。

図 3.10 は全 3 3 2 8 チャンネルで求めたそれぞれスロープ（左）とオフセット（右）の分布である。これらの分布をガウス分布で Fit すると、スロープは $2.5 \pm 0.2 \text{ mV}/\text{amplitude}$ 、オフセットは $194 \pm 8 \text{ mV}$ であった。これらの結果からオフセットのチャンネル間のばらつきは 0.04 % 程度であるため、ノイズによるオフセットのずれが及ぼすデータ読出し性能への影響がないことがわかった。

3.3.3 大量測定によるばらつきの評価

大量測定とは、キャリブレーションテストを 1 0 0 回程度繰り返し行うことで、INTT の読出し安定性を調べることができる。この測定では、測定ごとに閾値を十分に越えたときの受信数を求めることで、読出し性能の安定性を評価した。安定性を評価することで、常に受けるノイズの影響を知ることができる。この測定は、理化学研究所のテス

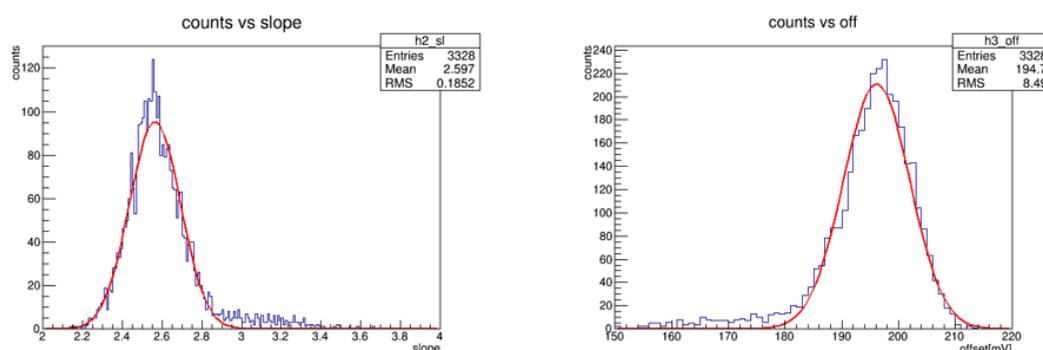


図 3.10 全てのチャンネルで求めた傾き（左）と切片（右）のヒストグラム

トベンチで行っており、奈良女子大学のテストベンチでも同様の測定を行った。これは、テストベンチによって読出し性能の安定性に違いがあるかを評価するためである。理化学研究所では、測定に使う INTT ラダーや ROC、ROC ポート、変換ケーブルや Bus-Extender の種類を変えた測定を行っており、それぞれで LVDS の電流量を変えた測定も行っている。表 3.2 は理化学研究所で行った測定の変更条件についての表である。理化学研究所では、前実験で

表 3.2 理化学研究所の測定表

測定番号	INTT ラダー	ROC	ROC ポート	変換ケーブル	Bus-Extender
0	FVTX	NW1	C3	l3	without
1	PPB2-L4S	7	C2	l3	prepro3
2	PPB2-L4S	NE2	A1	s8	prepro3
3	PPB2-L4S	NE2	A2	s8	without
4	PPB2-L4S	NE2	A2	l3	prepro3
5	PPB2-L4S	NE2	A2	s8	without
6	PPB2-L4S	NE2	A2	s8	prepro3
7	PPB2-L4S	NE2	C1	s8	prepro3
8	PPB2-L4S	NE2	C1	s8	without
9	PPB2-L4S	NE2	C1	s8	prepro3
10	PPB2-L4S	NW1	A2	s8	without
11	PPB2-L4S	NW1	C3	s8	without
12	PPB2-L4S	NW1	C3	s8	prepro4
13	PPB2-L4S	SW5	A2	s8	prepro3
14	PPB2-L4S	SW5	C3	s8	without
15	PPB2-L4S	SW5	C3	NCUs1	prepro3

使用した FVTX と INTT ラダーとの比較、Bus-Extender 使用による変化があるかどうか、変換ケーブルの長さが変わることによる影響があるかどうか、そして ROC、ROC ポート、Bus-Extender の個体差があるかどうかを調べるために、これらの測定を行った。

1 チップあたり 128 チャンネル持つがそのうちチャンネル 0 を除いた 1 ~ 127 の受信数を調べた。入力パルス

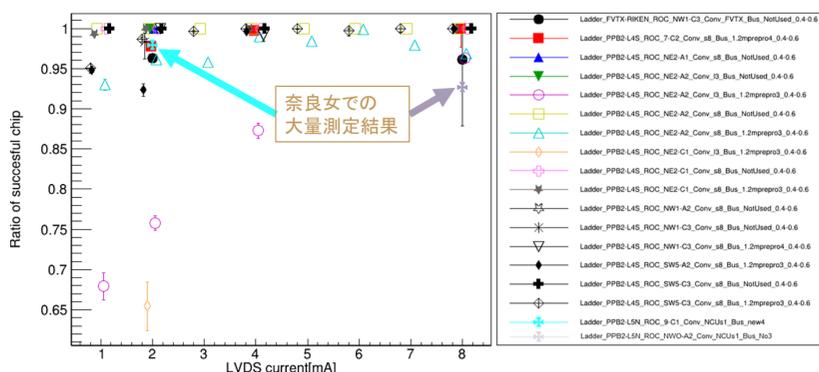


図 3.11 各電流量に対するキャリブレーションテストの成功率

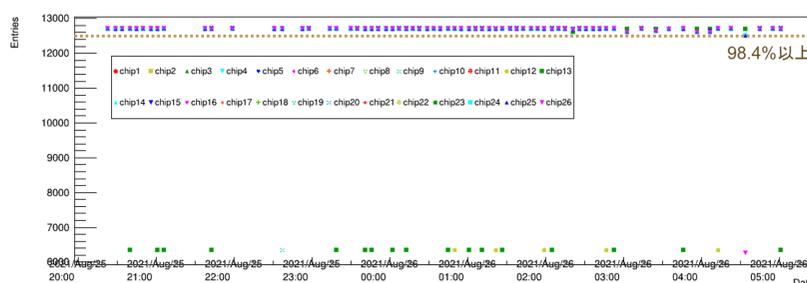


図 3.12 2 mA に設定した測定ごとのキャリブレーションテストの成功率

の波高は 0~63 amplitude であるが、そのうち十分に閾値を越えて安定した後の 54~63 amplitude の受信数を計算して評価を行った。測定は 100 回程度行った。期待値は $127(\text{chip}) \times 10(\text{amplitude}) \times 10(\text{times}) = 12700$ である。期待値に対する成功受信数の基準は、測定回数分の 26 チップ分のデータのうち $12700 \times 0.9 < \text{success} < 12700 \times 1.1$ の範囲内の受信数のチップである。

図 3.11 は、理化学研究所の測定結果に今回の奈良女子大学での測定結果を追加したグラフである。ほとんどの測定でどの電流量でも 90% 以上の安定性があることがわかった。一方、変換ケーブルが長い I3 と Bus-Extender を使って測定した結果では 2 mA の時に 68% 程度の結果になった。これは、最も信号伝送距離が長い組み合わせを示しており、信号の減衰率が最も大きい測定にあたる。この測定では電流量を変えると安定性が上がっていき、8 mA で測定した場合は他の測定と同様に 90% を越える結果を得ることができているとわかった。

次に、図 3.11 の最後に示す水色と紫色の測定点についてである。これは、奈良女子大学で測定した結果を示しており、水色の点は $97.9^{+0.3}_{-0.4}$ %、紫色の点は 92.5 ± 0.5 % という値を得た。図 3.11 にも示すように理化学研究所で行った他の測定の結果と同程度の結果である。つまり、テストベンチが変わっても読出しシステムは同様の安定性を示すことがわかった。

図 3.12 に示す通り測定ごとでの全 26 チップの成功率をそれぞれ評価した。いくつかのチップでハーフエントリー問題（付録：A.4）が見られるが、ほとんどのチップで 98.4% 以上の成功率を安定して出している。

これらの結果より、奈良女子大学のテストベンチ環境下でもチップは十分に安定したパフォーマンスができるとわかった。

第4章

Bus-Extender の性能評価

sPHENIX の実験期間中、安定して稼働する必要がある。Bus-Extender は、新素材液晶ポリマーを使用した、長尺の多層 FPC であり、曲げ強度や接着強度など、物理特性を調べておく必要がある。また、Bus-Extender は放射線環境下で使用されるため、少なくとも 5 kGy 以上の放射線耐性も求められる。放射線耐性を調べるため、高崎量子応用研究所で ^{60}Co 線源を用いて Bus-Extender の試験片にガンマ線照射を行った。放射線照射量ごとの物理特性の変化から劣化度合いを比較する。本研究では、放射線照射を行う前のサンプルと 5 kGy 照射したサンプルを比較した。放射線照射による劣化度合いを評価するため、試験片を U 字に曲げる応力測定、基板の接着層の剥離強度の測定を行った。

また、Bus-Extender は 1.11 m 長の長尺であるため、Bus-Extender を通る信号は元の出力波形に対して波高が 30 % 程度減衰することがわかった。これは、Bus-Extender 単体の性能評価を行った結果である。本研究では、実機につないだ場合の伝送性能を調べるために、奈良女子大学と理化学研究所で構築した INTT 用データ収集システムを用いて出力波形の観測を行った。

4.1 物理特性の測定

4.1.1 曲げ試験

物体（固体）に力を加えると、変形が小さいうちは、力がなくなると元に戻る。この性質を弾性と呼び、この範囲の変形を弾性変形と呼ぶ。物体には、その種類によって弾性変形が大きい柔らかいものや、小さい硬いものがあり、この硬さの指標となる量がヤング率である。曲げ試験は、一様な試験片に弾性変形の範囲で曲げようとする力を加え、その曲げ荷重と曲げる距離を測定し、試験片のヤング率を求める。今回、Bus-Extender が実機に接続する際に、狭い領域で一部曲線を描きながら設置するために必要な柔軟性を持っていることを確かめるために曲げ試験を行った。

4.1.2 剥離試験

Bus-Extender は長期の加速器実験に使用されるため、大量の放射線を浴びる環境に設置される。放射線照射による劣化で接着層が剥がれるとデータ伝送率に大きな悪影響を及ぼすことが予想される。そのため、放射線照射を行ったサンプルを用いて、試験片の接着強度を測定するために、万能試験機による剥離試験を行った。あらかじめ接着層につかみしろを用意した試験片の端を万能試験機の上下にそれぞれ挟み、一定の速度で 90 度に剥がしたときに要した力を測定した。

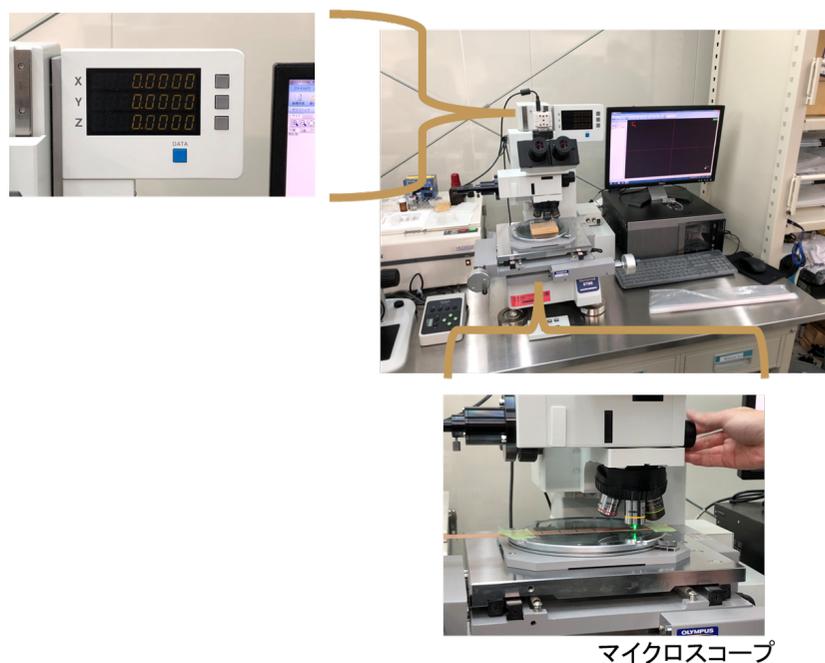


図 4.1 幅測定を行ったマイクروسコープ

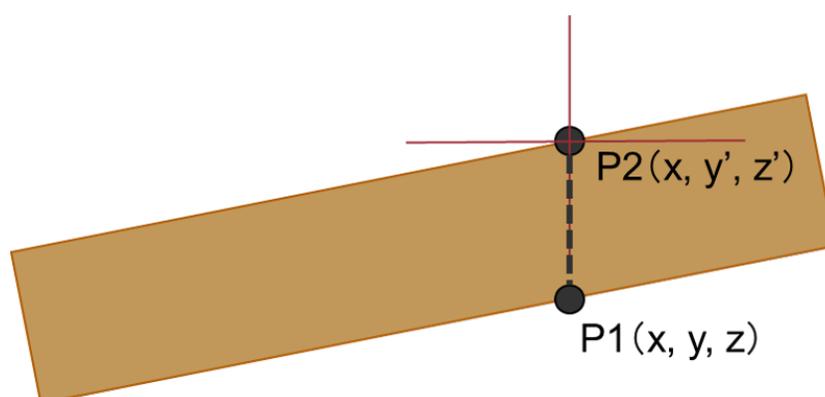


図 4.2 幅測定

4.2 物理特性の評価

4.2.1 幅測定

試験片の幅は 2 cm に切っているが、サンプルや場所によってばらつきがある。測定する物理特性である曲げ弾性率や引き剥がし強度は、試験片の幅の影響を受ける。幅のばらつきが物理特性の結果に影響を及ぼす程度かどうかを確認するために試験片の幅を測定した。図 4.1 は、試験片の幅の測定を行ったマイクروسコープを撮影した写真である。写真中の台に試験片を固定し、モニターで試験片の端を赤十字の中央に合わせ、ピントを調整することで三次元の座標を測定した。図 4.2 のように試験片の両端の座標を試験片 1 枚あたり 6 セット（計 12 点）測定した。両端は x 座標を固定した。点の間隔は 0.5 mm で、これは 2.5% 単位で精度を求めることができるためである。5 回分の幅

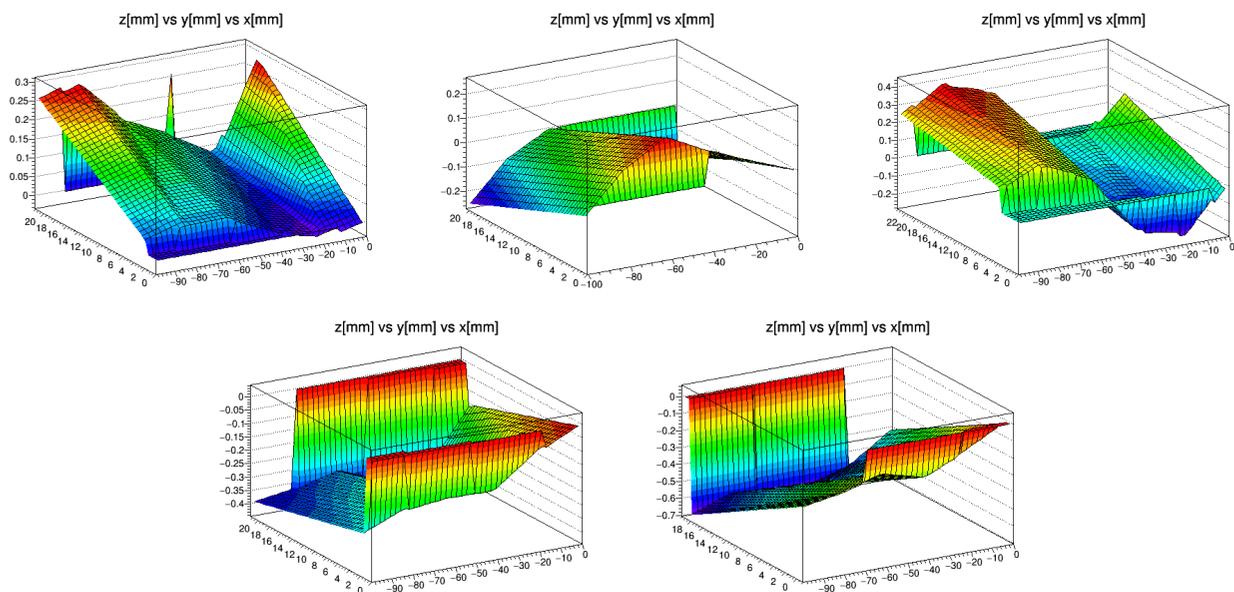


図 4.3 5 回分の幅測定の結果



図 4.4 万能試験機が試験片を押し曲げる様子

測定の結果を図 4.3 に示しており、求めた座標から 3 次元の分布にし、座標点から予想される平面を表している。分布から、三次元の座標を用いて幅の計算を行うことは困難であると考えた。そのため、簡単な計算として、 y 座標の値のみを使ってそれぞれの差を求めると、幅は 19.6 ± 0.2 mm であった。幅は誤差の範囲内では 2 cm にと一致しなかったが、0.4 mm 程度の差であったため、影響は 2 % 程度である。また、幅のばらつきは 1 % 程度であった。これらの結果から、幅のばらつきを考慮せずに物理特性を求めても、影響がない程度であることがわかった。

