ATLAS アップグレード用シリコン検出器試験のためのテレスコープの性能評価

大阪大学 理学研究科物理学専攻 山中卓研究室 修士二年

山内 洋子

2016 年 2 月 2 日

概 要

欧州合同原子核研究機構 (CERN) にある、陽子陽子衝突型円形加速器 Large Hadron Collider (LHC) では高エネルギーでの素粒子の反応を観測できる。ATLAS 実験グ ループは衝突点の一つに置いた ATLAS 検出器を用いて、標準理論を超える物理現 象の探索やヒッグス粒子の性質の精査などを行っている。2027 年頃に LHC はルミ ノシティを上げるアップグレード (HL-LHC) を予定しており、それに伴い ATLAS 検出器もアップグレードを行う。内部飛跡検出器は総入れ替えを行う予定で、現 在日本グループでは新たに設置するためのシリコン検出器の開発を進めている。

大阪大学のグループは、シリコン検出器を試験するビームテストの際に使用す るテレスコープを開発している。テレスコープは試験する検出器への粒子の入射 位置を決定するために用いるため、試験する検出器より高い位置分解能が必要と なる。本研究では開発中のテレスコープの性能評価を行い、位置分解能と検出効 率について評価した。また、他の検出器を用いてテレスコープとして使用できる ことを確認した。本論文ではこれらの結果について述べる。

目 次

第1章	序論	5
1.1	LHC 実験	5
	1.1.1 LHC アップグレード	5
	1.1.2 ATLAS 実験	5
	1.1.3 ATLAS 内部飛跡検出器	6
	1.1.4 ATLAS 内部飛跡検出器のアップグレード	7
1.2	飛跡検出器の性能評価方法..........................	7
	1.2.1 テレスコープ	8
1.3	本研究の目的	8
第2章	SVX4テレスコープ	10
2.1	シリコンストリップセンサー	11
2.2	信号読み出し用 ASIC SVX4	11
2.3	DAQ システム	12
第3章	ビームテスト	14
3.1	実験施設..................................	14
3.2	セットアップ	14
第4章	ビームテストの結果	18
4.1	飛跡再構成	18
	4.1.1 TDC による事象選別	18
	4.1.2 絶対座標の決定	18
	4.1.3 ヒット位置の決定	19
	4.1.4 Alignment	21
	4.1.5 最終的に得られる飛跡	24
4.2	解析結果....................................	24
	4.2.1 飛跡再構成の結果	24
	4.2.2 検出効率	27
	4.2.3 位置分解能	29
4.3	考察	31
	4.3.1 TDC 値によるカットについて	31
	4.3.2 ヒット位置の決定方法について	31
	4.3.3 Alignment	34

第5章	SVX4 テレスコープを用いたピクセル検出器の性能評価	37
5.1	飛跡再構成	37
	5.1.1 ヒット位置の決定	37
	5.1.2 Alignment \ldots	37
	5.1.3 最終的に得られる飛跡	38
5.2	解析結果..................................	38
	5.2.1 飛跡再構成の結果	38
	5.2.2 検出効率	38
	5.2.3 位置分解能	39
5.3	考察	41
	5.3.1 ヒット位置の決定方法について	41
第6章	結論	42

第6章 結論

図目次

1.1	LHC 加速器の全体像	6
1.2		7
1.3		8
1.4		9
1.5	現在シリコン検出器の性能評価に使われているテレスコーフの例	9
2.1	テレスコープ全体の概略図.........................	10
2.2	SVX4 テレスコープのシリコンストリップセンサー。図中では縦に	
	256 本のストリップがあり、信号を送るために各ストリップを $\mathrm{SVX4}$	
	の入力信号用パッドにワイヤボンディングで接続している。	12
2.3	SVX4ボード	13
3.1	FNAL で行った実験で使用した加速器の模式図	15
3.2	FNAL のビームテストでのセットアップ。(a)FNAL でのビームライ	
	ンでのセットアップ。(b) 検出器部分のセットアップ。(c) ビームテ	
	ストで行ったセットアップの概略図。	17
4.1	(a)FECLK の模式図、8MHz のクロックは 1·4 の割合で作られてお	
	り、クロックの立ち上がりのタイミングでパイプラインの切り替え	
	が行われる。(b)TDC 値と ADC 値の関係。クロックの立ち上がり	
	前後でADC値の平均が低くなっていることがわかる。	19
4.2	絶対座標の位置。z軸方向がビームの方向と同じ向きである。	20
4.3	最下流の x 方向センサーでのクラスタあたりのヒット数の分布。	20
4.4	(a) 最下流のテレスコープ 0 の x 方向センサー内での一部分でのヒッ	
	ト位置の分布。50µm 毎にどの位置でも離散的な値をとる分布になっ	
	ている。(b)最下流のテレスコープ0のx方向センサーでのクラス	
	タサイズ2以上のときに原点をストリップ中心としたときのヒット	
	位置。	21
4.5	(a) テレスコープ2枚の同じ向きのセンサーについて、一番大きな	
	ヒットを持つチャンネル同士の相関。 $(\mathrm{b})(\mathrm{a})$ の分布を $y=x$ に垂直	
	な面に射影したときの分布。 $(c)(b)$ の値と、 y 方向のヒット位置と	
	の相関。	22

4.6	(a)3台のテレスコープで飛跡を再構成したときの、残りの1台のテ	
	レスコープでのトラックの入射位置とヒット位置との差。分布の平	
	均値が原点に移動するようにテレスコープの位置を移動させる。(b)	
	縦軸が x 方向の $residual、横軸がy方向のヒット位置。赤い線が各$	
	bin の平均をとった点で、これを一次関数でフィットしたときの傾き	
	を $θ$ とした。	23
4.7	(a)xと y の移動した値の変化。 5 回毎に回転の補正を行っている。	
	(b)回転角 $ heta$ の変化。 10 回毎に x と y 方向の補正を行っている。	24
4.8	飛跡の入射位置の分布の一部分。 $50 \mu { m m}$ 毎に離散的な分布になって	
	พร	25
4.9	それぞれのセンサーの residual 分布。テレスコープ 0~3の x 方向の	
	residual 分布が $(a)(b)(c)(d)$ 、テレスコープ $0\sim3$ の y 方向の residual	
	分布が (e)(f)(g)(h)。	26
4.10	ヒット位置と飛跡の入射位置との距離の範囲と検出効率の関係。(a)	
	が x 方向のセンサー、 (b) が y 方向のセンサーの検出効率である。	27
4.11	センサー内での位置と検出効率の関係。(a)(c)(e)(g) が順にテレス	
	コープ 0 から 3 の x 方向のセンサー、 $(b)(d)(f)(h)$ がテレスコープ 0	
	から3のy方向のセンサーの検出効率である。	28
4.12	クラスタサイズが2の場合のストリップ中心の距離と飛跡の入射位	
	置の差と、チャンネル番号が小さい方の電荷とクラスタが持つ電荷	
	の比の関係。赤い点は横軸の bin 毎に縦軸の平均をとった点である。	32
4.13	テレスコープ0のx方向のセンサーのクラスタサイズ2の場合のヒッ	
	ト位置とストリップの中心との距離の差。(a) が重心法を用いた場	
	合、(b)が新たに決定したヒット位置を用いた場合。	33
4.14	SVX4ボード内でのセンサーの位置関係。×が解析で使用している	
	ヒット位置、オレンジの丸の位置がそれぞれのセンサーでの真のヒッ	
	卜位置。	33
4.15	粒子の入射角と本解析で用いたヒット位置と真のヒット位置のずれ	
	の関係。	34
4.16	青線の分布がテレスコープ 3 の x 方向のセンサーの $ ext{residual}$ 分布の	
	左側のピークのときの y 方向のセンサーの位置分布。赤線が右側の	
	ピークのときの y 方向の位置分布。	36
۳ 1		
5.1	それそれのセノサーの residual 分布。 (a)(c) か上流側セノサーの x_x	90
50	y 万回、(b)(d) か下流側センサーの x 、 y 万回の residual 万仲 じのる。	39
5.2	Lット 1 型直C 形砂の八別12直との距離と快出効率の関係。 (a) か x 万	10
-	回、 (b) か <i>y</i> 力回の快击 划 率 でめる。 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	40
5.3	ヒクセルの位重と検出効率の関係。・・・・・・・・・・・・・・・・・	40