4.2.2 曲げ弾性率の測定

測定には万能試験機を使った。治具を取り替えることで、材料の引張試験・圧縮試験・曲げ試験・ねじり試験などの測定を機械 1 台で行うことができる。図 4.4 は万能試験機が試験片を押し曲げていく様子を撮影した写真である。図 4.5 は万能試験機で試験片を押し曲げた力に対する距離である。押した距離 250 mm 以降で、押した力に対して距離が反比例しているように見えたため、押した距離から試験片の曲率半径を計算し曲率を求めた。図 4.6 は試験片を万能試験機で押し曲げたときの力に対する曲がっている試験片の曲率である。縦軸は万能試験機が出力している試験片を押している力であり、横軸は試験片を押した距離から計算した曲率である。このプロットからは、曲率の 0.02 /mm 以降では押す力と曲率に正の相関があるように見える。

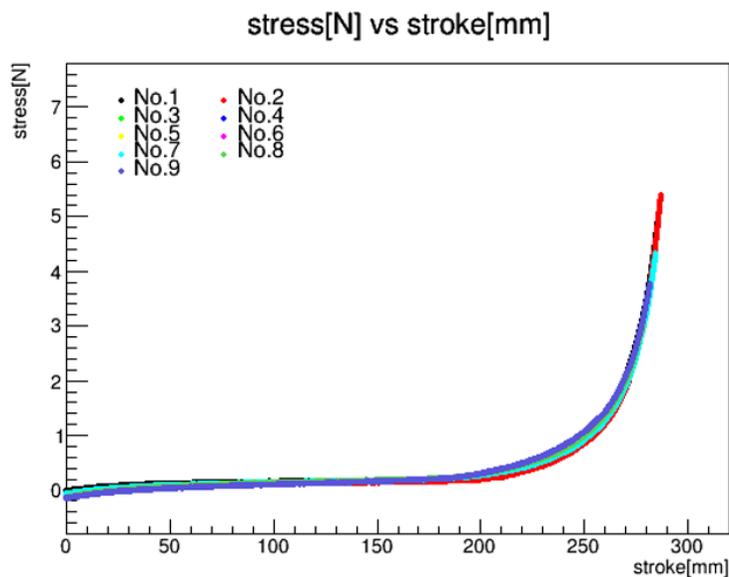


図 4.5 試験片を押しした力と距離

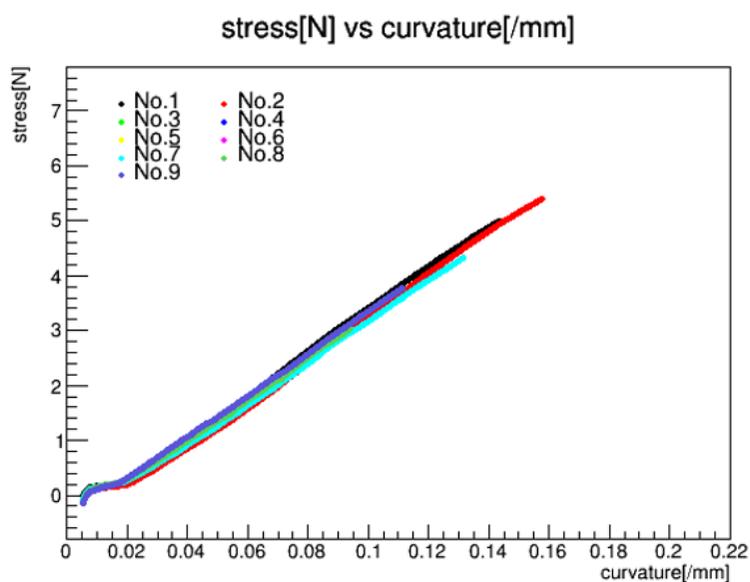


図 4.6 試験片を曲げる力に対する曲率

4.2.3 曲げ測定の議論

物質には弾性域と塑性域、破壊域が存在し、圧力をかけて形を変形させようとしても元に戻る領域が弾性域、それ以上に圧力をかけたことで変形してしまった領域が塑性域である。また、塑性域よりもさらに圧力をかけたことで、素材が壊れてしまう領域が破壊域である。弾性域では、曲げ剛性と曲率が相関が見られるが、塑性域では素材が変形しているため、試験片の正確な曲げ弾性率を求めることはできない。図 4.4 より、試験片を押し始めた段階（左）と、完全に U 字に押し曲げている段階（中央）、完全に折れてしまっている段階（右）があることがわかる。図 4.5 で正の

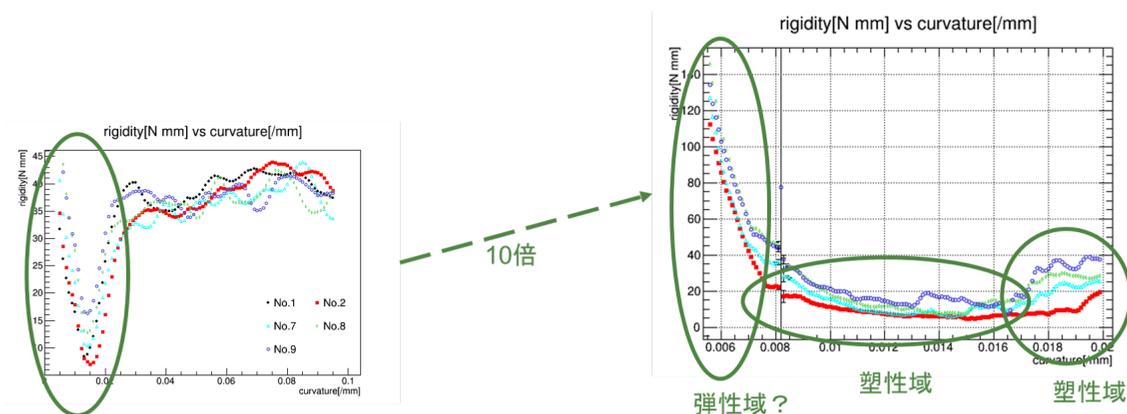


図 4.7 試験片を曲げたときの弾性域と塑性域

相関があるように見えていたのは U 字に押し曲げている段階であり、これが塑性域である可能性を考えた。そこで、試験片を押し始めた段階が弾性域であったと仮定し、曲率が 0.02 /mm 以下の曲げ剛性に対する曲率の値を詳しく確認した。図 4.7 は曲げ剛性に対する 0.02 /mm 以下の曲率のグラフである。図 4.7 からは、曲率が 0.008 /mm 以下の領域では曲げ剛性に対して曲率は負の相関があるように見えている。また、曲率 0.008 /mm 以降では低い曲げ剛性で安定し、0.016 /mm 以降から上昇していることがわかる。曲率と曲げ剛性の相関関係が途切れてしまっていることから、曲率が 0.008 /mm 以降は塑性域であると考えられる。また、弾性域であると仮定している 0.008 /mm 以下の領域が、本当に弾性域であるかを示すことができず、曲げ剛性が十分であると判断することが難しい。これらの結果から、曲げ測定は Bus-Extender の物理特性の評価方法としてふさわしくないと結論付けた。これにより、曲げ弾性率の測定が見直されることとなり、固有振動数による剛性評価を行った。[10]

4.2.4 引き剥がし強度の測定

図 4.8 は Bus-Extender の試験片の接着層を、万能試験機を使って引き剥がしているところを撮影した写真である。図 4.9 は剥離試験用に接着層の端をあらかじめ接着せずにつかみしろとしてあるサンプルを撮影した写真と図である。

剥離試験は、図 4.10 のように、上層の層 A を引き剥がす層として万能試験機に挟み、中層と下層の層 B、層 C を台に固定する方法と、中層の層 B のみを固定する方法、下層の層 C のみを固定する方法の計 3 パターンで実験を行った。図 4.1 は使用したサンプルの種類と枚数、引き剥がす方法を記した表である。今回は、放射線照射量の異なる

表 4.1 使用したサンプルと引き剥がす層のパターンの表

使用サンプル 種類	挟み方		
	挟み方番号	挟む枚数	挟む位置
放射線を照射していないサンプル × 5	1	2	層 B と層 C
放射線を 5 kGy 照射したサンプル × 5	2	1	層 B
接着重複サンプル × 3	3	1	層 C

るサンプル 2 種類と、長尺のため接着回数が 2 回になってしまう中央部分の計 3 種類のサンプルを使用した。図 4.11

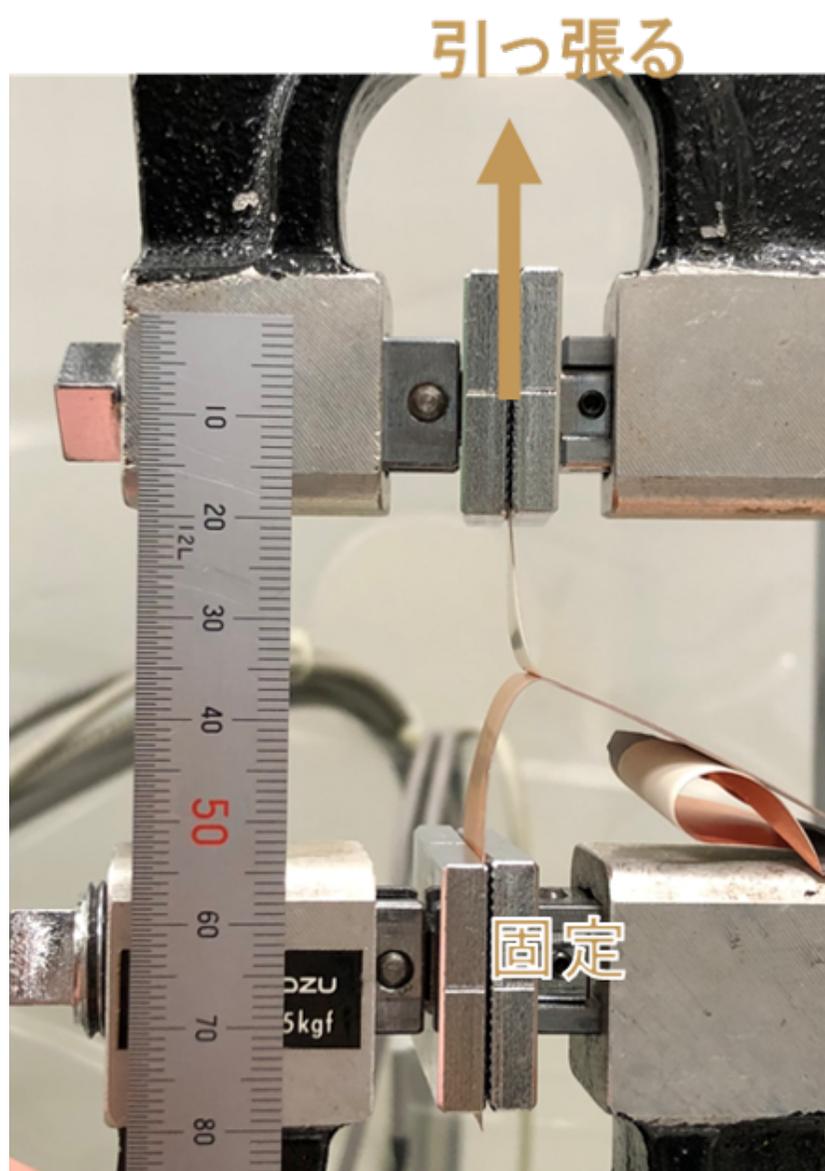


図 4.8 剥離試験

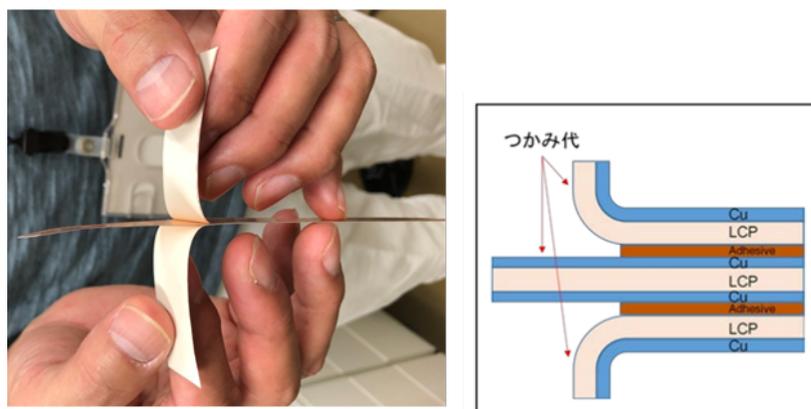


図 4.9 引き剥がす箇所



図 4.10 引き剥がす接着層

は剥離試験に使用したサンプルを撮影した写真である。図 4.12 は剥離試験を行った後のサンプルを撮影した写真である。図 4.12 (左) は引き剥がしに成功し接着層がきれいに剥がれたサンプルで、図 4.12 (右) は引き剥がしに失敗し、LPC の層が破断してしまったサンプルである。図 4.13 は放射線照射を行っていないサンプルの剥離試験の結果である。引き剥がしに成功した 5 回の測定は、32~44 N の強度を示した。一般的に FPC のサブストレートとして使用されるポリイミドの剥離強度が 8 N 程度であるため、比較を行うと十分な強度であると言える。図 4.14 は 5 kGy の放射線照射を行ったサンプルの剥離試験の結果である。途中で強度が上がっているオレンジの測定があるが、これはサンプルの挟み方のパターンが途中で変わるために起こった現象である。引き剥がしに成功した 5 回の測定は、35~43 N の強度を示した。この結果から、Bus-Extender は放射線照射を行っても十分な剥離強度を保持することがわかった。図 4.15 は接着が重複しているサンプルの剥離試験の結果である。重複したサンプルは、剥離に失敗し剥離強度を得ることができなかった。しかしながら、サンプルが破断する直前は 33~43 N まで強度を保っており、これは他の測定と同程度である。そのため、重複サンプルの剥離強度も十分であることがわかった。

4.3 電気特性の測定

4.3.1 出力波形の測定

1 m 以上ある長尺の Bus-Extender をつなぐとどこで信号伝送経路が長くなり、それに伴って LVDS のデータ信号の波形は減衰しなまってしまう。単体測定の結果からは、Bus-Extender を通過することにより 3 割程度の減衰があることがわかった。今回の測定は、実機につないだ時どの程度信号が減衰しなまるのかを調べるために、実際の INTT ラダーからのデジタル信号波形を用いて測定することを目的としている。キャリブレーションテストによる INTT の出力波形を測定した。測定した出力波形からアイダイアグラムを作成しビットエラー率 (BER) によってデジタル通信品質の評価を行う。

図 4.16 は出力波形の観測を行う際に使用した高速オシロスコープを撮影した写真である。表 4.2 は出力波形の観測を行う際に使用した高速オシロスコープに関連する使用機器の一覧表である。図 4.17 は出力波形を観測する時のオシロスコープの位置を示したセットアップの概略図であり、上段が Bus-Extender を取り付ける前の測定で、下段が後の測定である。INTT ラダーは LVDS (Low Voltage Difference Signal) を採用しており、図 4.18 は LVDS の受信部で ROC に含まれる。読出しデータの通信では、FPHX が発信した LVDS 信号を ROC で受信する。信号の減衰やなまり具合によってデータ通信が失敗してしまうため、それらを把握しておくことが必要である。INTT ラダー

試験片：裏表

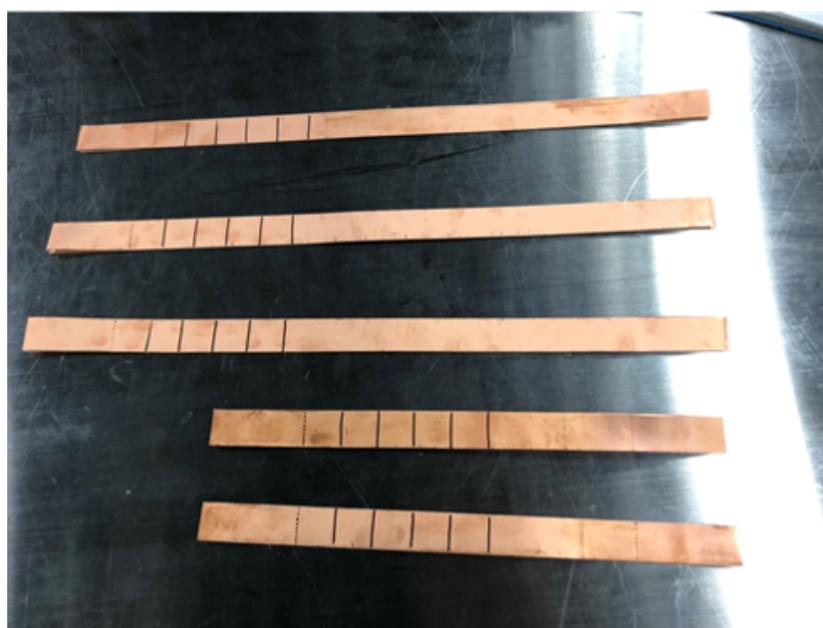


図 4.11 剥離試験に使用したサンプル

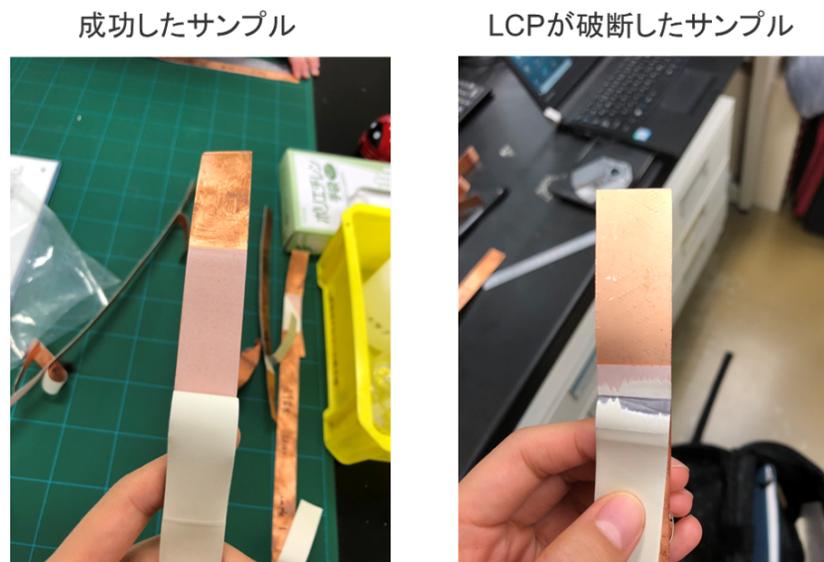


図 4.12 引き剥がしに成功したサンプル（左）と失敗したサンプル（右）

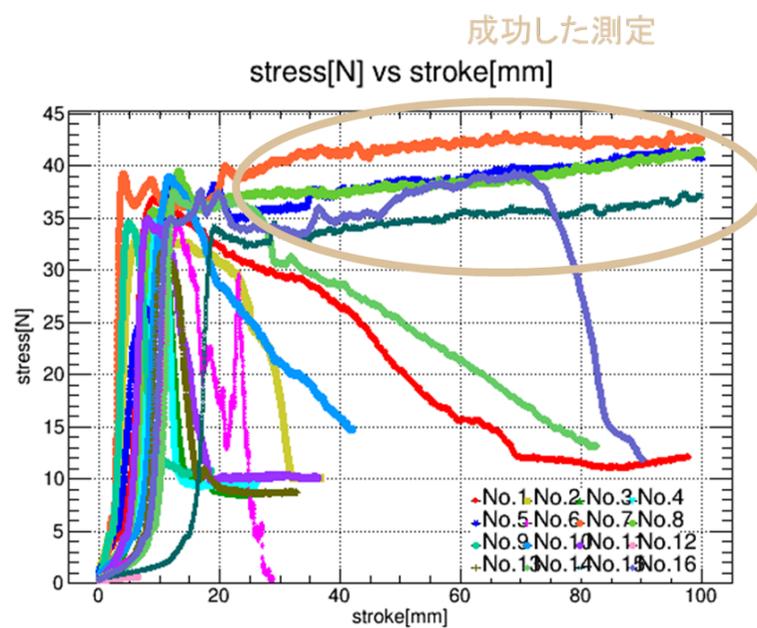


図 4.13 放射線照射を行っていないサンプルの剥離試験の結果

表 4.2 高速オシロスコープに関連する使用機器一覧

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

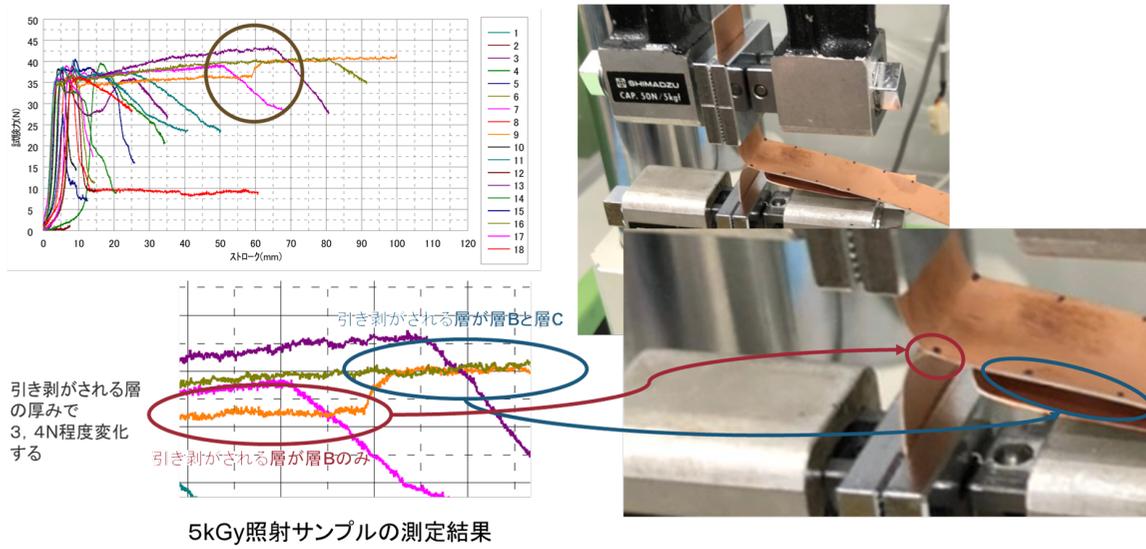


図 4.14 放射線を 5 kGy 照射したサンプルの剥離試験の結果

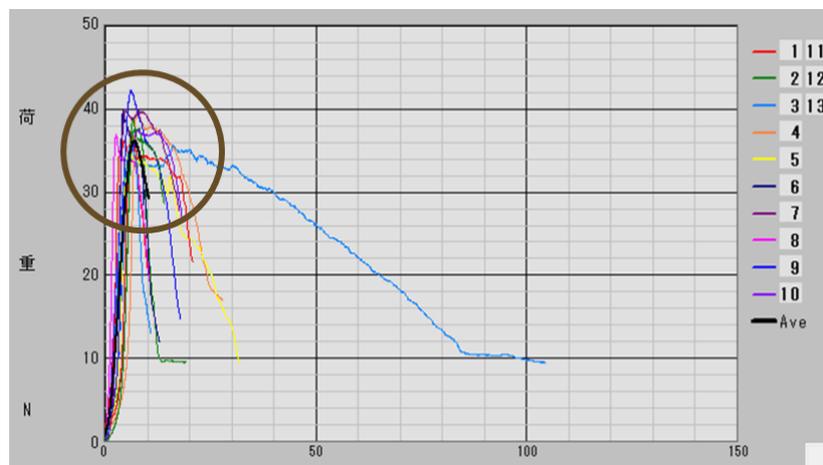


図 4.15 重複したサンプルの剥離試験の結果



図 4.16 高速オシロスコープ



図 4.17 出力波形を観測するセットアップの概略図

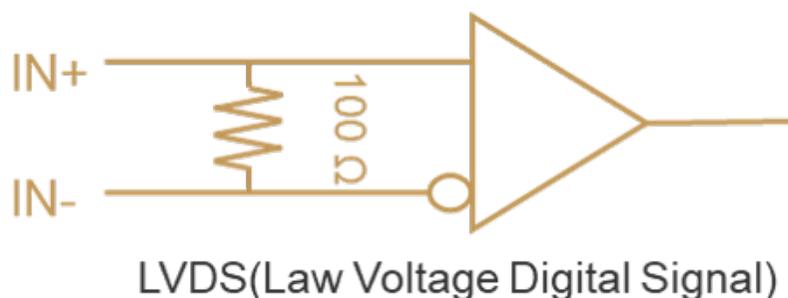


図 4.18 LVDS の回路図

の出力波形は、図 4.19 のような ROC の裏にある終端抵抗を差動プローブで挟んで測定する。図 4.20 は ROC の裏の終端抵抗を差動プローブで挟んでいる様子を撮影した写真である。これで、LVDS の信号をオシロスコープで観測することができる。図 4.21 は高速オシロスコープのモニターに出力された INTT ラダーの出力波形である。

4.3.2 ワードの読出し

ワードとはひとかたまりのデジタル信号のことであり、通常 16 bit や 8 bit を 1 単位として扱う。INTT のデータワードは 20 bit で、ヒットストリップ番号、ADC、タイミング情報が含まれる。

4.3.3 アイダイアグラム

実際にオシロスコープで測定した出力波形が図 4.22 である。信号は左から右に流れるため、ワードは右から読むが、ワードの 1 bit 目にはクロック信号が来ている。信号の伝送時の波形のゆがみを可視化するためにアイダイアグラムを作成する。アイダイアグラムとは、図 4.23 のようにデジタル信号波形を多数サンプリングし、重ね合わせて表示したものであり、中央にできた空間が目のように見えることからアイダイアグラムと呼ばれる。アイダイアグラムは、アイの高さや幅から電圧のタイミングのマーヅンを評価することができる。図 4.23 の中央に示された六角形はマスクと呼ばれ、データ判定に必要な最低限の高さと幅を示すものである。観測した信号がマスクに触れているかどうかを確認することで、信号の誤判定率を評価する。本研究では、Bus-Extender 単体の性能評価を行った結果より、マスクが誤判定率が 10^{-9} の位置になるように設定している。

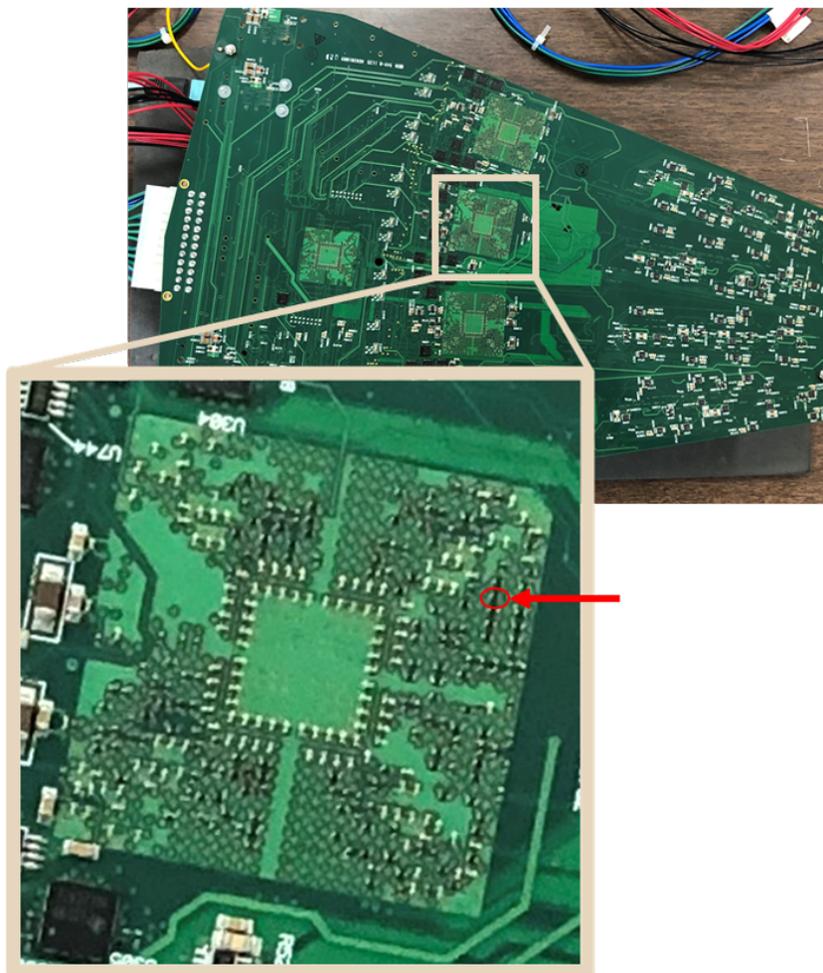


図 4.19 出力波形の測定箇所である終端抵抗の一つ

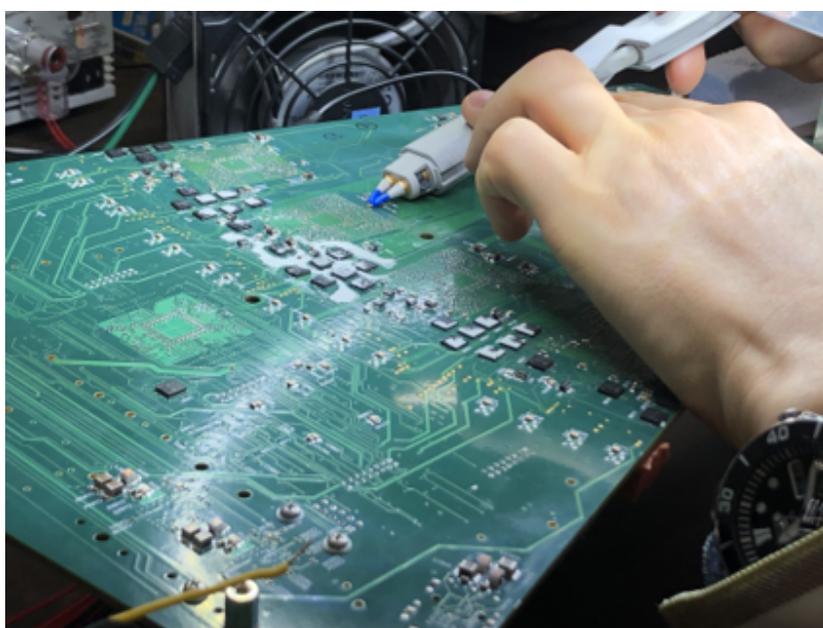
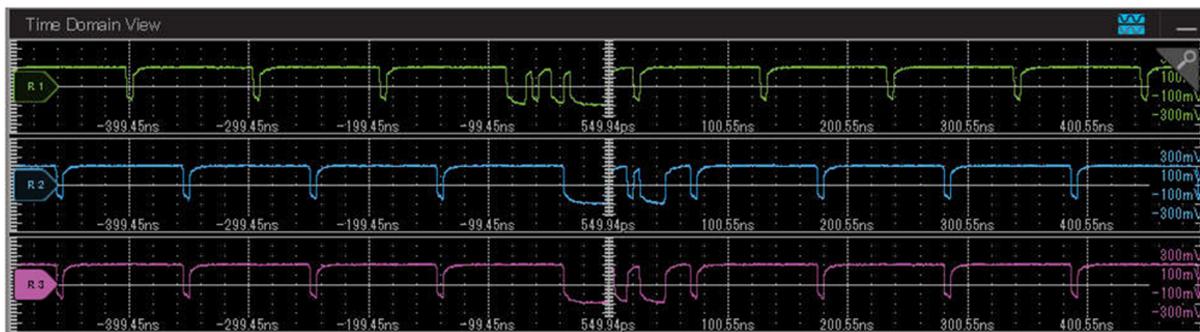


図 4.20 差動プローブで終端抵抗を挟む様子



オシロスコープを用いた出力波形の測定

図 4.21 高速オシロスコープで測定した波形

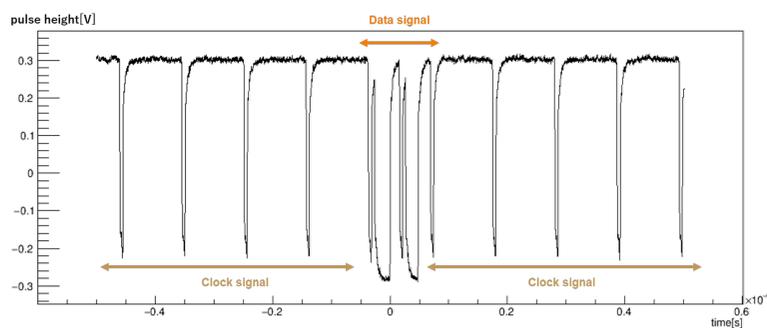


図 4.22 出力波形

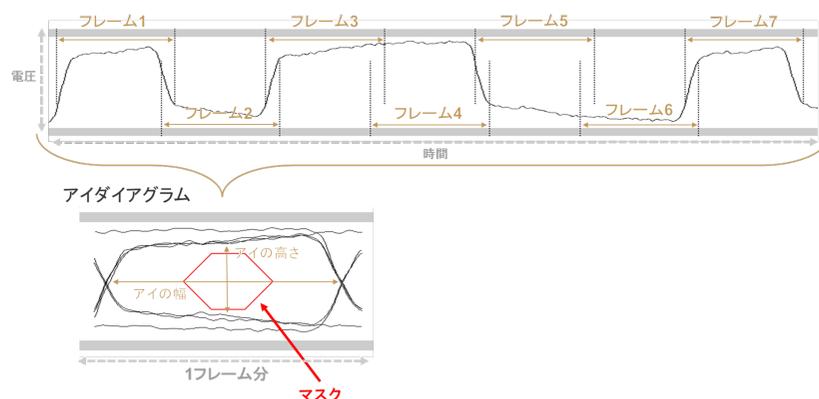


図 4.23 アイダイアグラムの作成

4.3.4 BER (Bit Error Rate)

BER (Bit Error Rate) はデジタルデータの送受信における品質の指標の一つである。データを伝送したときに、全受信データに対してノイズなどの影響でデータ受信に失敗する比率のことで、受信データの間違い率を調べることができる。アイダイアグラムを作成したときの分布から推定することができる。

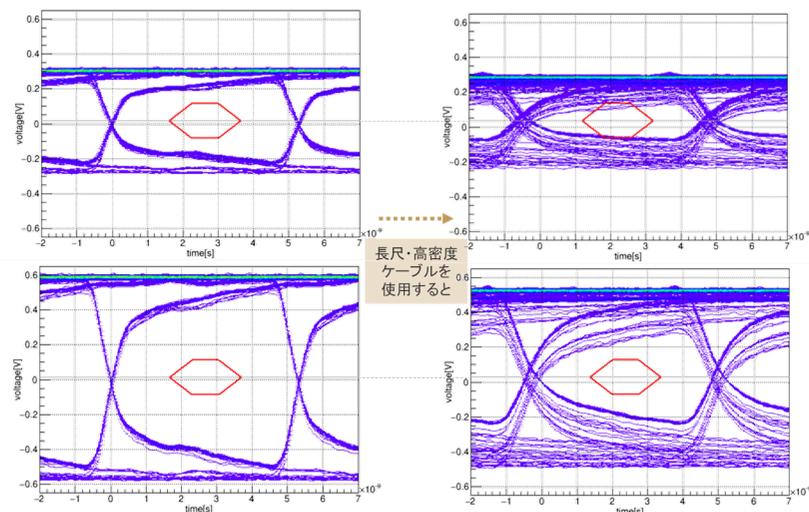


図 4.24 電流量を変えた測定でのアイダイアグラムの比較

4.3.5 離散フーリエ変換による周波数分解

デジタル信号をアナログの矩形波信号としてとらえて、その矩形波を形成している周波数の成分を調べる。離散データを用いて離散フーリエ変換を行うことで、矩形波を形成している異なる周期の正弦波の含まれる割合を知ることができる。