第1章 序論

1.1 LHC 実験

Large Hadron Collider (LHC) は欧州合同原子核研究機構 (CERN) にある周長約 27km の陽子陽子衝突型円形加速器である (図 1.1)。重心系エネルギー 14TeV で陽 子を衝突させることができる設計となっている。瞬間最大ルミノシティの設計値 は 1×10^{34} cm⁻²s⁻¹ である。LHC 実験は高エネルギーでの素粒子の反応を観測す ることを目的とし、標準理論を超える物理現象の探索やヒッグス粒子の性質の精 査などを行っている。

LHCは2010年から重心系エネルギー7TeVで稼働を開始し、2012年は8TeVでの運転を行った。加速器の整備作業のため2013年から2年間のシャットダウンを 経て、2015年春より13TeVで運転している。

1.1.1 LHC アップグレード

LHC は現在の重心系エネルギーを 13TeV から 14TeV まであげてデータ収集を 行った後、2024 年頃から長期のシャットダウンを予定している。その際にルミノ シティを 5×10^{34} cm⁻² s⁻¹ 程度にあげるアップグレード (HL-LHC) を行う。これに より未知粒子の探索感度の向上、ヒッグス粒子の性質のより精密な測定などが可 能になる。

1.1.2 ATLAS 実験

A Troidal AparatuS (ATLAS) 実験はLHC を使った実験の一つで、ヒッグス粒子の性質測定や超対称性粒子に代表される新物理の発見を目的とした、約 3000 人の研究者からなる国際共同実験である。ATLAS 実験は重心系エネルギー 7TeV, 8TeV でそれぞれ約 5fb⁻¹, 21fb⁻¹ のデータを取得した。これらのデータの解析の結果、2012 年にヒッグス粒子を発見した。ヒッグス粒子はヒッグス機構に付随する粒子で、フェルミオンとゲージボソンはヒッグス場を導入することでゲージ不変性を破らず質量を得る。

ATLAS 検出器は陽子衝突点の一つに設置された高さ 25m、全長 44m の大型検 出器である。検出器の構造を図 1.2 に示す。ATLAS 検出器はビーム軸を中心に円 筒形をしており、内側から内部飛跡検出器、ソレノイド電磁石、カロリメータ、ト ロイド磁石、ミューオン検出器の順に配置されている。



図 1.1: LHC 加速器の全体像

1.1.3 ATLAS 内部飛跡検出器

本研究に関連する内部飛跡検出器について詳細に述べる。内部飛跡検出器を図1.3 に示す。内部飛跡検出器はピクセル検出器、Semiconductor tracker (SCT)、Transition Radiation Tracker (TRT) で構成されている。これらは荷電粒子を検出し衝 突点付近の飛跡を再構成する。また、外側のソレノイド磁石で飛跡を曲げること により、曲率から粒子の運動量を測定する役割を担っている。

ピクセル検出器

ピクセル検出器は微小なピクセルに分けられたシリコン検出器である。衝突 点に最も近く、バレル部分4層、エンドキャップ部分3層で構成されている。 バレル部の最内層はInsertable b-layer (IBL) と呼ばれ、ピクセルサイズは $50 \times 250 \mu m^2$ である。外側の三層とエンドキャップ部分はピクセルサイズが $50 \times 400 \mu m^2$ である。全てのピクセル検出器を合わせると総読み出しチャン ネル数はおよそ 9200 万チャンネルである。

SCT

SCT はストリップ状のシリコン検出器である。ピクセル検出器の外側にあ リ、バレル部分4層、エンドキャップ部分9層で構成されている。一つのモ ジュールは2枚のセンサーが40mradの角度をつけて重ねられており、それ ぞれ80µm 間隔でストリップセンサーが並んでいる。2枚のセンサー間に角 度があることにより入射した粒子の二次元の位置情報を得ることができるよ うになっている。

 \mathbf{TRT}

TRT は半径 4mm のストローチューブからなる連続飛跡検出器である。SCT



図 1.2: ATLAS 検出器の構造

の外側にあり、バレル部分にはビーム軸に平行にストローチューブが並び、 エンドキャップ部分はビーム軸を中心に放射状にストローチューブが並んで いる。またチューブの隙間につめられた物質による遷移輻射を用いることで 粒子識別が可能である。

1.1.4 ATLAS 内部飛跡検出器のアップグレード

HL-LHCへのアップグレードに伴い、ATLAS検出器もアップグレードを計画 している。内部飛跡検出器は全て入れ替えを予定しており、シリコン検出器のみ の構成となる。

HL-LHC では現在の約5倍のルミノシティ $5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ に上がるため通過粒子数が増え、それに応じた読み出し速度が必要となる。また放射線ダメージも10倍程度に増えるため高い放射線耐性が必要となる。これらの要求を満たす検出器を現在開発中である。

1.2 飛跡検出器の性能評価方法

飛跡検出器の性能評価について述べる。評価する主な性能は位置分解能や検出 効率などである。これらの性能を評価するために粒子ビームを使ったビームテス トを行うことがある。ビームテストでは、図1.4のように、評価したい検出器の前 後に性能が既知の検出器を置き、粒子の飛跡を決定する。この飛跡を決定するた めの検出器をテレスコープと呼ぶ。テレスコープを用いて再構成した飛跡を用い て、評価したい検出器の性能評価を行う。