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (4.1)$$

$$a_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \quad (4.2)$$

$$a_n(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx \quad (4.3)$$

$$b_n(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx \quad (4.4)$$

$$(4.5)$$

式 4.2 はフーリエ級数展開の式であり、周期信号を周期の異なる sin 波と cos 波の和で表すことができる。また、これらの係数を求めることで、これらの関数が周期信号に及ぼす影響を調べることができる。式 4.3 で周期信号のオフセットを求めることができる。そして、式 4.4 と式 4.5 でそれぞれ sin 波と cos 波の係数を求めることができる。

4.4 電気特性の評価

4.4.1 アイダイアグラムの評価

オシロスコープで観測した出力波形からアイダイアグラムを作成した。図 4.24 は LVDS の電流量を変えた測定から作成したアイダイアグラムである。図 4.24 の左側が Bus-Extender を使う前、右側が使った後の測定結果である。上段が電流量を 3 mA に設定したときの結果で、下段は 8 mA に設定したときの結果である。電流量を 3 mA に設定

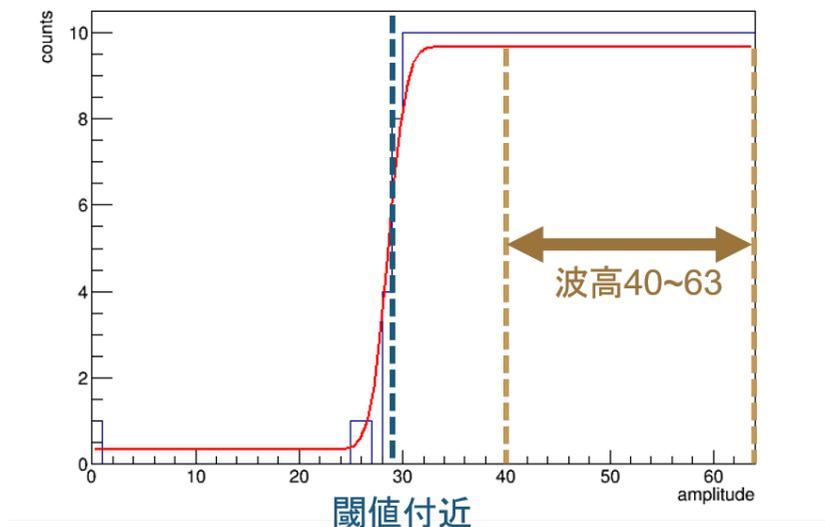


図 4.25 アイダイアグラムと比較するヒット数

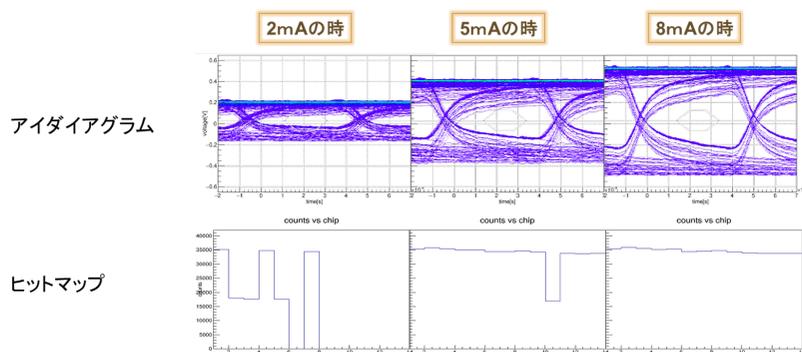


図 4.26 アイダイアグラムとヒットマップの比較

したとき、Bus-Extender を使用する前はアイの高さが 0.39 V であったのが Bus-Extender を使用したことで 0.18 V に減少した。使用する前を基準とすると減少率は 53.8% であった。また、信号が減衰したことで信号波形がマスクに触れた。そこで、電流量を 8 mA にあげると、使用前はアイの高さが 0.87 V であったが、 0.47 V に減少した。電流量をあげることで減衰率は 46.0% となり、減衰率は 50% 以下になった。また、アイの高さが高くなったことで信号がマスクに触れなくなった。図 4.25 に図 3.4 の Fit 関数で閾値を求め、十分に閾値を超えた $40\sim 63\text{ amplitude}$ のヒット数の LVDS の電流量に対する変化を確認した。図 4.26 の上段が左から 2 mA 、 5 mA 、 8 mA の時のアイダイアグラムであり、下段はそれぞれ上段の電流量に対応した 1 チップあたりのヒット数である。これらのプロットから、電流量を多くすることでアイダイアグラムの波高が高くなり、マスクから信号波形が離れることがわかった。また、それに伴ってヒット数が増加し、期待値付近で安定することがわかった。図 4.27 は Bus-Extender を使用する前とした後の信号波形から作成したアイダイアグラムである。図より、Bus-Extender を通過した後の信号は波高が低くなり、マスクに波形が被ってしまうことがわかった。

次に、読み出し回路からの距離ごとのアイダイアグラムを確認した。図 4.28 は Bus-Extender を使う前のチップごとのアイダイアグラムを示している。chip0 は測定したチップのはっきりしないため 0 と表記しているが、読み出し回路からの距離は chip7 よりも近い位置のチップである。図 4.29 は Bus-Extender を使う前と後のアイダイアグラ

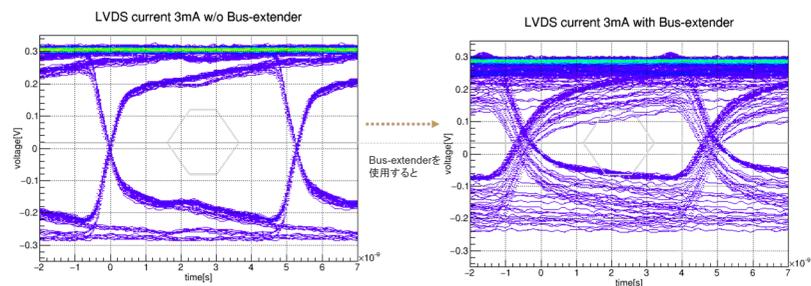


図 4.27 Bus-Extender を使用したときと使用していないときのアイダイアグラムの比較

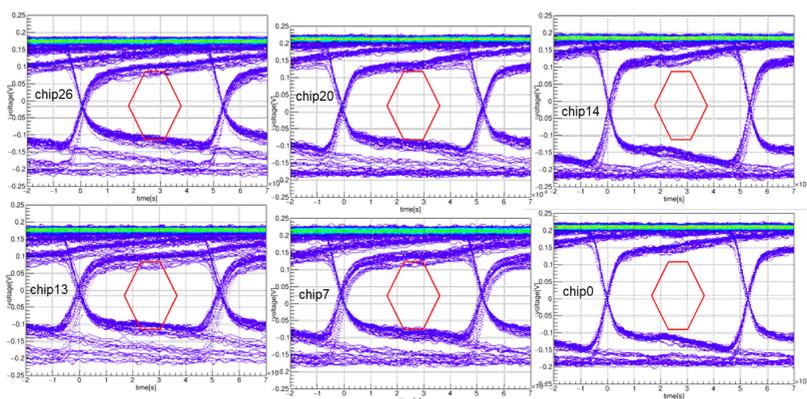


図 4.28 チップごとのアイダイアグラムの比較

ムの波高の結果を示した表である。図 4.29 よりチップが読み出し回路より遠くなるにつれて波高が低くなっていることがわかる。また、Bus-Extender を使うとさらにその波高が 56 % 減少することがわかった。

4.4.2 BER の推定

図 4.30 は同条件の測定結果から作成したアイダイアグラムから BER を求めたプロットである。点はアイダイアグラムの波形から 1σ 離れた位置を示しているが、いくつかの点は波形から離れ中心に散布している。これは、アイダイアグラムを形成している波形の統計数が少ないために、正確な BER を求めることができていないことが原因である。

4.4.3 出力波形の評価

図 4.31 は、測定したチップが 1, 7, 13, 14, 20, 26 の全 6 か所のチップの出力波形を重ねたグラフであり、それぞれ 2 回ずつ測定を行った。チップごとの測定から、同じチップのラインを測定している波形は重なって見えておりタイミングが同じであるが、異なるチップではタイミングが異なっていることがわかった。図 4.32 は電流量を 2 mA~8 mA に変えて測定した出力波形を重ねたグラフであり、それぞれ 2 回ずつ測定を行った。波形の立ち上がり方や高さを比較するために、波形の高さを 0 V でそろえるように横軸をずらして重ねた。電流量が高くなることで、立ち上がりの角度が急になっているように見えていて、信号の High と Low を判断している位置に達する速度がより速くなることを意味している。電流量を増やしたことで、波高だけではなく立ち上がり時間も短くなることがわかった。立下りも同様に、電流量が高いほど短い時間で立ち下がることもわかった。図 4.33 は 20 cm と 40 cm

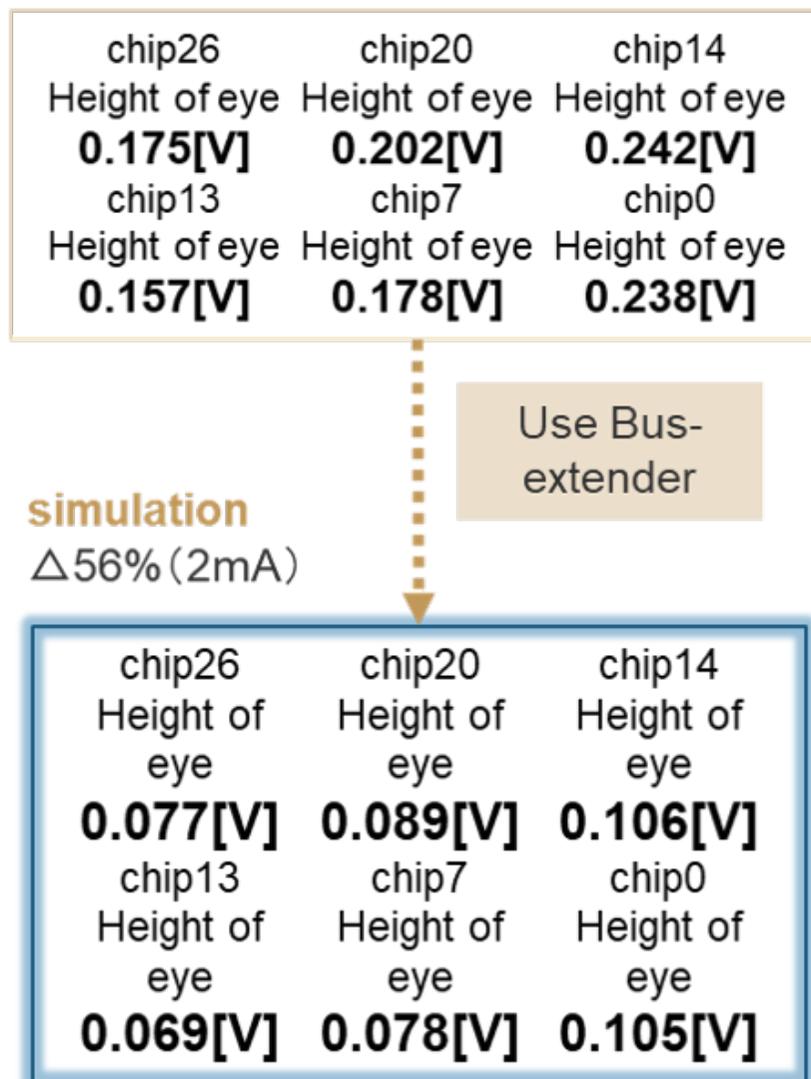


図 4.29 チップごとのアイダイアグラムの波高の測定結果

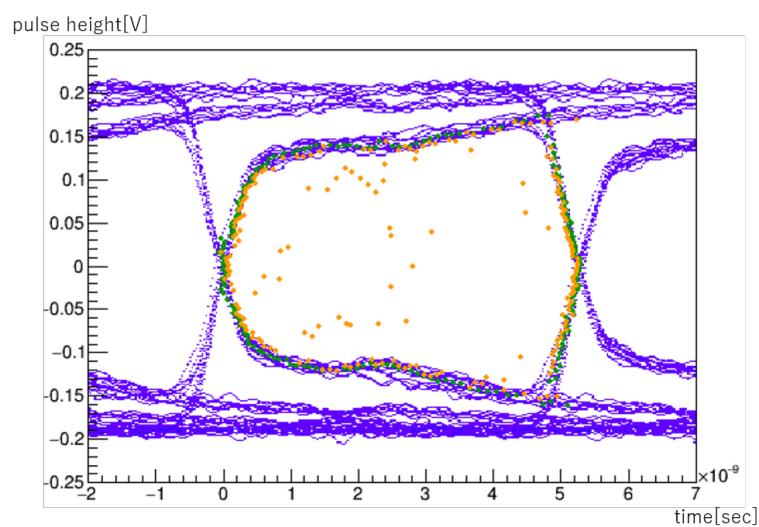


図 4.30 BER の推定

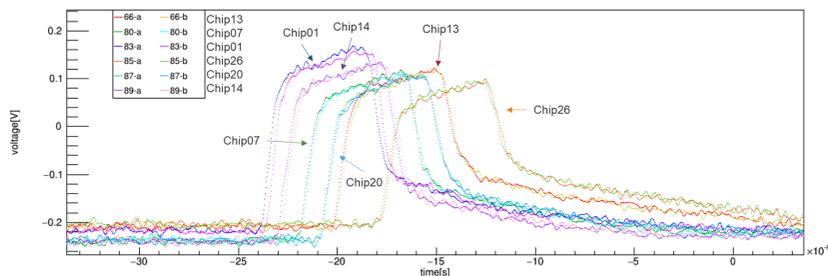


図 4.31 複数のチップを測定した出力波形を重ねたグラフ

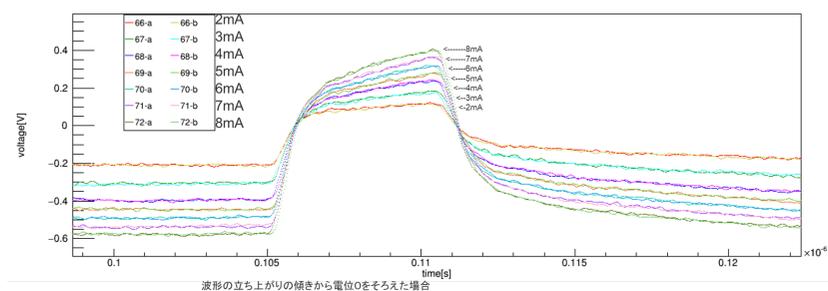


図 4.32 電流量を変えて測定した出力波形を重ねたグラフ

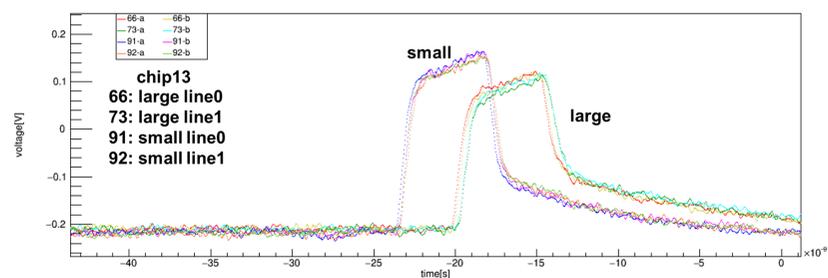


図 4.33 変換ケーブルの長さを変えて測定した出力波形を重ねたグラフ

の変換ケーブルを使って同じチップの2つのラインをそれぞれ2回ずつ測定した出力波形を重ねたグラフである。これまで、変換ケーブルによる信号の減衰はほとんどないと考えていたが、20 cm 変わることで 11.5 % 減衰することがわかった。

4.4.4 周波数成分の評価

Bus-Extender の周波数成分ごとの実機を用いて測定することを目的として、出力波形のスペクトラム解析を行った。出力波形の離散フーリエ変換を行い、パワースペクトルを求めた。まずは図 4.34 のように出力波形全体を1周期と考えて、横軸を $0 \sim 2\pi$ に直す。図 4.35 は図 4.34 の周波数を 1 MHz から 1 GHz まで 1000 サンプル求めた結果である。縦軸は周波数成分ごとの sin 波と cos 波の係数の二乗和平方根であり、これが波形のパワースペクトルを示している。図 4.36 のグラフ (黒) は横軸を $0 \sim 2\pi$ に直した出力波形のグラフであり、グラフ (赤) は図 4.35 で求めた周波数成分から逆フーリエ変換を行い、波形を再構築したグラフである。グラフ (黒) とグラフ (赤) が重なっていることから、再構築できていると判断した。図 4.37 は Bus-Extender を使用する前 (黒) と使用した後 (赤) に

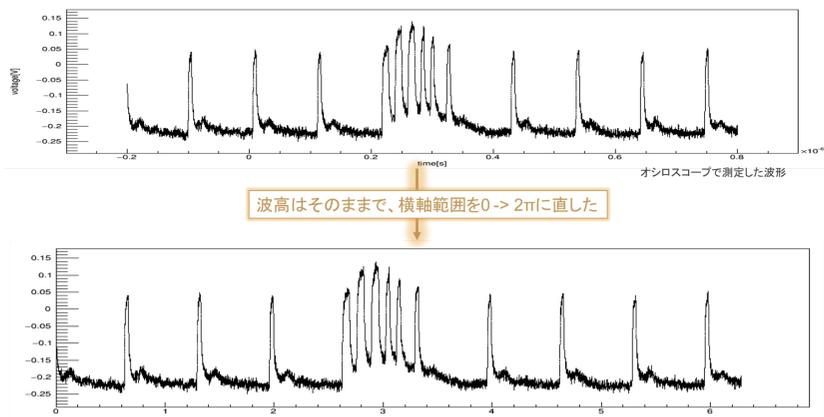


図 4.34 出力波形のフーリエ変換

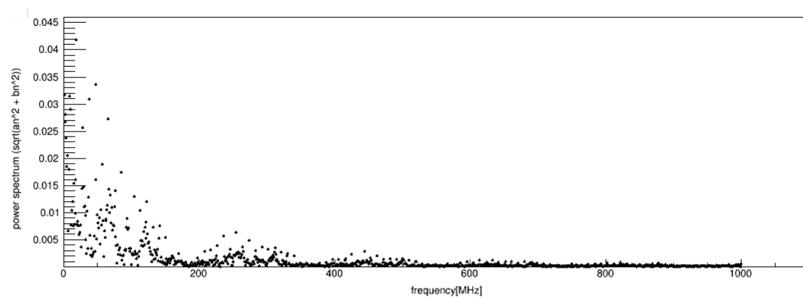


図 4.35 出力波形の周波数成分

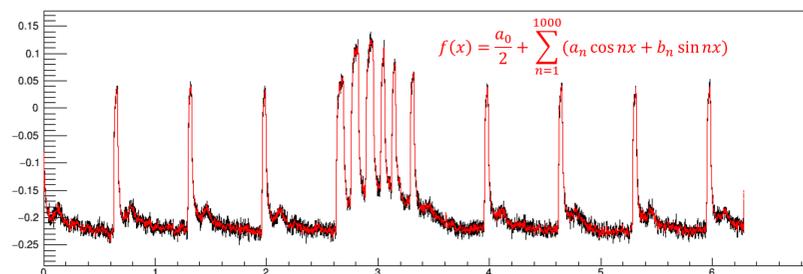


図 4.36 出力波形のフーリエ変換

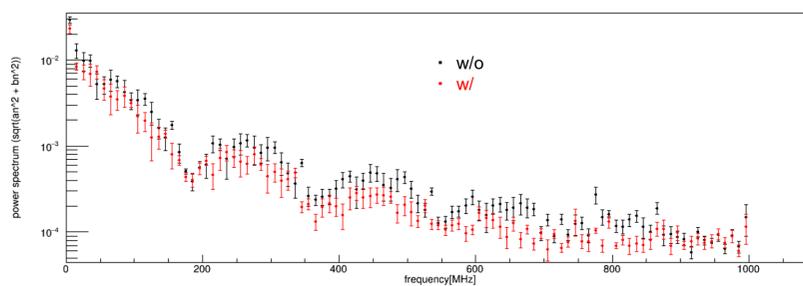


図 4.37 Bus-Extender を使用する前（黒）とした後（赤）に測定した出力波形のパワースペクトルの比較

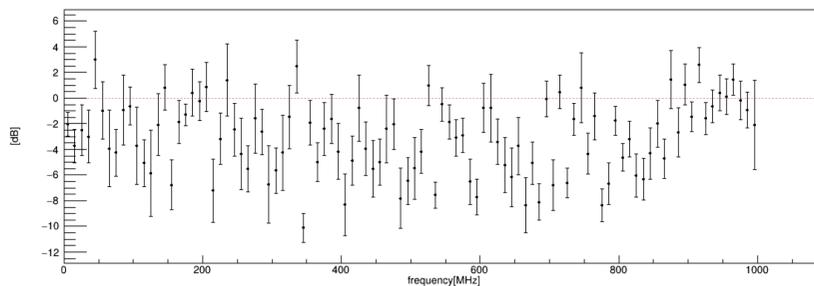


図 4.38 Bus-Extender を使用する前に対する使用した後の減衰率

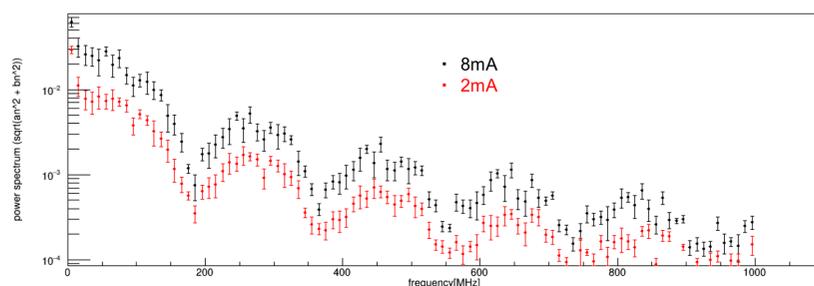


図 4.39 LVDS を変えて測定した出力波形のパワースペクトルの比較

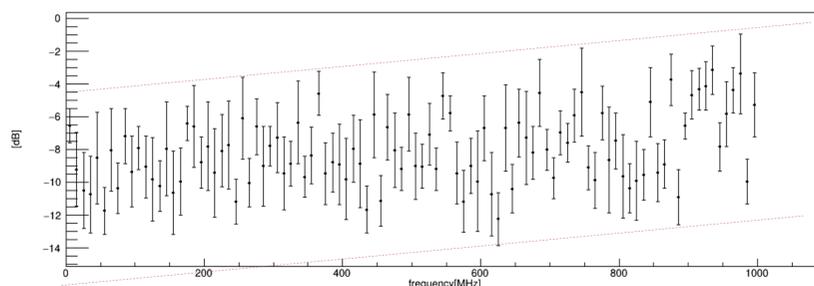


図 4.40 LVDS が 8 mA の測定結果に対する 2 mA の測定結果の減衰率

測定した出力波形のパワースペクトルを比較したグラフである。Bus-Extender を使用した後のパワースペクトルの方が低い傾向にあるが、これは波形が長尺のケーブルを通ることで減衰したことが原因である。それぞれの周波数成分が減衰した割合を調べるために、デシベル (dB) 単位を用いた、以下の式により減衰率を求める。

$$[\text{dB}] = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right) \quad (4.6)$$

$$V_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (4.7)$$

図 4.38 は図 4.37 で求めたパワースペクトルと 4.7 の式より求めた周波数成分ごとの減衰率のグラフである。点線が 0 点を示しているが、ほとんどの周波数成分が減衰していて、高周波成分が特別に大きく減衰していることはなかった。図 4.39 は LVDS の電流量を 8 mA (黒) と 2 mA (赤) に変えて測定した出力波形のパワースペクトルを比較するグラフである。8 mA の点の方が全ての点において大きいことがわかる。図 4.40 は図 4.39 で求めたパワースペクトルと 4.7 の式より求めた周波数成分ごとの減衰率のグラフである。点線の範囲を確認すると高周波になるにつれて、減衰率が小さくなっているように見える。図 4.41 は同じ条件で測定した出力波形のパワースペクトルを比較したグラフである。グラフ中の黒点と赤点はほとんどの点が誤差の範囲内で一致している。図 4.42 は図 4.41 で

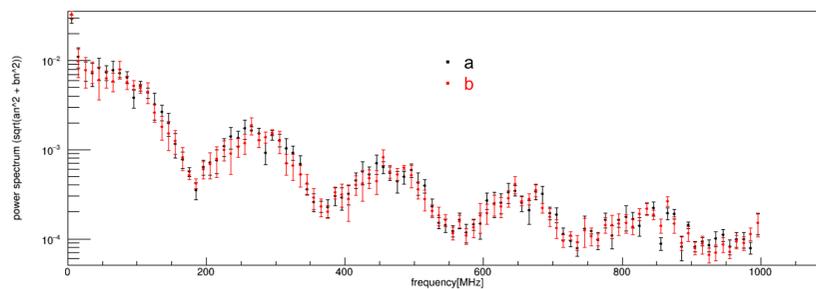


図 4.41 同じ条件で測定した出力波形のパワースペクトルの比較

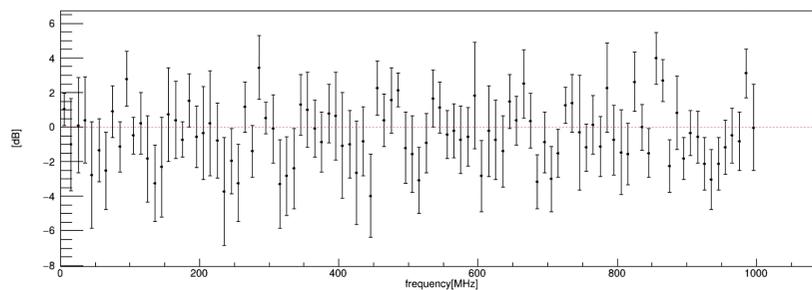


図 4.42 同じ測定の減衰率

求めたパワースペクトルと 4.7 の式より求めた周波数成分ごとの減衰率のグラフである。ほとんどの点が 0 点の点線が誤差の範囲内に含まれているが、全く同じ条件の測定でもこれほどのばらつきがあることがわかった。これは出力波形のうち、ワードがそれぞれ異なることによってワード部分の波形を形成している周波数成分の割合が、ワードによって変わってしまうことが原因であると考えられる。この問題によって、Bus-Extender や LVDS の電流量、チップ位置が変わったことによる結果であるかを断定することができない。そのため、この問題を解決するためにはワードが来ていないときのクロックのみの出力波形を測定する必要がある。または、全く同じワードの出力波形を複数測定し比較する必要がある。しかしながら、200 Mbps の速度で伝送される信号のうち、連続するデータを手動で記録することは不可能である。よって、この測定の今後の方針として、クロックのみの出力波形を測定するか、クロックのみの部分を切り取り、その周波数成分について評価することが最優先であると考えられる。

第 5 章

INTT の検出効率の評価

5.1 研究手法

2021 年 12 月に東北大学電子光理学研究センター (ELPH: ELeCtron PHoton) で INTT ラダーの検出効率を評価するためのテストビーム実験を行った。INTT ラダー 3 台とその前後にトリガーシンチレーションカウンタを設置し、ビーム粒子を測定した。この測定は、sPHENIX 実験に近い環境で量産ラダーのデータ収集を行い、動作確認をすることと、新構築した外部トリガーシステムを使用することで、これまでよりも高い精度で検出効率を評価することが目的である。

$$L_i = \frac{N(L_i \wedge L_j \wedge L_k)}{N(L_j \wedge L_k)} \quad (5.1)$$

$(i, j, k = 0, 1, 2), (i \neq j \neq k)$

式 5.2 の計算式より、2 台の INTT ラダーの相関よりもう 1 台の INTT ラダーの検出効率を求めた。3 つのラダーのうち、検出効率を求めるラダーを注目ラダー (i)、式 5.2 の式の分母に該当する 2 つのラダーを基準ラダー (j, k) と呼ぶ。基準ラダーの両方にヒットがあるときに、注目ラダーにヒットがあるかどうかで検出効率を決定している。

5.2 実験セットアップ

5.2.1 東北大 ELPH での陽電子ビーム

図 5.1 は、東北大学電子光理学研究センターにある研究施設の模式図である。ST リングは、シンクロトロンと呼ばれる種類の電子円形加速器であり、線形加速器から入射された約 90 MeV の電子ビームを最大 1.3 GeV まで加速させてリング中に貯蔵する。電子円形加速器 1.3 GeV ブースター・ストレージリング (BST リング) からのビームを使ってテストビーム実験を行った。図 5.2 はテストビーム実験で使用した GeV- γ 加速器を撮影した写真である。図 5.3 は GeV- γ 加速器の一部で、加速器のリングに炭素ファイバーを差し込んでいるところである。リングを周回する電子の軌道上に非常に細い炭素ファイバーを挿入することで、制動放射が起これ、こうエネルギーのガンマ線を放出する。2 s 程で入射ビームを加速させ、10 s 程度の時間をかけて 10~30 mA の電子から少しずつガンマ線を発生させて、その後 5 s 程度で再び次のビームが入射される。ガンマ線が実験室に入射する位置に、タンゲステンを挿入し衝突させて陽電子を生成している。実験で使用したのは 1 GeV の陽電子ビームである。図 5.4 はテストビーム実験を行った実験室である。図中の赤丸からビームが発射される。

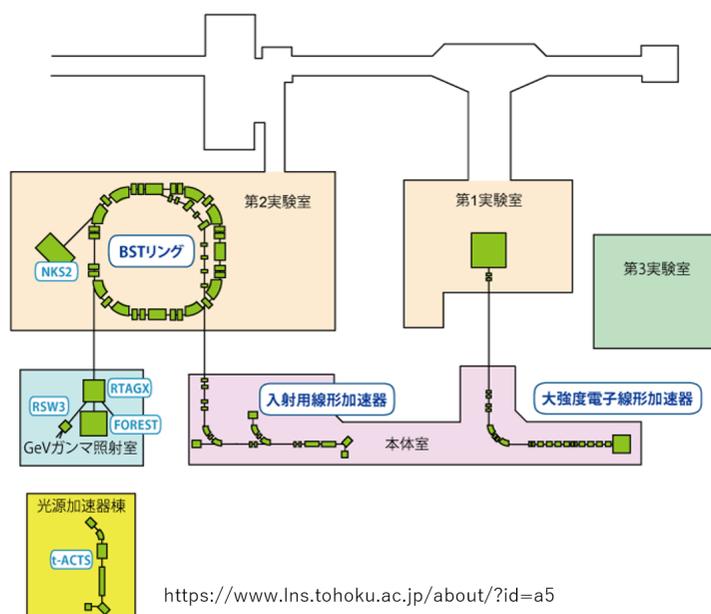


図 5.1 研究施設概要

図 5.2 GeV- γ 加速器

5.2.2 実験セットアップ

図 5.5 はビームテストに設置した INTT ラダーのセットアップを示した概略図である。暗箱内には 4 台の INTT ラダーが設置してあるが、ビームテストで使用したのはビームライン最上流の 1 台を除いた 3 台である。暗箱を挟むようにトリガー用のシンチレーションカウンタを INTT 用シリコンセンサーの高さに来るように設置し、ビームの最も上流にミニサイズのシンチレーションカウンタを設置した。図 5.6 はビームテストで使用した INTT 用テストベンチと NIM と CAMAC の回路図を示した図である。シンチレーションカウンタは 3 台のうちミニサイズのシンチレーションカウンタを除いた 2 台のコインシデンス信号をトリガーとしている。トリガー用のシンチレータ INTT 用シリコンセンサーと同サイズである。トリガーは回路中で veto 回路を組んでおり、ビームを検出した後そのデータを処理し終わるまで次のビームを検出しない仕様になっている。