図 1.3: ATLAS 内部飛跡検出器の構造

1.2.1 テレスコープ

評価する検出器への粒子の正確な入射位置を知るためにテレスコープを用いる ので、テレスコープは評価する検出器より高い位置分解能が必要となる。現在、 EUDET プロジェクトが開発した MIMOSA テレスコープや、ジュネーヴ大学が開 発した FEI4 テレスコープ等が ATLAS 実験グループのシリコン検出器のビームテ ストで使用されている (図 1.5)。MIMOSA テレスコープはドイツの DESY 研究所、 CERN の SPS などのビームラインに設置されているシリコンピクセル検出器のテ レスコープである。FEI4 テレスコープは CERN の SPS に設置されているシリコ ンピクセル検出器のテレスコープである。

ATLAS 日本グループでは、アップグレード用に開発しているシリコン検出器を 試験するための新たなテレスコープを開発している。大きな特徴として、高い位 置分解能を持つこと、大きな固定器具や大規模な DAQ システムを必要とせず簡単 に持ち運ぶことができること、独自の DAQ システムを持つことがあげられる。こ れにより他グループの DAQ システムに組み込む必要がなく、ビームテストを行う 施設に依存しないビームテストを実現できる。このテレスコープの詳細について は第2章で述べる。

1.3本研究の目的

本研究の目的は ATLAS 日本グループで開発中のテレスコープの性能を評価することである。本研究では、テレスコープの検出効率と位置分解能について評価を行った。またテレスコープを実際に使い、他の検出器の性能評価を行えること



図 1.4: 飛跡検出器の性能評価の模式図



(a) MIMOSA テレスコープ



(b) FEI4 テレスコープ

図 1.5: 現在シリコン検出器の性能評価に使われているテレスコープの例

を実証した。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では本研究の対象である SVX4 テレ スコープについて述べる。第3章でテレスコープの試験のために行ったビームテ ストについて述べる。第4章で試験によって得られたデータの解析の方法とテレ スコープの性能評価の結果について述べ、第5章で実際にテレスコープを使って 行ったピクセル検出器の性能評価について述べる。最後に第6章で結論を述べる。

第2章 SVX4テレスコープ

現在 ATLAS 日本グループが開発している SVX4 テレスコープについて述べる。 SVX4 テレスコープはシリコンストリップセンサーを用いている。ストリップセン サーは2 枚のセンサーを90 度ずらして重ね合わせてあり、二次元の位置情報を得 ることができるようになっている。また電荷情報を用いることができ高い位置分 解能を得られる。

シリコンセンサーのヒット位置情報と電荷情報はSVX4 という ASIC を用いて読 み出す。SVX4 からの出力はドーターボードを介して汎用読み出し基盤である Soi EvAluation BoArd with Sitep 2 (SEABAS2) で処理されイーサネットで PC に送 られる (図 2.1)。

以下でテレスコープを構成する要素について説明する。



図 2.1: テレスコープ全体の概略図

2.1 シリコンストリップセンサー

SVX4 テレスコープに使用されているシリコンストリップセンサーは、n バルク に p^+ ストリップを埋め込んだ p-in-n 型のセンサーである。厚さは 300 μ m、全空乏 化電圧は 80V である。一対の電子正孔対を作るのに必要なエネルギーはシリコン の場合 3.6eV であり、厚さ 300 μ m のシリコンでは 1MIP あたり約 30000 個の電子 正孔対が生成されるが、熱によるシリコンの格子運動などにより一部は吸収され、 実際に検出されるのは約 22000 個である。ストリップ間隔は 50 μ m で、一つのセ ンサーは 256 本のストリップを持つ。センサーからの信号は、それぞれワイヤボ ンディングで接続された SVX4 から読み出される (図 2.2)。SVX4 ボードと呼ばれ る PCB 基盤上に直交するよう重ね合わせて設置された 2 枚のセンサーは 1mm(= 基盤の厚さ) 離れている。センサーの概要を表 2.1 に示す。

センサーの厚さ	$300 \mu { m m}$
全空乏化電圧	80V
センサータイプ	p-in-n 型
ストリップ間隔	$50\mu m$
ストリップの長さ	15.4mm
ストリップの幅	$10 \mu m$
有感領域の面積	約 10mm×10mm

表 2.1: ストリップセンサーの概要

2.2 信号読み出し用 ASIC SVX4

信号読み出し用 ASIC である SVX4 は Fermi National Acceralator Laboratory (FNAL) と Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) が共同で開発した ASIC である ^[3]。1 枚で 128 チャンネル分の信号を読み出し、その信号をデジタルに変換するこ とができる。1 枚の SVX4 ボードには、それぞれ直交した 2 枚のセンサーが配置さ れているので、512(=256×2) 本のストリップからの信号を読み出すために 4 枚の SVX4 が載っている。

128 チャンネルそれぞれがプリアンプ、パイプライン、ADCを持っている。スト リップセンサーからの信号はプリアンプで増幅された後、パイプラインを構成す るコンデンサに蓄積される。コンデンサは47個あり、SVX4に供給するFront-end clock (FECLK)と呼ばれるクロック信号と同期して、順番にプリアンプと接続す るようになっている。外部からトリガーを与えると、トリガーを受け取った時刻 からあらかじめ設定された時間分だけ遡った時刻にプリアンプと接続されていた コンデンサから、電荷がADCに送られる。



図 2.2: SVX4 テレスコープのシリコンストリップセンサー。図中では縦に 256本のストリップがあり、信号を送るために各ストリップを SVX4の入力信号用パッドにワイヤボンディングで接続している。

ADCは、信号を入力すると線形に上昇するランプ電圧を利用したWilkinson型 である。ランプ電圧がパイプラインからの出力電圧を超えるまでの時間をカウン ターで計り、電荷の情報を8bitのデジタル情報に変換する。そのデジタル情報は ー旦 FIFO に蓄積された後BUSデータとして、Back-End clock (BECLK)と呼ば れるクロック信号と同期して読み出される。このとき128 チャンネル全てのデー タを読み出すこともでき、閾値を設定することによって閾値を超えたチャンネル だけを読み出すことも可能である。

2.3 DAQシステム

SVX4 からのデータは SEABAS2 上の FPGA で処理された後 PC に送られ、SC-TJDAQ と呼ばれるソフトウェアフレームワークで収集される。

SEABAS2 は KEK によって開発された DAQ 用汎用基板であり、2 つの FPGA を搭載している。1 つは TCP/IP により PC と通信することができる SiTCP とい



図 2.3: SVX4 ボード

うシステムが搭載されており、もう1つにはユーザーが任意にファームウェアを 実装できる userFPGA が搭載されている。SVX4 テレスコープでは SVX4 の制御 や SVX4 からの出力を記録する機能を userFPGA のファームウェアに実装するこ とでデータの読み出しを行っている。

SCTJDAQ はデータ収集用のソフトウェアのフレームワークである。複数の検 出器からのデータを同時に読み出す機能や、データ収集と並列して簡易な解析を 行う機能などを持つ。現在、テレスコープと同時に ATLAS アップグレード用に開 発されている FEI4、ABC250、ABC130 と呼ばれる 3 種類の ASIC からデータを 読み出すシステムが実装済みである。

第3章 ビームテスト

テレスコープの動作試験^[4] と性能評価のためにビームテストを CERN、大阪大 学 RCNP、そして FNAL で行った。本論文では 2015 年 12 月 3 日 ~8 日に FNAL で行ったビームテストで得たデータを用いる。FNAL のビームは多重散乱の影響 の少ない高エネルギー (120GeV)の陽子ビームであり、粒子ビームの方向が均一で ある。また DAQ の速度に合わせビーム強度を自由に変えることができる。以下で FNAL でのビームテストの詳細について述べる。

3.1 実験施設

FNAL では Fermilab Test Beam Facility (FTBF)^[5] のビームライン MTest で実 験を行った。ビームラインの概略を図 3.1 に示す。まず Linac で 750keV の H⁻ を 400MeV まで加速し、Booster に入射する。Booster ではイオンから電子を引きは がし 400MeV の陽子にした後、8GeV まで加速する。Main Injector は Booster か ら送られてきた陽子を更に 120GeV まで加速する。粒子は Quadrupole eXtraction Regulator (QWR)を使って Main injector から取り出され、MTest に送られる。こ の実験では Main Injector から取り出した 120GeV の陽子をそのまま使用した。ビー ムの詳細について表 3.1 に示す。スピル構造は 1 分間のうち 4.2 秒ビームが出るよ うな構造になっている。ビーム強度は自由に変えることができ、表の値は DAQ の 速度を考慮して設定した値である。

表 3	3.1:	FNAL	のビー	ムの	土様
-----	------	------	-----	----	----

ビームのスポット径	約 6mm
ビーム周期	1 分
スピル長	4.2 秒
ビーム強度	約 500,00protons/spill

3.2 セットアップ

ビームテストに使用したセットアップ全体を図 3.2 に示す。上流からプラスチックシンチレーター、テレスコープ2台、ピクセル検出器2台、テレスコープ2台、



図 3.1: FNAL で行った実験で使用した加速器の模式図

プラスチックシンチレーターの順に、ビーム方向に対して垂直に設置した。ビー ムラインにはデータ収集用にPCを1台置き、コントロールルームからネットワー クを経由して遠隔操作によるDAQを行った。検出器部分はビーム軸に対して垂直 な方向に可変の固定台に置いてビームがセンサーに当たるように固定台を動かし 調整を行った。以下でセットアップの詳細について述べる。

テレスコープ

4台のSVX4ボードをそれぞれアルミの筐体に入れ、その筐体は約30cm×25cm のアルミ板に設置されたレールにネジで固定した。その様子を図3.2bに示 す。筐体はセンサーの保護や遮光、冷却を行うための容器の役割を果たして いる。筐体の中には乾燥空気を流し、冷却を行った。

ピクセル検出器

SVX4 テレスコープがテレスコープとして使用できるか実証するためには、 別の検出器が必要となる。また、ビームテストのもう一つの目的としてテレ スコープと別の検出器を同時に読み出す DAQ の試験がある。これら2つの 目的のために、テレスコープの間に現在 ATLAS 日本グループで開発してい るアップグレード用ピクセル検出器のプロトタイプを2台設置した。ASIC は FEI4 を使用しており、各ピクセルセンサーからの信号はセンサーと FEI4 の読み出しチップを接続するバンプボンディングを経由して FEI4 に送られ、 デジタル化した後 SEABAS2 で処理され PC に送られる。

トリガー

トリガーにはプラスチックシンチレーターを使用した。図 3.2c に示すように テレスコープの上流と下流に1台ずつシンチレーターを設置し、その2台の シンチレーター出力の coincidence でトリガー信号を出すようにした。シン チレーターの厚さは5mm、大きさはおよそ3cm×1cm である。シンチレー ターからの光を検出するために、浜松ホトニクスの光電子増倍管 H3164-10 を使用した。光電子増倍管からの信号を discriminator に入力し閾値を超えて いれば NIM 信号が出力される。2 台のシンチレーターからの信号が両方閾値 を超えて同時に NIM 信号が coincidence に入力されると、coincidence はトリ ガー信号を出力する。閾値と光電子増倍管にかける電圧は、ビームが当たっ ていないときに discriminator から信号が出力されず、ビームが当たっている ときに出力される値に決定した。トリガー信号はテレスコープと FEI4 との 間でイベントの同期をとるために、FPGA に実装された Trigger Logic Unit (TLU) と呼ばれるモジュールに送られる。TLU は全ての検出器がデータ送 信が可能な状態のときにのみ、受け取ったトリガー信号を各検出器の読み出 し用 SEABAS2 に送る。











(c)

図 3.2: FNAL のビームテストでのセットアップ。(a)FNAL でのビームラインで のセットアップ。(b) 検出器部分のセットアップ。(c) ビームテストで行ったセット アップの概略図。

第4章 ビームテストの結果

ビームテストで得たデータの解析手法とその結果について述べる。今回の性能 評価では、テレスコープが4台あるため3台を用いて残りの1台を評価する。

4.1 飛跡再構成

まず入射粒子の飛跡の再構成を行う。飛跡再構成は大きく分けて、TDCの値に よる事象選別、各テレスコープでのヒット位置の決定、テレスコープ同士の相対 的な位置関係 (alignment)の補正、最終的な飛跡再構成の4つの処理からなる。本 解析で行った再構成の手法について以下で説明する。

4.1.1 TDC による事象選別

SVX4 内で電荷をためるパイプラインの切り替えは FECLK と同期して行われ るが、切り替えている間および切り替え直後は信号をためることができないため、 粒子の入射時刻とパイプラインの切り替えのタイミングが重なってしまうと、電 荷量が本来の値より少なく読み出される。この問題を解消するために、FECLKを 20 等分して TDC 値として読み出す。図 4.1a に示すように、FECLK は 8MHz の クロックであり、立ち上がりから次の立ち上がりまでの約 125ns を 20 等分する。 TDC 値とイベント毎の ADC の最大値を二次元ヒストグラムにしたものが図 4.1b である。ADC 値が粒子入射のタイミングに依存していることがわかる。本解析で は TDC 値が 3~12 をもつ事象のみを使用した。

4.1.2 絶対座標の決定

図 4.2 に示すように、絶対座標の原点は最下流のテレスコープの端とし、x 軸、 y 軸は最下流のテレスコープのx、y 方向のストリップ方向にとり、チャンネルの 番号が大きい方を正とした。z 軸はテレスコープに垂直にとり、ビーム方向を正と した。各テレスコープでのz 方向のヒット位置はx 方向のセンサーとy 方向のセ ンサーの中間とした。センサー間は1mm 離れているが、その差を本解析では無視 する。