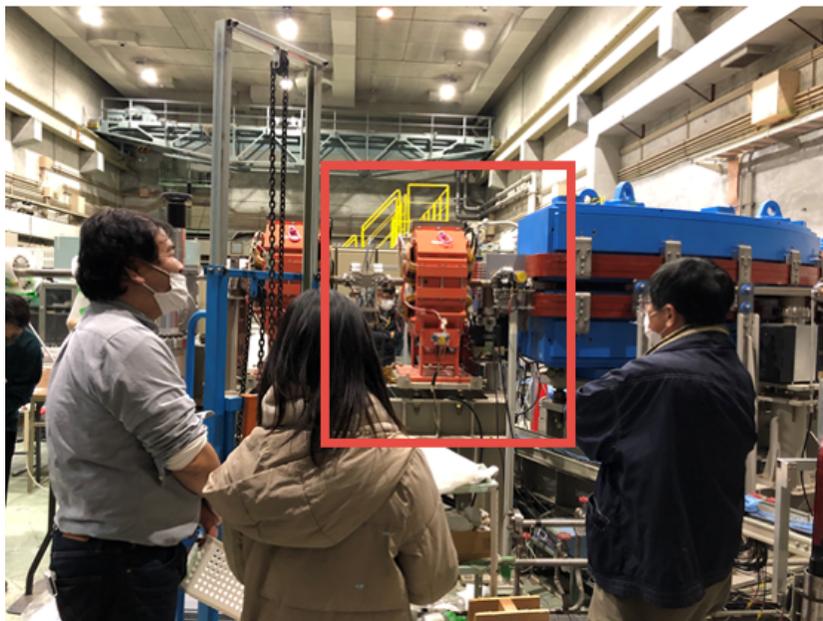


図 5.3 GeV- γ 加速器の一部



図 5.4 テストビーム実験を行った実験室

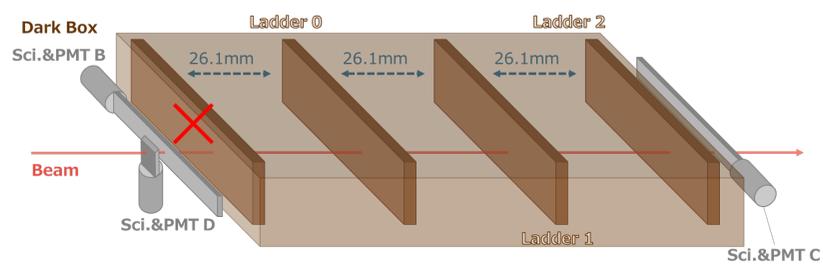


図 5.5 ビームテストでの INTT ラダーのセットアップ

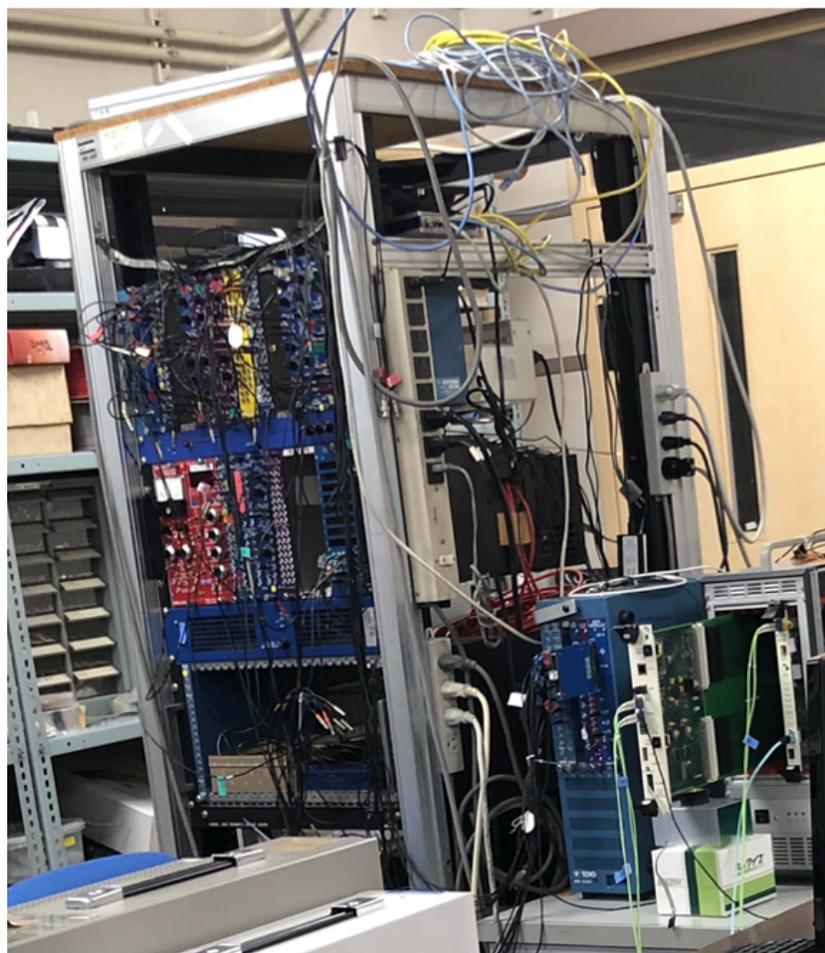


図 5.7 NIM と CAMAC

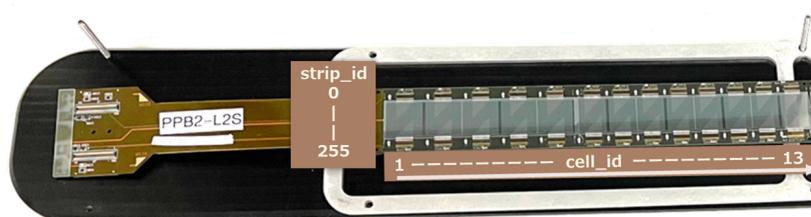


図 5.8 データのフォーマット

次にクラスター化を行った。ビームがシリコンセンサーの表面に垂直に入射した場合、1ストリップのみを通過することが多いが、斜めに入射した場合、複数のストリップを通過することがある。この時、1粒子のイベントが複数のストリップに分かれて記録されるため、1つの粒子のヒットが複数のヒットとして数えられることになる。複数のストリップに分かれたイベントのうち、隣り合うストリップにヒットがある場合、1つの粒子のイベントとしてまとめることをクラスター化と呼ぶ。今回は、同じラダー、セル内で隣り合ったストリップのかたまりを1クラスターとして、各ストリップのエネルギー損失量に対して重みづけの平均値を求め、クラスター化後のストリップ測定値とした。図 5.12 はクラスター化を行った時のエネルギー損失量とヒットストリップ位置の考え方を図示している。以下にク

Row	Instance	ladder	cell_id	strip_id	deposit	bco	bco_full
0	226	0	10	26	60	45	47661
0	227	2	6	136	15	45	47661
0	228	1	10	27	90	45	47661
0	229	2	10	22	60	45	47661
0	230	0	10	26	60	46	47662
0	231	2	6	136	15	46	47662
0	232	1	10	27	90	46	47662
0	233	2	10	22	60	46	47662
0	234	0	11	115	60	64	64
0	235	1	11	115	30	64	64
0	236	2	11	109	60	64	64
0	237	1	11	116	15	64	64
0	238	2	6	136	15	64	64
0	239	1	11	116	15	65	65
0	240	2	6	136	15	65	65
0	241	0	3	216	90	66	66
0	242	0	9	121	15	19	10771
0	243	0	9	122	60	19	10771
0	244	1	9	125	30	19	10771
0	245	2	9	118	15	19	10771
0	246	2	9	119	90	19	10771
...							
0	290	0	11	98	60	73	20553
0	291	0	11	99	30	73	20553
0	292	1	11	98	15	73	20553
0	293	1	11	100	90	73	20553
0	294	2	11	94	60	73	20553

図 5.9 イベント選択

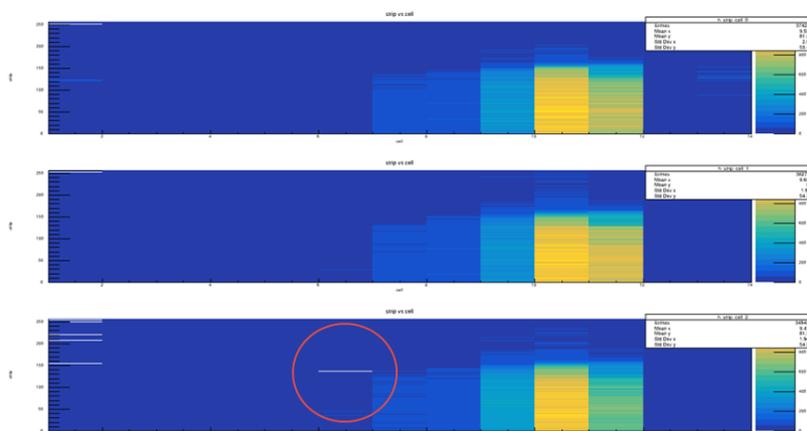


図 5.10 ヒットマップ

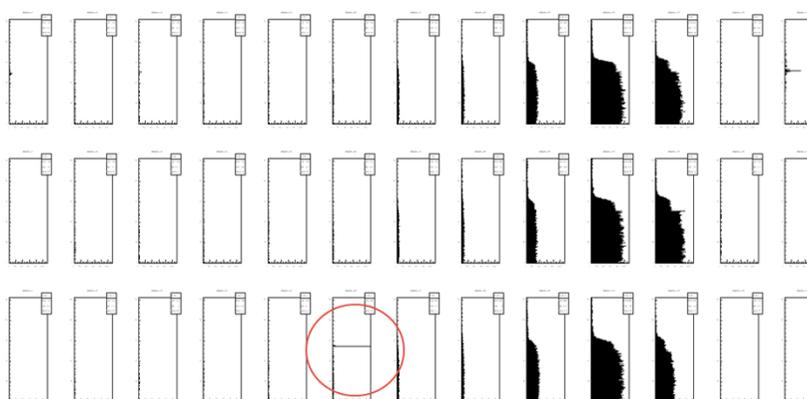


図 5.11 セルごとのストリップヒット

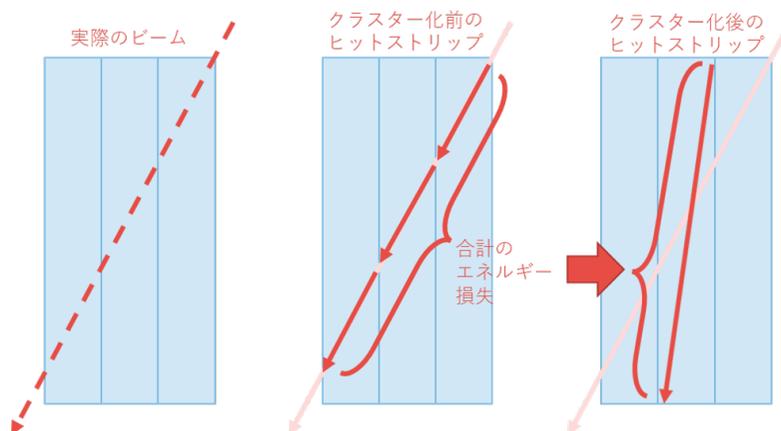


図 5.12 クラスター化後のヒット位置

Row	Instance	ladder	cell_id	strip_id	deposit	bco	bco_full
0	226	0	10	26	60	45	47661
0	227	2	6	136	15	45	47661
0	228	1	10	27	90	45	47661
0	229	2	10	22	60	45	47661
0	230	0	10	26	60	46	47662
0	231	2	6	136	15	46	47662
0	232	1	10	27	90	46	47662
0	233	2	10	22	60	46	47662
0	234	0	11	115	60	64	64
0	235	1	11	115	30	64	64
0	236	2	11	109	60	64	64
0	237	1	11	116	15	64	64
0	238	2	6	136	15	64	64
0	239	1	11	116	15	65	65
0	240	2	6	136	15	65	65
0	241	0	3	216	90	66	66
0	242	0	9	121	15	19	10771
0	243	0	9	122	60	19	10771
0	244	1	9	125	30	19	10771
0	245	2	9	118	15	19	10771
0	246	2	9	119	90	19	10771
...							
0	290	0	11	98	60	73	20553
0	291	0	11	99	30	73	20553
0	292	1	11	98	15	73	20553
0	293	1	11	100	90	73	20553
0	294	2	11	94	60	73	20553

複数クラスター

図 5.13 クラスター化

クラスター化におけるストリップ位置の計算式を記す。

$$clustered\ strip = \frac{\sum_{k=1}^n (strip_k \times energy\ deposit_k)}{\sum_{k=1}^n (energy\ deposit_k)} \quad (5.2)$$

図 5.13 の緑で示しているところがクラスター化対象である。紫で示しているところは 1 イベントに複数クラスター存在しているところである。

次に検出効率を式 5.2 で求めた。検出効率を求める分母の条件として、基準ラダーは 1 イベントに 1 クラスターしか持たないヒットであること、基準ラダーのヒットから推測する期待値は $1 \leq cell < 14$ 、 $0 \leq strip < 256$ であることとした。図 5.14 は基準ラダー同士のストリップの差に対する、1 つの基準ラダーのクラスター化後のヒット位置である。この分布より、差の分布と x 軸と平行であることから、それぞれのラダーが地面と鉛直方向に対して結果に影響するようなビーム方向への回転のズレがないことがわかった。図 5.15 は基準ラダー同士の相関分布である。ビームによるヒットを厳選するため、ほとんどのビームの軌道は直線上であると仮定し、ビームがよりシリコンセンサーの表面に垂直に入射したと考えられる、図 5.15 の赤丸が示す正の相関があるヒットを選択する。さらに、ビーム

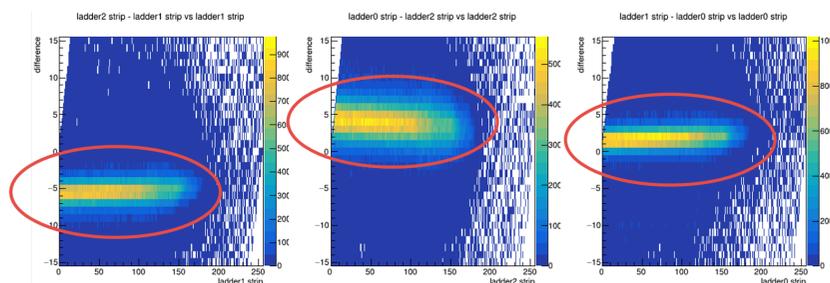


図 5.14 基準ラダーの差に対するクラスタヒット位置

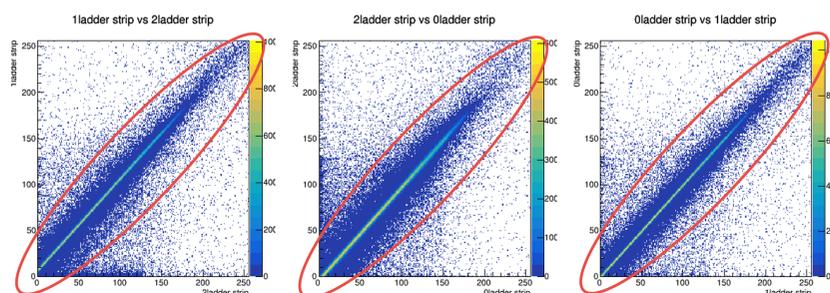


図 5.15 基準ラダーの相関分布

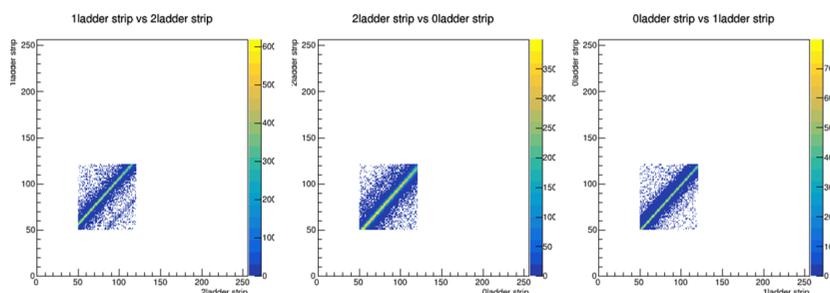


図 5.16 セルとストリップの位置を厳選した基準ラダーの相関分布

を照射した位置を厳選するために、セルの位置が 10 もしくは 11 であること、 $50 \leq strip \leq 120$ であることを要求した。要求後の基準ラダー同士の相関分布を図 5.16 に示す。図 5.17 は基準分布の差の分布であり、ガウス分布を Fit させ中央値からの差の幅を絞ってヒットを選択した。この時、分母として選択するとき、この分布に該当するヒット全て、中央値から $\pm 3\sigma$ 、中央値から $\pm 2\sigma$ の 3 種類から検出効率を求める。

次に検出効率を求めるための分子を選択する。分子は、分母で選んだイベントの中で注目ラダーにヒットがあった場合、基準ラダーで求めた期待位置に対して注目ラダーのクラスターヒット位置が最も距離に近いものを選択した。図 5.18 は基準ラダーで求めた期待位置に対する注目ラダーのクラスターヒット位置のうち、全てのヒット（上段）、Fit したガウス分布の中央値から 3σ （中段）、 2σ （下段）を示す分布である。それぞれ、左から順にラダー 0、1、2 の分布である。また、図 5.19 は図 5.18 の差の分布である。上から順にラダー 0、1、2、の分布である。分子は、分母の条件のうち注目ラダーに対するヒット数と、この分布にガウス分布を Fit して中央値から 3σ の位置のヒットを選択する 2 種類で評価を行う。これにより 6 種類の検出効率を求めた。

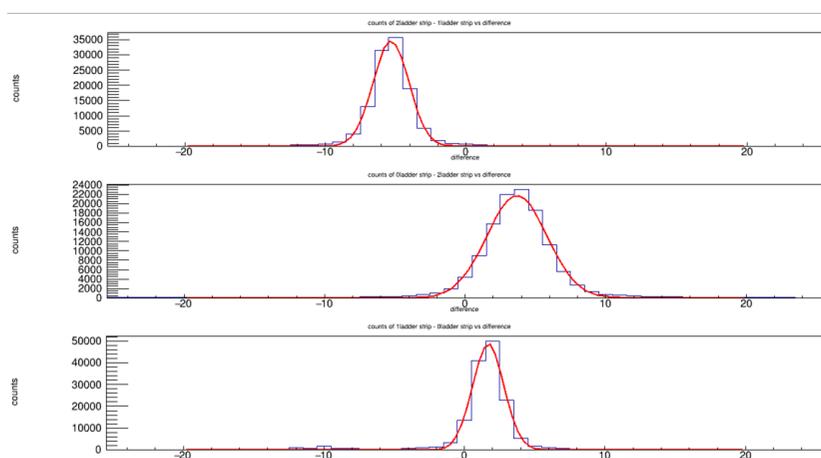


図 5.17 基準ラダーの差の分布

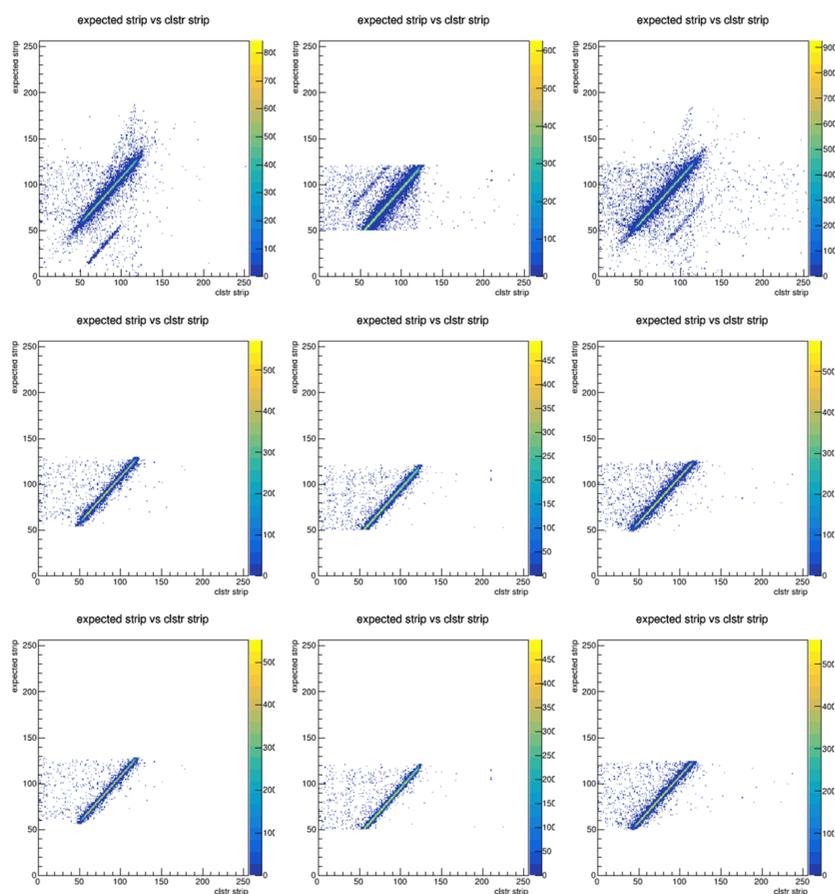


図 5.18 基準ラダーで求めた期待位置に対する注目ラダーのクラスターヒット位置、全てのヒット (上)、 3σ (中央)、 2σ (下)

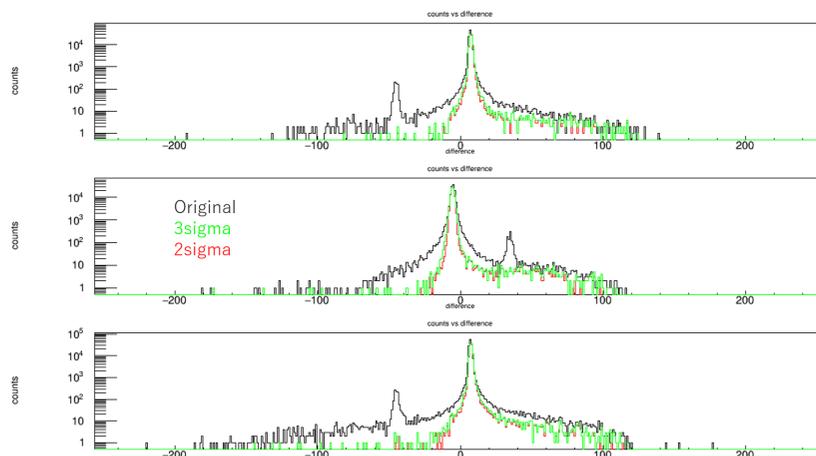


図 5.19 基準ラダーで求めた期待位置と注目ラダーのクラスターヒット位置の差の分布

5.3 結果と考察

表 5.1 6 種類の検出効率

denominator	numerator	focus on the ladder		
		ladder0	ladder1	ladder2
		detection efficiency		
original	original	99.44±0.02 %	99.28±0.02 %	97.44±0.04 %
original	3sigma	95.10±0.06 %	94.17±0.07 %	92.64±0.07 %
3sigma	original	99.53±0.02 %	99.33±0.03 %	99.51±0.02 %
3sigma	3sigma	96.98±0.06 %	97.85±0.05 %	96.25±0.06 %
2sigma	original	99.54±0.02 %	99.34±0.03 %	99.56±0.02 %
2sigma	3sigma	97.67±0.05 %	98.37±0.04 %	96.85±0.06 %

表 5.1 は求めた検出効率の結果を示す表である。検出効率の式の分母はカット無し (original)、ピーク位置を前後 3σ でカット (3sigma)、 2σ でカット (2sigma) と表記している。また、分子はカット無し (original)、ピーク位置を前後 3σ でカット (3sigma) と表記している。

分子が 3sigma である 2, 4, 6 行目の結果を見比べると、分母のカットを original \rightarrow 3sigma \rightarrow 2sigma と厳しくすることで、検出効率が増加している。分母のカットにより、基準ラダーに強い相関があるヒットを選択している。これにより、ビームがまっすぐに通過した場合を選択していることに相当する。分母のカットがない場合は、大角度散乱やビーム通過に関係ないヒットなどによる、バックグラウンドによるヒットが基準ラダーに含まれていることを示している。

次に、基準ラダーを 2sigma に選んだ時を比べると、注目ラダーが original の時、全てのラダーで 99 % 以上、3sigma のときは 96~98 % の効率になっている。各注目ラダーで original と 3sigma を比べると、ラダー 1 の時は 3sigma で 98 % と original との違いが一番小さく、次にラダー 0 が 97 %、ラダー 2 が 96 % となった。ラダー 1 の

場合、基準ラダーが前後にあり、大角度散乱の影響が少ないため、効率の違いが一番小さくなっていると考えられる。一方、ラダー0とラダー2では、基準ラダーに挟まれていないため、分母の選択時にバックグラウンドが残っていると考えられる。特に、ラダー2は最下流に設置しているため、上流側にあるINTTラダーなどの物質量が障害隣、大角度散乱によるバックグラウンドが増えることが想定される。この結果、ラダー2の検出効率が一番低くなっていると解釈できる。

分子がoriginalの場合、全ラダーで効率が99%以上になる。これは、分子をカットしないことで、大角度散乱まで含めた広い領域にあるヒットを使って検出効率の計算をしたことで、効率が上がったと考えられる。一方、カットがないことで、ノイズなどによるヒットも取り込んでしまう可能性も含んでいる。

これらのことを総合して考えると、INTTの検出効率は、ラダー1を注目ラダーとしたときの値を用いて、98.37%以上の検出効率を持つことがわかった。

5.4 まとめと今後

前回のビームテストよりも高い検出効率を得られたのは、新構築した外部トリガーシステムを取り入れたことでビーム以外のヒットをより取り除けたこと、クラスター化を行ったことでより見たいイベントを厳選することができたことが大きな要因であると考えられる。しかしながら、図5.19にはピーク位置の周りに広いテールが存在する。これらが、わずかに検出効率が100%に届かない原因である。今後の課題として、このテールの原因を理解することが重要であると考えられる。

第6章

結論

本研究では、Bus-Extender 使用によるキャリブレーションテストのノイズ評価と、Bus-Extender の性能評価、またテストビーム実験による INTT の検出効率の評価を行った。

まず、ノイズ評価としてチップごとのノイズ量と閾値の測定を行った。ノイズ量はチップによらずほとんどのチップが 5 amplitude 程度でばらついていた。一方、閾値はチップ 1 から 26 になるにつれて高い値になることがわかった。このことから、読み出し回路との距離と閾値には相関関係があることがわかった。また、キャリブレーションテストを 72 回行い、送信数に対する受信数の割合を評価した。その結果、INTT 読出し性能は測定するテストベンチによる違いは 0.4 % 程度で、ほとんど結果に差がないことがわかった。また、奈良女子大学のテストベンチの INTT 読出しシステムは $97.9_{-0.4}^{+0.3}$ % の安定性を持つことがわかった。また、72 回の測定のうちチップごとの受信数の割合はほとんどが 98.4 % 以上であった。このことから、FPHX チップは安定して送受信できることがわかった。

Bus-Extender の性能評価では、物理特性の評価として放射線を照射したサンプルの曲げ測定と剥離試験を行った。曲げ測定では、評価すべき測定値が塑性域である可能性が高まった。弾性域の測定も行っていると考えられるが、曲げ剛性を評価するには不十分であった。これにより精密な評価を行うためには曲げ測定は妥当ではないということがわかった。この結果、曲げ剛性を評価するための別の方法として、固有振動数による剛性測定を行うことに繋がった。引き剥がし測定の結果は放射線照射を行ったサンプルも含め 30 N 以上の剥離強度があることがわかった。これは、一般的に FPC のサブストレートとして使用される PI の、放射線照射前の剥離強度である 8 N を十分に超えている。このことから、放射線環境下において Bus-Extender には十分な剥離強度があるとわかった。

次に、電気特性の評価を行うために、Bus-Extender を通った後の INTT ラダーの出力波形を測定しアイダイアグラムを作成した。LVDS の電流量が 3 mA の時の波高は 0.18 V であり、信号伝送の基準であるマスクよりも低くなった。同時に出力データ数を調べると、Bus-Extender 使用前の受信数より少なくなっていた。このことから、Bus-Extender 使用すると LVDS 通信の信号波高が低くなるため、INTT 読出し性能を機能させるには、3 mA では不十分であることがわかった。一方、電流量を 8 mA に上げると、波高が 0.47 V になり、マスクとも十分に離れた結果になった。また、出力データ数も Bus-Extender 使用前の期待値と同程度受信することができていた。このことから、Bus-Extender 使用時では信号が 50 % 程度減少するが、LVDS の電流量を増やすことでこの減衰量を補完し、信号の送受信が 98.4 % でできることがわかった。

INTT の検出効率の評価では新構築した外部トリガーシステム用いて東北大 ELPH にてテストビーム実験を行った。検出効率の解析では前回のテストビーム実験の評価では行われなかったクラスター化を行った。その結果、前回のテストビーム実験では 96% 程度であった検出効率は、ビームによるヒットを厳しく選択することで全てのラダーで

99% 以上の検出効率を得た。また、注目ラダーに厳しい条件をつけたとしても 98.73 % 以上の検出効率を得た。これらのことから、INTT ラダーの検出効率が十分であると示すことができた。

本研究によって、sPHENIX 実験で INTT を運用するための基本となるデータを定めることができた。

付録 A

測定中のトラブルとその解決

A.1 テストパルスを入力数の2倍受け取る

A.2 bco

図 A.1 はキャリブレーションテストを行ったときの、チップ1チャンネル1の入力信号ごとのヒット数分布である。テストパルスは各入力波高に10回ずつヒットを送っているが、プロットからは20回応答があることがわかった。取得しているヒットのタイミングを確認すると、図 A.2 のように3 bco 連続でヒットがあることがわかった。これらの連続のタイミングのヒットを bco のタイミングでまとめて、1つ目を bco_1、2つ目を bco_2、3つ目を bco_3 と呼ぶことにした。図 A.2 よりチップ1つ分のチャンネルごとの入力信号に対するヒット数をそれぞれタイミングごとに求めた。図 A.3 (左) が bco_1、図 A.3 (中央) が bco_2、図 A.3 (右) が bco_3 のヒストグラムを示している。この図から、bco_1 と bco_2 のヒストグラムが似た様子を示しているように見えており、また、bco_3 は閾値付近のヒットがあることがわかった。そこで、bco_1 と bco_2 のヒットの一致率を求めたところ、99.95 % のヒットの位置や ADC が一致することがわかった。

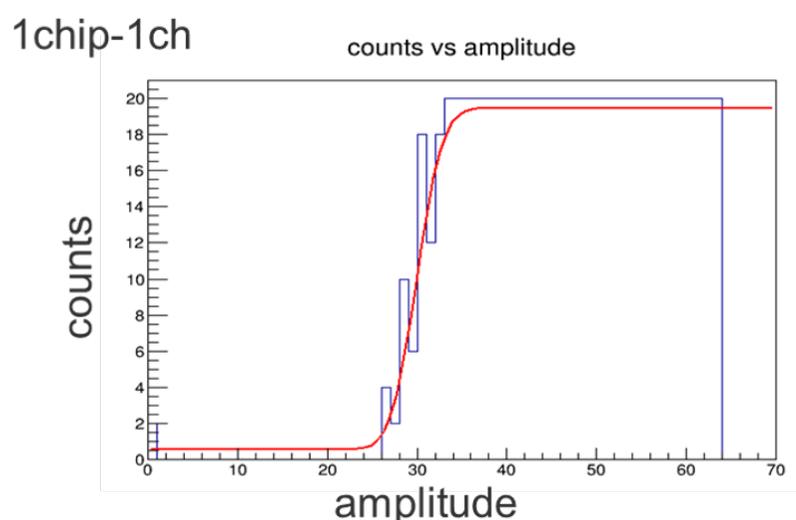


図 A.1 チップ1チャンネル1の入力波高ごとのヒット数分布

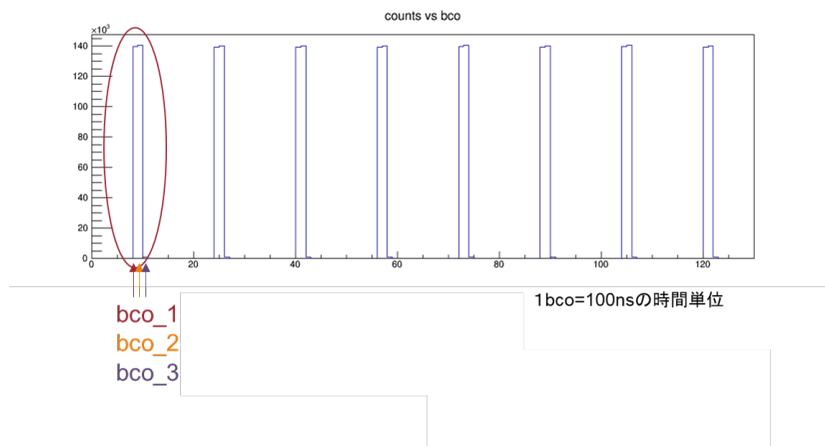


図 A.2 3回連続で来るヒット

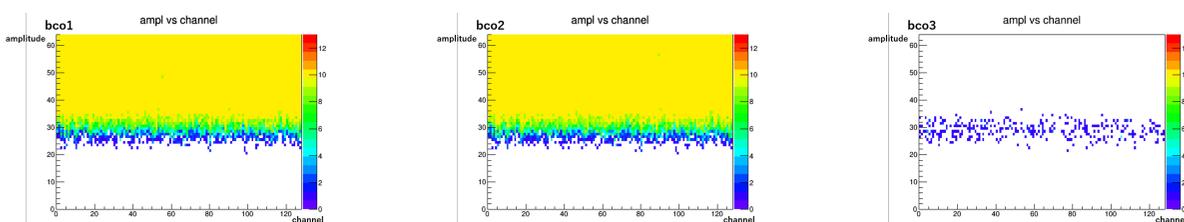


図 A.3 チップ1つ分のチャンネルごとの入力信号に対するヒット数、bco.1 (左)、bco.2 (中央)、bco.3 (右)

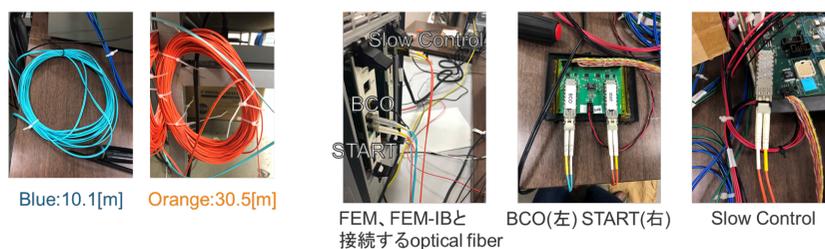


図 A.4 FEM、FEM-IB と ROC をつなぐ光ファイバー

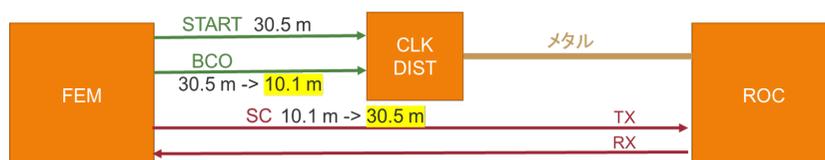


図 A.5 FEM、FEM-IB と ROC をつなぐ光ファイバーの回路の概略図

台湾でテストベンチを設置するために、テストベンチのパーツを一つずつ動作確認した。その際、すでに奈良女子大学に設置してあるテストベンチのパーツと入れ替えて測定を行った。それによって、図 A.4 の FEM と ROC、FEM-IB と ROC をつないでいる光ファイバーの長さが、ヒット数が2倍になる原因の一つであることがわかった。図 A.5 は FEM、FEM-IB、ROC とそれらをつなぐ光ファイバーとケーブル類の概略図を示している。これまで、接続部の BCO と START に 30.5 m、Slow Control に 10.1 m の光ファイバーをつないでいたが、START と Slow Control の光ファイバーを入れ替えることで、2倍になる問題が解決された。BCO と START が出力している波形

2. START

4. BCO

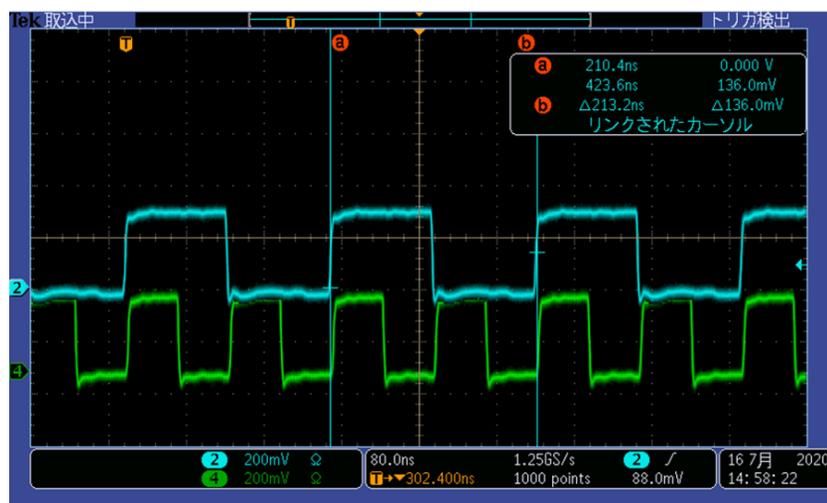


図 A.6 BCO と START の出力波形

stationとコード上のsignal nameの関係				
Data Signal Name	Sync Signal	Fiber Location	Station	Station
DATA_IN_0_0	SYNC_OK_0_0, SYNC_OK_0_1	top	0	3
DATA_IN_0_1	SYNC_OK_0_2, SYNC_OK_0_3	top	1	2
DATA_IN_1_0	SYNC_OK_1_0, SYNC_OK_1_1	top	2	1
DATA_IN_1_1	SYNC_OK_1_2, SYNC_OK_1_3	top	3	0
DATA_IN_3_0	SYNC_OK_3_0, SYNC_OK_3_1	bottom	?	3
DATA_IN_3_1	SYNC_OK_3_2, SYNC_OK_3_3	bottom	1	2
DATA_IN_2_0	SYNC_OK_2_0, SYNC_OK_2_1	bottom	2	1
DATA_IN_2_1	SYNC_OK_2_2, SYNC_OK_2_3	bottom	3	0