図 4.1: (a)FECLK の模式図。8MHz のクロックは 1:4 の割合で作られており、ク ロックの立ち上がりのタイミングでパイプラインの切り替えが行われる。(b)TDC 値と ADC 値の関係。クロックの立ち上がり前後で ADC 値の平均が低くなってい ることがわかる。

4.1.3 ヒット位置の決定

まず、ペデスタルの電荷分布をチャンネル毎にガウス分布でフィットし、平均値 と標準偏差を出す。ペデスタルの平均値と標準偏差を用いて式(4.1)のようにチャ ンネル毎に閾値を設定し、電荷が閾値を超えたときにそのチャンネルにヒットが あったとみなす。

閾値 = 平均値
$$+ 4 \times$$
 標準偏差 (4.1)

各テレスコープでのヒット位置は一カ所とし、複数のチャンネルでヒットがあ る場合は電荷量が最大のチャンネルをヒット位置とする。粒子がストリップとス トリップの間に入射したときは、隣接する複数のチャンネルで信号が検出される。 このようにかたまって複数個のヒットがあるとき、ヒットをまとめてかたまり(ク ラスタ)にすることをクラスタリングと呼ぶ。クラスタリングでは、最大の電荷量 を持つチャンネルに、隣接するチャンネルが閾値を超えた電荷を持っていれば、そ の隣接チャンネルをクラスタに組み込む。さらに生成されたクラスタの隣接チャ ンネルが閾値を超えていれば、その隣接チャンネルもクラスタに加えるという操 作を繰り返し行う。例として、最下流のテレスコープの x 方向センサーでのクラ スタあたりのヒット数(クラスタサイズ)の分布を図 4.3 に示す。ヒット数1 が約 70%、ヒット数2 が約 30%を占めている。クラスタのヒット位置は電荷の値の重み 付き平均で決定する(式 4.2)。

$$X = \frac{\Sigma(Q_i \times (C_i - C_0) \times 50\mu \mathrm{m})}{\Sigma Q_i} + C_0 \times 50\mu \mathrm{m} = \frac{\Sigma Q_i C_i}{\Sigma Q_i} \times 50\mu \mathrm{m}$$
(4.2)

ここで X はセンサー上の局所座標系でのヒット位置、 C_i はクラスタに含まれる各 チャンネルの番号、 Q_i はその各チャンネルの電荷量、、 C_0 は最大の電荷量を持つ チャンネルの番号である。



図 4.2: 絶対座標の位置。z軸方向がビームの方向と同じ向きである。



図 4.3: 最下流の x 方向センサーでのクラスタあたりのヒット数の分布。

また、センサー内でのヒット位置の分布の一部を図 4.4a に示す。実際の粒子は 均一に入射しているが、全てのテレスコープでクラスタサイズ1の事象が多いた め離散的な分布となる。またクラスタサイズ2以上の事象を使用して、ヒット位置 と最大の電荷を持つストリップの中心値との差の分布を図 4.4b に示す。ストリッ プ中心付近の事象数が少ないのはストリップ付近に入射した粒子は電荷が分割さ れずクラスタサイズ1になることを示している。また、入射粒子はストリップの幅 ±25µm の中では均一であるはずなので中心から離れたところで事象数が減ってい るのはヒット位置の決定方法に問題があると考える。



図 4.4: (a) 最下流のテレスコープ0のx方向センサー内での一部分でのヒット位置の分布。 50μ m毎にどの位置でも離散的な値をとる分布になっている。(b)最下流のテレスコープ0のx方向センサーでのクラスタサイズ2以上のときに原点をストリップ中心としたときのヒット位置。

4.1.4 Alignment

テレスコープ同士の相対位置関係を求め、各テレスコープの位置を絶対座標上 で決める。本解析では、x方向、y方向の位置とz軸周りの回転(θ)の、3つの自 由度を考慮する。

最終的な位置決定を行う前に、センサー同士の位置関係を以下の方法で予め求 める。x方向とy方向については図 4.5a のように、ある一枚のテレスコープを基 準とし、そのテレスコープと他のテレスコープについて、同じ方向のセンサー中 でのヒット位置の相関をとる。各事象の2つのヒット位置の差の分布を図 4.5b に 示す。この分布の平均値が0になるように絶対座標軸上で他のテレスコープの位 置を動かす。 θ 方向は、基準となるテレスコープと他のテレスコープについて、各 事象の2つのヒット位置の差と基準ではない方のテレスコープのy方向のチャン ネルの相関をとる。その相関の傾きを一枚目のテレスコープからの回転角 θ とし、 そのテレスコープを絶対座標軸上で求めた回転角 θ だけ回転させる。

以下で最終的な位置決定のために、x、y方向、 θ 方向それぞれに対して行なう 補正方法について述べる。



図 4.5: (a) テレスコープ2枚の同じ向きのセンサーについて、一番大きなヒットを 持つチャンネル同士の相関。(b)(a)の分布をy = xに垂直な面に射影したときの分 布。(c)(b)の値と、y方向のヒット位置との相関。

*x、y*方向

x方向とy方向の補正方法について説明する。最上流と最下流のテレスコー プ2台(テレスコープ0、3)の絶対座標軸上での位置を固定し、内側の2台 (テレスコープ1、2)について補正を行う。4台のテレスコープのうち3台(テ レスコープ0、1、3)を使って飛跡を再構成し、その飛跡を用いてテレスコー プ2の位置を求める。飛跡再構成では、テレスコープのヒット位置をx方向 とy方向別々に、縦軸をxまたはy方向、横軸をz方向とし一次関数でフィッ トする。ヒット位置の誤差はx、y方向についてはストリップ間隔が 50 μ m で あることから 50/ $\sqrt{12}\mu$ m とし、z方向の誤差は 0 とした。テレスコープ 2 の ヒット位置と再構成した飛跡の入射位置の差(residual)の分布を図 4.6a に示 す。residual の平均値が 0 になるようにテレスコープ 2 の位置を絶対座標軸 上で移動させる。次にテレスコープ 1 も同じようにテレスコープ 0、2、3 を 用いて飛跡を再構成し位置を移動させる。飛跡再構成に用いるテレスコープ を移動させると飛跡が変わるため、最初に移動させたテレスコープの位置補 正を再度行う。動かすテレスコープ 2 台の移動量が $\pm 1.0 \times 10^{-9}\mu$ m より小さ くなるまで位置の補正を繰り返し行った。 θ 方向

z軸周りの回転 θ の補正方法について説明する。再構成した飛跡が評価すべき テレスコープに入射した位置を(x', y')、ヒット位置を(x, y)とすると、(x, y)と(x', y')の関係は式 (4.3) で表される。

$$\begin{pmatrix} x'\\y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta\\\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x\\y \end{pmatrix}$$
(4.3)

 θ が微小であるとすると、 $\sin\theta \simeq \theta$ 、 $\cos\theta \simeq 1$ より、式 (4.4) となる。

$$x' - x = -\theta y \tag{4.4}$$

よって、y方向のヒット位置を横軸、residual を縦軸にとったプロットの傾き が θ となる。x方向とy方向の補正時と同様に最上流と最下流のテレスコー プの絶対座標軸上での位置を固定し、テレスコープ3台(テレスコープ0、1、 3)を用いて飛跡を再構成する。その飛跡を用いて図 4.6b のように、テレス コープ2について residual とy方向のヒット位置の相関を調べる。横軸の bin (bin 幅 1 μ m)毎に縦軸の平均を取り、その平均値と横軸各 bin の中央値を一 次関数でフィットし、傾き θ を求める。テレスコープ2を絶対座標軸上で θ 回 転させ、テレスコープ1も同じようにテレスコープ0、2、3を用いて飛跡を 再構成し、回転させる。回転させるテレスコープ2台の角度が $\pm 1 \times 10^{-7}$ rad より小さくなるまで回転の補正を繰り返し行った。



図 4.6: (a)3 台のテレスコープで飛跡を再構成したときの、残りの1 台のテレス コープでのトラックの入射位置とヒット位置との差。分布の平均値が原点に移動 するようにテレスコープの位置を移動させる。(b) 縦軸が x 方向の residual、横軸 が y 方向のヒット位置。赤い線が各 bin の平均をとった点で、これを一次関数で フィットしたときの傾きを θ とした。

x、y方向を補正すると θ がずれ、 θ を補正するとx、y方向がずれるので、二つの 補正を交互に行うことを繰り返す。本解析では、x方向とy方向の補正を P、回転 の補正を R、補正すべき 2 台のテレスコープをそれぞれ A、B とすると、[{ $(P_A \rightarrow P_B) \times 5$ } → { $(R_A \rightarrow P_B) \times 10$ }]を1 セットとして3 セット補正を繰り返した。ただし、ここで"→"は補正の順番を表す。そのときの移動値と回転角の変化を図4.7 に示す。x, y方向は移動量が $10^{-12}\mu$ m、 θ 方向は回転角が 10^{-8} rad 程度となったので、3 セットで十分補正できているとした。



図 4.7: (a)*x* と *y* の移動した値の変化。5回毎に回転の補正を行っている。(b)回転 角 *θ* の変化。10回毎に *x* と *y* 方向の補正を行っている。

4.1.5 最終的に得られる飛跡

Alignment によりテレスコープ同士の相対的な位置関係を求めた後、評価する テレスコープ以外のテレスコープのヒットを使用し、最終的な飛跡の再構成を行 う。この際もヒット位置の誤差はx、y方向については $50\sqrt{12}\mu$ m とし、z方向の 誤差は0として、alignmentの際と同じ手法でフィットを行い、飛跡を得た。再構 成した飛跡を用いて、残りの1台のテレスコープの性能評価を行う。

4.2 解析結果

再構成した飛跡を使用して検出効率と位置分解能の性能評価を行った。飛跡再 構成の結果と、性能評価の手法、解析の結果について述べる。

4.2.1 飛跡再構成の結果

クラスタサイズが1の事象が約70%を占め、クラスタサイズが2以上の事象の 位置分布も均一ではなくストリップ中心に偏っているため、図4.8に示すように、 飛跡の入射位置分布は離散的である。最終的な飛跡を用いた residual 分布を図4.9 に示す。再構成した飛跡の入射位置が離散的なために、その飛跡の入射位置が2つ のストリップ間の中心付近の場合は、図 4.9c、d、g、h のように residual 分布が 2 つに分かれてしまう。つまり実際には粒子が 2 つのピークの間の位置にも入射しているが、ヒット位置は離散的であるため実際の入射位置に 2 本のストリップどちらかの中心付近がヒット位置となる。



図 4.8: 飛跡の入射位置の分布の一部分。50µm 毎に離散的な分布になっている。



図 4.9: それぞれのセンサーの residual 分布。テレスコープ $0\sim3$ の x 方向の residual 分布が (a)(b)(c)(d)、テレスコープ $0\sim3$ の y 方向の residual 分布が (e)(f)(g)(h)。

4.2.2 検出効率

検出効率を求める際に使用する飛跡の条件を、飛跡再構成時のフィットの χ^2 /自 由度が5以下であること、飛跡の入射位置が有効領域にあることとした。ここで 有効領域はストリップの有感領域(センサー内の局所座標系で 1250μ m \sim 12800μ m) かつ粒子の入射数が少ないセンサーの端の領域を各センサーに応じて除いた領域 と定義する。またヒット位置と飛跡の入射位置との距離がある範囲内にあるとき、 ヒットと飛跡が一致していると定義し、検出効率を

efficiency(%) =
$$\frac{飛跡と-致しているヒットの数}{飛跡の数}$$
 (4.5)

と定義した。ヒット位置と飛跡の一致条件を最適化するために、ヒット位置と飛跡との間の距離の範囲の関数として検出効率を求めた。図 4.10 に示すように、飛跡とヒット位置の差が±400µm以上では検出効率がほぼ一定になる。そこで、この位置の差が±400µm以内の場合にヒットと飛跡が一致していると定義した。



図 4.10: ヒット位置と飛跡の入射位置との距離の範囲と検出効率の関係。(a) が *x* 方向のセンサー、(b) が *y* 方向のセンサーの検出効率である。

x方向y方向それぞれの検出効率をセンサー内の位置の関数として図 4.11 に示 す。また有効領域での検出効率の平均を表 4.1 に示す。この際、図 4.11c、d のよう に、信号を返さないストリップがあるとそのストリップ付近では検出効率が下がる ため、該当するストリップ位置から $\pm 400 \mu m$ に入射する飛跡は除いた。また、誤差 は位置による検出効率の誤差の平均とした。全てのセンサーで検出効率が 97%以 上であった。



図 4.11: センサー内での位置と検出効率の関係。(a)(c)(e)(g) が順にテレスコープ 0 から 3 の x 方向のセンサー、(b)(d)(f)(h) がテレスコープ 0 から 3 の y 方向のセ ンサーの検出効率である。

テレスコープ	x	y
0(最下流)	$98.94{\pm}0.02$	$99.28 {\pm} 0.02$
1	99.11 ± 0.02	$99.42 {\pm} 0.02$
2	$98.87 {\pm} 0.02$	$99.11 {\pm} 0.02$
3(最上流)	$97.52 {\pm} 0.03$	$98.58 {\pm} 0.02$

表 4.1: テレスコープの検出効率 [%]