図 A.7 FEM の FPGA 内に書かれている各 ROC port から信号を受け取るための端子の表

をオシロスコープで測定した結果が図 A.6 である。

A.3 ROC から FEM までのデータの回路図

この図 A.7 は FEM の FPGA 内に書かれているコードと、ROC の port との対応表であると先行研究から受け継いだ物である。しかしながら、この表の通りにコードを書き換えても宇宙線を測定できないことがあった。図 A.8 は上段から ROC の C-1、C-2、C-3 に INTT ラダーを接続したとき、対応表に書かれた FPGA の port を指定した場合の、宇宙線測定での信号波形を測定した図である。黄色のラインは INTT ラダーからの信号を示しており、青色のラインは FPGA のコード上で指定した port からの信号であり、左から DATA_IN_3_0、3_1、2_0、2_1 を指定している。緑色のラインは、宇宙線測定で外部トリガーとして使用しているシンチレーションカウンタからの TTL 信号である。それぞれのプロットからは、どれも宇宙線信号を測定していると断定できる FPGA port は見つかることができなかった。

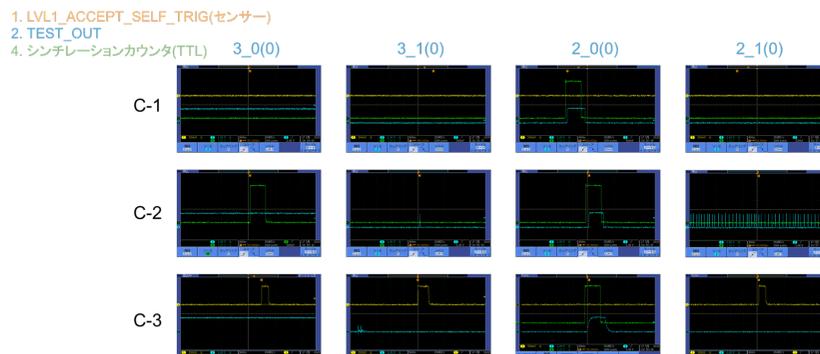


図 A.8 FPGA 上で各 port を指定したときの出力波形をオシロスコープで観測した図

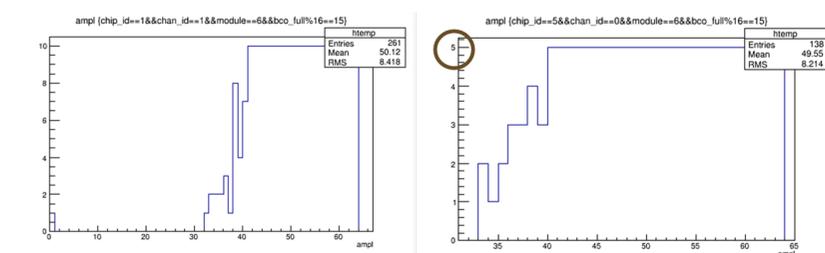


図 A.9 波高ごとのヒット数

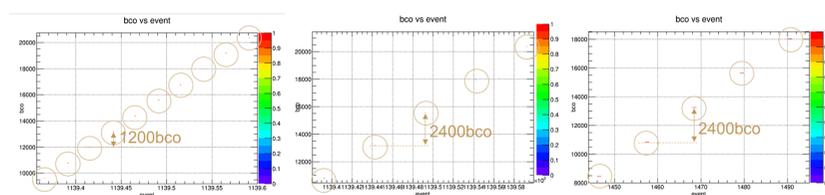


図 A.10 正常な応答をしているときとハーフエントリー問題になるときのタイミングの比較

A.4 ハーフエントリー問題

テストパルスは通常1つのチャンネルあたりに波高を変えて10回ずつ送っている。そのため、正常なチャンネルは図 A.9 (左) のように、閾値付近である30 amplitude 前後のところからヒットが確認され、それ以上ではヒット数10回で安定する。しかし、図 A.9 (右) のように、安定するヒット数が半分の5回になるチャンネルが存在する。これをハーフエントリー問題と呼びその原因を調べ解決した。初めに、正常なチャンネルとハーフエントリー問題が起こるチャンネルのテストパルスのタイミングを確認した。通常では、図 A.10 (左) のように1200 bco ごとにヒットがあるが、INTT ラダーとケーブル、ROC との接続が甘い場合 (図 A.10 (中央)) や、信号が不安定な場合 (図 A.10 (右)) では、通常時のタイミングをちょうど1つ飛ばした2400 bco ごとにヒットを受信していることがわかった。検出器で観測されたデジタル信号はチップ1つあたり2ラインあり、図 A.11 はオシロスコープでそれらを測定したモニターの図である。これまで、2つのラインのうち一方のみが使われていると思っていたが、観測した結果信号は2つのラインに交互に入ってきていることがわかる。それぞれの信号は横軸6マス程度離れており、これは約240 μ s に当たるが、1 bco は約100 ns に相当するため、2400 bco である。この結果から、ハーフエントリー

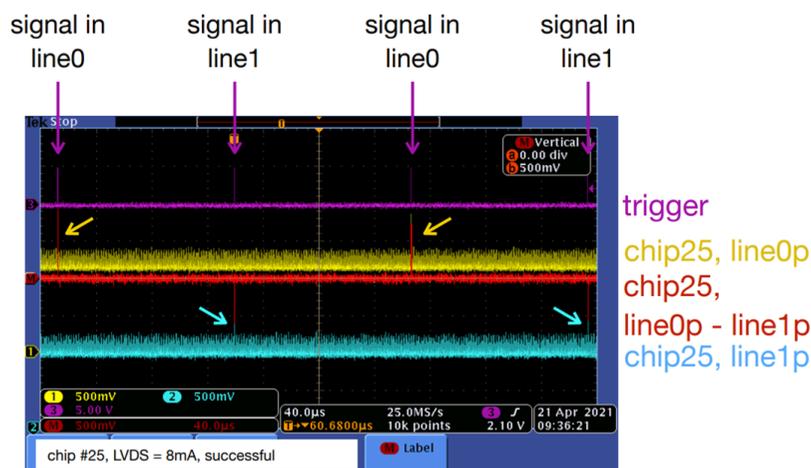


図 A.11 オシロスコープでのタイミングの観測

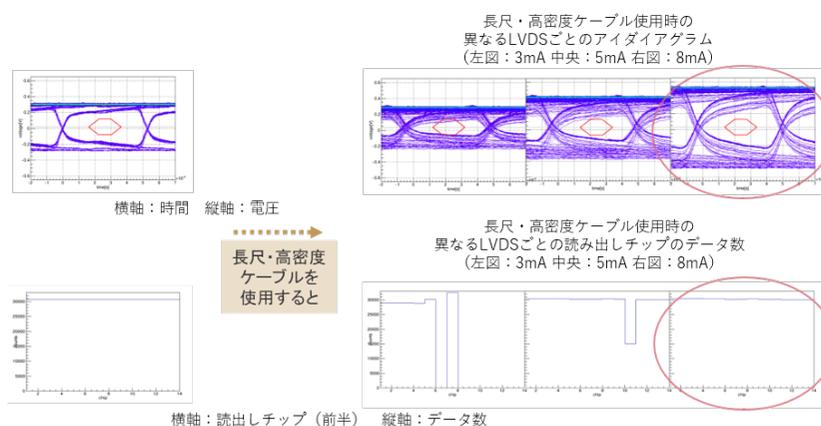


図 A.12 電流量を変えた測定でのアイダイアグラムとヒット数の比較

問題は、一方のラインを通った信号を何らかの理由で読み出し回路側が処理することができなかったために起こった問題であると結論付けた。図 A.12 (左) は Bus-Extender を使う前の測定、(右) は使った後の測定の結果である。図 A.12 上段はアイダイアグラムで下段はチップごとの 40 ~ 63 amplitude のヒット数の分布である。また、図 A.12 (左) は電流量が 3 mA の時、図 A.12 (右) は電流量を 3 mA、5 mA、8 mA の 3 段階で測定した結果である。Bus-Extender を使う前はヒット数が 32700 で安定していたが、Bus-Extender を使うとヒットがないチップやハーフエントリー問題が起こってしまうが、電流量を 8 mA にあげるとハーフエントリー問題が解消されることがわかった。図 A.13 は同じチップにある 2 つのラインのうち、一方がデータの受信に成功し、もう片方が失敗した出力波形のクロックを重ねたグラフである。それぞれ 3 回ずつ出力波形を記録した。図からは、立ち上がりや信号の波高、立下り、タイミングのずれなどはないように見える。図 A.14 は同じチップのうち、受信に成功したラインと失敗したラインの出力波形を重ねたグラフであり、図 A.14 はワードの部分を示している。特に、図中の四角で囲まれたところはワードマークと呼ばれ、20 bit の信号が来たとき、そのデータに意味があるとき High の信号を出力するところである。受信に成功した波形と失敗した波形の高さや形を比較しても、特に傾向は見られず、ハーフエントリー問題がワードマークによって起こった現象ではないということがわかった。

今回の測定では、同じラインで受信に成功したときと失敗したときの比較を行うことができなかったため、今後測

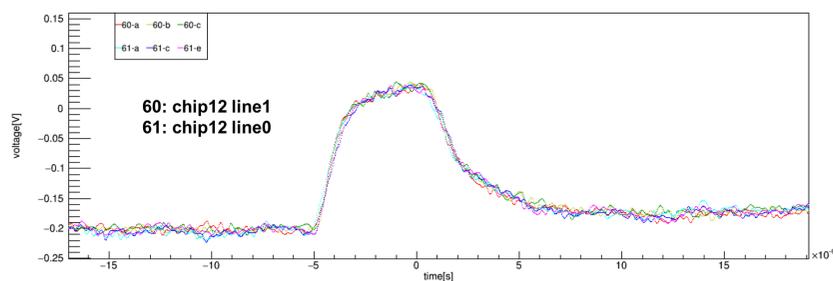


図 A.13 同じチップの受信に成功したラインと失敗したラインを重ねたグラフ

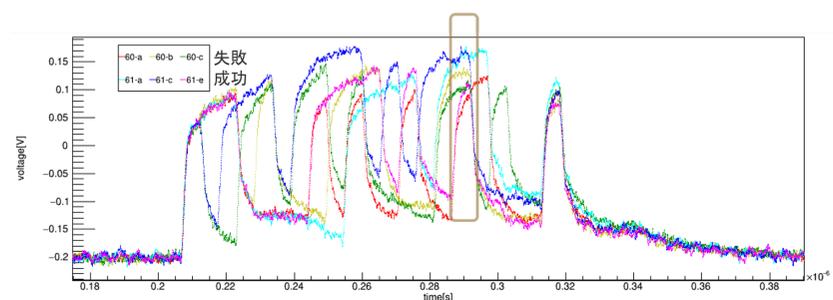


図 A.14 同じチップの受信に成功したラインと失敗したラインの出力波形のうちワードを重ねたグラフ

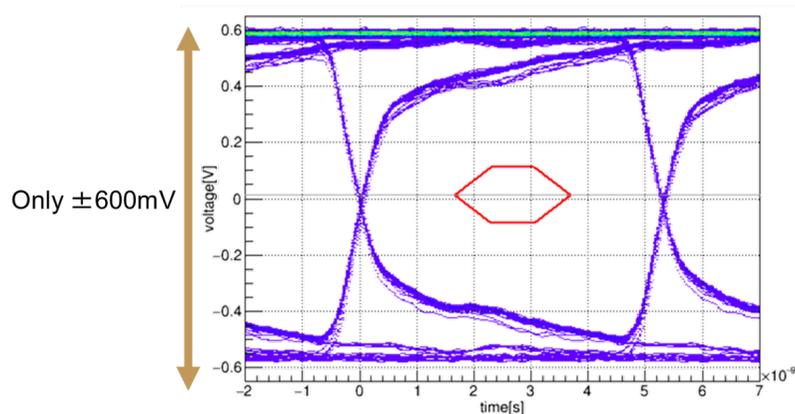


図 A.15 LVDS を 8 mA に設定した測定のアイダイアグラム

定することで原因を知ることができるかもしれない。

A.5 電流量と信号の波高

図 A.15 は電流量を 8 mA に設定して測定した信号波形のアイダイアグラムである。LVDS のインピーダンスは $100\ \Omega$ であるため、8 mA に設定した場合、波高は約 1600 mV になるが、図 A.15 は約 1200 mV 程度である。これは、電流量が 8 mA に設定しているが 6 mA 程度しか流れていないことを意味しており、INTT ラダーへの供給電圧が足りていないことがわかった。図 A.16 は出力波形のデータワードを重ねたグラフである。グラフ中には、信号が立下りきる前に一定の電位で安定しているところが存在する。これは、電圧が必要な電位に達する前に一度飽和している可能性がある。

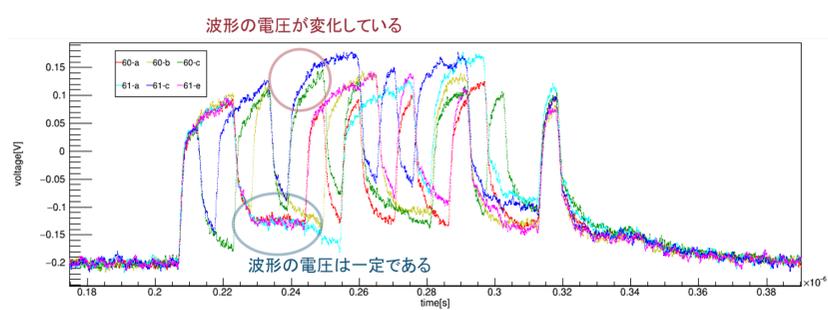


図 A.16 出力波形のデータワードを重ねたグラフ

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご協力を頂きましたこと、厚く感謝申し上げます。

研究室の先生方である、林井先生、宮林先生、下村先生、蜂谷先生、そして出張の手続や実験装置の配送・受け取りなどたくさんの事務手続きでお世話になった物理事務の熊谷さん、学外では、秋葉さん、中川さん、糠塚さん、鈴木さん、近藤さん、長谷川さん、石川さん、柳川さん、他にも本当にたくさんの方々にお世話になりました。特に指導教官である蜂谷先生には、研究の中でも様々なことに関わらせていただき、施設での測定やテストビーム実験、MWEへの参加、学会発表や国際ミーティングなど発表の機会を多くいただき、きっとこれからできないような経験をさせて頂きました。ありがとうございました。また、糠塚さんには資料作りやプログラミング、研究だけに終わらずたくさんの相談を聞いていただき、またサポートして頂きました。糠塚さんのおかげで無事研究を最後までやり遂げることができました。ありがとうございました。

ELPHで助けてくださった鶴田さん、東方くん、お二人のおかげで無事にテストビーム実験を行うことができました。同じ研究グループの後輩である、並本さん、高濱さん、西森さん、黒田さん、杉山さん、波多さん、渡部さん、今井くん、今川くん、中野くん、中村くん、みんなよくできた後輩たちで、私は先輩として未熟で至らない点が多く、あまり上手に教えたり手伝うことができなくて、むしろ助けてもらってばかりでしたが、私は皆さんと一緒に実験や研究ができて楽しかったです。同期の柴田さん、チェンウェイの二人は本当にとっても優秀な同期で、研究に対する姿勢は常に刺激になりました。また、特に英語については同期だけの議論の機会を開いてアドバイスをもらいたくさん助けてられていました。ありがとうございました。

研究室外の友人たちにも恵まれ、発表練習に付き合ってもらったり相談を聞いてもらったりして、研究のモチベーションを保っていました。そして、絹谷先輩のおかげで結果を出し審査会で発表し修士論文を書き終えることができ、また無事に卒業することができます。本当にありがとうございました。

ここでの経験は、これから社会に出る私にとって必ず支えとなることを確信しています。私に関わって下さった全ての方々、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最後まで応援し尊重してサポートしてくれた両親に感謝の意を表したいと思います。

参考文献

- [1] MVTX 2018 *A Monolithic Active Pixel Sensor Detector for sPHENIX Experiment.*
- [2] PDG 2021 *Physical Review D86.*
- [3] Tom, Z. 2009 *FPHX Chip Documentation.*
- [4] 浅野秀光 2010 『高強度荷電粒子ビーム飛跡解析用のシリコンストリップ検出器の開発』修士論文、京都大学大学院
- [5] 長嶋徹 2015 『RHIC-PHENIX 実験 Run15 に置ける FVTX 検出器を用いた講多重度トリガーシステムの開発と陽子+陽子衝突系に置ける方位角異方性の検証』修士論文、立教大学大学院
- [6] 益田英知 2017 『RHIC-sPHENIX 実験におけるシリコンストリップ検出器の開発』修士論文、立教大学
- [7] 一色萌衣 呉羽広子 杉野和音 2018 『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』学士論文、奈良女子大学
- [8] 鈴木彩香 2019 『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』修士論文、奈良女子大学
- [9] 柴田実香 2020 『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』学士論文、奈良女子大学
- [10] 今井皓 2021 『sPHENIX 実験におけるバスエクステンダーケーブルの放射線耐性評価』学士論文、立教大学
- [11] PHENIX 2003 *PHENIX Detector Overview.*
- [12] sPHENIX 2014 *An Upgrade Proposal from PHENIX Colaboration.*
- [13] 秋葉康之 2014 「クォーク・グルーオン・プラズマの物理実験室で再現する宇宙の始まり」 共立出版
- [14] 田中輝彦 渡邊英一他 「橋の科学」
- [15] 東北大学金属材料研究所 「金属材料の最前線」
- [16] 高橋幸伯 町田進 角洋一 「基礎材料力学」
- [17] 井上達雄 「弾性力学の基礎」
- [18] 桑村仁 「建築の力学-弾性論とその応用-
- [19] 桑村仁 「建築の力学-塑性論とその応用-
- [20] 野中泰二郎 須賀好富 南宏一 柴田道生 「建築構造力学 図説・演習 I」
- [21] 石田修三 須賀好富 松永裕之 永井興史郎 「建築構造力学 図説・演習 II」
- [22] 村上雅英 「基礎からわかる静定構造力学」
- [23] 奈良女子大学理学部数物科学科 「物理学実験 1」