4.2.3 位置分解能

まずクラスタサイズが1の場合の位置分解能について考察する。*x'* を入射位置、 *x* をヒット位置とするとストリップ間隔 *d* のセンサーでは、位置分解能は式 (4.7) で表される。

$$\sigma_{\rm pos}^2 = \frac{\int_{-d/2}^{d/2} (x' - x)^2 dx'}{\int_{-d/2}^{d/2} dx'}$$
(4.6)
$$d^2$$

$$= \frac{a^2}{12} \tag{4.7}$$

ここで粒子は均一に入射するとし、あるストリップの中心から $-d/2 \sim d/2$ の位置 に入射した粒子はそのストリップで検出されるものとする。また飛跡の再構成精 度は無限に高いとする。SVX4 テレスコープのストリップ間隔 d は 50μ m なので、 クラスタサイズが 1 の場合の位置分解能は $\sigma = 50 \sqrt{12} \approx 14.43\mu$ m が期待される。

次に重心法を用いて電荷分割した場合の位置分解能について説明する。クラス タサイズが2の場合を考えると、粒子の入射位置 *x* は式 (4.8) で表される。

$$x = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2}d$$
(4.8)

ここで、 Q_1 、 Q_2 はセンサーの左側から順にクラスタを構成するストリップの持つ 電荷量、d はストリップの間隔である。これより、位置分解能 δx は、

$$\delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial Q_1}\delta Q_1\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial Q_2}\delta Q_2\right)^2} \tag{4.9}$$

$$= d \frac{\sqrt{(Q_2 \partial Q_1)^2 + (Q_1 \partial Q_2)^2}}{(Q_1 + Q_2)^2}$$
(4.10)

となり、 ∂Q_1 と ∂Q_2 をセンサーからのノイズ N、信号の総量 $Q_1 + Q_2$ をS とすると、

$$\delta x = \frac{Nd}{S} \sqrt{1 - \frac{2Q_1 Q_2}{S^2}} \tag{4.11}$$

となる。ノイズの電荷量を閾値の電荷量とすると N は約 900e であり S は約 22000e なので、期待される位置分解能は約 $1.4 \sim 2\mu m$ となる。

residual 分布の標準偏差を $\sigma_{residual}$ とすると、テレスコープの位置分解能 (σ_{pos}) と飛跡の位置分解能 (σ_{track}) との間に、

$$\sigma_{\rm residual}^2 = \sigma_{\rm pos}^2 + \sigma_{\rm track}^2 \tag{4.12}$$

の関係がある。

飛跡の位置分解能はアラインメントの誤差、再構成に用いるテレスコープの位 置分解能、再構成に用いるテレスコープ複数台による寄与、そして多重散乱によ る寄与の重ね合わせである。多重散乱の寄与は、

$$\sigma_{\text{multiplescattering}} = \alpha \tan \theta_0 \tag{4.13}$$

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{MeV}}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}} [1 + 0.038 ln(\frac{x}{X_0})]$$
(4.14)

で表される。ここで α はテレスコープ間の距離、x はセンサーの厚さ、 X_0 はシリ コンの放射長 (=9.3cm) である。また運動量は p = 120 GeV、粒子は 1 台のテレス コープにつき 2 枚のセンサーを通過するので $x = 600 \mu \text{m}$ とする。テレスコープ間 の距離 α は 2mm か 21.3cm なので、

$$\sigma_{\text{multiplescattering}} = 8.12 \times 10^{-6} \times \alpha = \begin{cases} 0.0016 \mu \text{m} & (\alpha = 2 \text{mm}) \\ 1.7 \mu \text{m} & (\alpha = 21.3 \text{cm}) \end{cases}$$
(4.15)

と見積もった。飛跡の位置分解能に対する多重散乱の寄与は小さい。

 σ_{track} は飛跡再構成の際に誤差に各テレスコープの位置分解能を用いるため、 σ_{pos} の関数になっているので $\sigma_{\text{track}} = f(\sigma_{\text{pos}~i})$ とすると、

$$\sigma_{\text{residual}}^2 = \sigma_{\text{pos}}^2 + f(\sigma_{\text{pos}\ i})^2 \tag{4.16}$$

となる。ここで $\sigma_{\text{pos}\ i}$ は飛跡再構成に用いたテレスコープ i の位置分解能とする。 飛跡再構成の際に用いるテレスコープの位置分解能 $\sigma_{\text{pos}\ i}$ は未知なので、式 (4.16) において $\sigma_{\text{pos}\ i}$ を任意の入力値として変化させ、全ての事象について飛跡を再構成 し新たに σ_{residual} を求める。全てのテレスコープについて式 (4.16) の右辺が $\sigma_{\text{residual}}^2$ と等しくなるときの σ_{pos} の値をテレスコープの位置分解能として求める。この際、 σ_{residual} は -50μ m $\sim 50\mu$ m の範囲で計算した residual 分布の RMS を使用し、 σ_{track} は飛跡をフィットする際のパラメーターである縦軸の切片の誤差の平均値を使用し た。飛跡構成の際に入力する位置分解能を $\sigma_{\text{pos}\ input}}$ 、その値を用いて求められる 式 (4.16) の右辺の第一項を $\sigma_{\text{pos\ output}}}$ とすると、

$$\sigma_{\text{pos output}}^2 = \sigma_{\text{residual}}^2 - f(\sigma_{\text{pos input}})^2$$
(4.17)

となる。全てのテレスコープについて $\sigma_{pos input}$ と $\sigma_{pos output}$ の差が $\pm 1 \mu m$ 以内のと きに入力値 $\sigma_{pos input}$ をそれぞれのテレスコープの位置分解能とした。この方法で

得られた結果を表 4.2 に示す。テレスコープの位置分解能はおよそ $6\sim14\mu m$ となった。クラスタサイズ1の事象が大部分を占めているため、分解能としては $14\mu m$ 程度が予想値だが、テレスコープ2以外の分解能はその予想値より小さい。これは前述したように、飛跡を決める 3 台のテレスコープのクラスタサイズが1 ばかりのため飛跡が離散的になり、residual 分布のピーク幅が細くなってしまうためである。

テレスコープ	x			
	$\sigma_{ m pos~input}$	$\sigma_{ m pos~output}$	$\sigma_{\rm residual}$	σ_{track}
0	7	6.70	12.77	10.91
1	10	10.30	12.19	6.45
2	13	13.12	15.99	9.20
3	10	10.07	17.21	14.05
	y			
	$\sigma_{ m pos~input}$	$\sigma_{ m pos~output}$	$\sigma_{\rm residual}$	$\sigma_{ m track}$
0	6	5.81	10.57	8.74
1	8	8.16	10.15	5.55
2	14	13.99	16.65	9.19
3	10	9.42	17.68	15.08

表 4.2: テレスコープの位置分解能 [µm]

4.3 考察

4.3.1 TDC 値によるカットについて

本解析では TDC 値で事象を選別し一部の事象のみを解析に用いたが、TDC 値 によって ADC 値を補正すれば統計数を増やせる。図 4.1bの曲線を用いて、それぞ れの TDC 値のときの ADC 値の平均を取ることで、ADC 値が TDC 値によってど の程度下がっているかがわかる。これを用いて ADC 値を補正することができる。

4.3.2 ヒット位置の決定方法について

クラスタリング

図 4.3 に示すように、クラスタサイズ1のヒットが事象の大部分を占めている。 本解析では、クラスタに含まれる最大の電荷量を持つチャンネル以外のチャンネ ルの持つ電荷量も閾値を超えることを要求しているが、この制限によってクラス タサイズ1の事象が必要以上に多くなっているということが考えられる。クラス タリングを行う際に、最大の電荷量を持つチャンネルは電荷量が閾値を超えるこ とを要求するが、隣接するチャンネルは電荷量を持っていればクラスタに組み込 むという方法を取れば、クラスタサイズが2以上の事象が増える。これは位置分 解能の向上に繋がると予想する。

電荷分割法

図 4.4b に示すように、現在のヒット位置の決定方法では入射粒子の分布が不均 ーであるかのように見える。しかしビーム中の粒子がそのような不均一な分布を しているとは考えられないので、不均一さはヒット位置の決定方法に由来している と考えるのが自然である。そこでこれまでと同様の方法で飛跡の再構成を行った 後、飛跡と飛跡に最も近いストリップの中心の距離とクラスタ内の電荷の比の関 係を求めてみた。クラスタサイズ2の事象のみを使用して、図 4.12の関係を得た。 この関係をもとに、クラスタウの電荷比を入力にストリップの中心からの距離を 出力する Look up table を作成し、クラスタサイズ2の場合はこの Look up table を用いてヒット位置を決定した。こうして求めたヒット位置から飛跡の再構成を 再度行った。クラスタサイズ2の場合に、これまでと同様の方法を用いたときのス トリップ中心とヒット位置の距離の分布と、新たな手法で求めたヒット位置を用 いた時の分布を図 4.13 に示す。分布が大きく変化しないことから、Look up table を用いる方法でもヒット位置の改善は見込めない。正確なヒット位置を決定する ためには、高い位置分解能を持つ別の検出器を用意し、その検出器で再構成した 飛跡を用いて Look up table を作ることが望ましい。



図 4.12: クラスタサイズが2の場合のストリップ中心の距離と飛跡の入射位置の 差と、チャンネル番号が小さい方の電荷とクラスタが持つ電荷の比の関係。赤い 点は横軸のbin毎に縦軸の平均をとった点である。



図 4.13: テレスコープ0のx方向のセンサーのクラスタサイズ2の場合のヒット位置とストリップの中心との距離の差。(a) が重心法を用いた場合、(b) が新たに決定したヒット位置を用いた場合。

センサー間の距離

90 度ずらして重ねたセンサー同士が z 方向に 1mm 離れていることによる寄与 を考察する。1 台の SVX4 ボード内でのセンサー同士の位置関係を図 4.14 に示す。 本解析ではセンサー間の中間の位置をヒット位置としているが、それぞれのセン サーでの真のヒット位置はセンサーの中心であるとする。粒子の運動方向が z 軸に 平行な場合は x、 y 共に真のヒット位置は z 位置に無関係であるが、粒子が傾きを 持ってセンサーに入射している場合は、入射角の大きさによって真のヒット位置と 見かけ上のヒット位置が変わってしまう。粒子の入射角とヒット位置のずれの関係 を図 4.15 に示す。入射角が 0.05rad 以下であれば、ずれはストリップ幅 50 μ m より 小さくなりクラスタサイズ 1 の場合はこの効果は無視できる。本解析の alignment 手法では最上流と最下流のテレスコープの 2 台を基準に位置の補正を行っている ため、この 2 台の絶対座標上での位置関係が実際の位置関係とずれている場合に は実際の粒子の入射角度は求められない。このずれを補正するためには $x \ge y$ 方 向のセンサー間でのそれぞれの位置を飛跡情報を用いて外挿する必要がある。



図 4.14: SVX4ボード内でのセンサーの位置関係。× が解析で使用しているヒット 位置、オレンジの丸の位置がそれぞれのセンサーでの真のヒット位置。



図 4.15: 粒子の入射角と本解析で用いたヒット位置と真のヒット位置のずれの関係。

4.3.3 Alignment

補正を行った三方向の補正の正当性について述べる。alignment が正しく行われ ているか確かめるために簡易なシミュレーションを行った。シミュレーションの 手法について説明する。

- テレスコープ4台それぞれのxy平面がビーム軸方向に垂直に並んでいて、テレスコープの端がz軸上で揃っているとする。
- 事象毎に0~12800µmの中からランダムに値を2つ決め、2つの値をそれぞれx、y方向のヒット位置とする。この際、全てのテレスコープでxy平面上でヒット位置が同じ位置にあるとする。ヒット位置の分布が均一ではないため、ヒット位置が均一な分布(a)とヒット位置が50µm毎に離散的な分布(b)の2種類を作成した。
- 3. 飛跡の位置分解能は無限ではないため、各テレスコープで決定したヒット位置を $\sigma = 10 \mu m$ のガウス分布に従ってそれぞればらつかせる。
- 各テレスコープでx、y方向のずれ、z軸周りの回転角を任意に設定する。全ての事象で設定した値に応じて絶対座標軸上でテレスコープの位置を移動させる。

こうして生成したシミュレーションデータに対して alignment を行った。その結 果を表 4.3 に示す。表の値は、移動させた後のテレスコープの位置関係を示してい る。テレスコープ0と3は両端のテレスコープを表し、alignment では固定してい るので値が変わらない。

平行移動の alignment の精度は (a) 約 0.13μ m、 (b) 約 0.55μ m となった。回転の alignment の精度は (a) 約 4.5×10^{-5} rad、 (b) 約 1.5×10^{-4} rad となった。また実際の 補正の場合、最初に行う簡易な補正の後の両端のテレスコープの回転角度が同じ

であると仮定するが、回転角が異なれば、そのずれが alignment の精度に影響する ことが考えられる。

	tele0		tele1			
	x	y	θ	x	y	θ
初期値	40	0	0	39.2	40	0.0005
alignment で得られた値 (均一)	40	0	0	39.16	39.87	0.00050
alignment で得られた値 (離散的)	40	0	0	39.98	40.99	0.00034
		tele2			tele3	
			0			â
		y	θ	x	y	θ
初期値	$\begin{array}{c} x \\ 30.76 \end{array}$	-30	θ 0	$\frac{x}{30}$	$\begin{array}{c} y \\ 0 \end{array}$	θ 0
初期値 alignment で得られた値 (均一)	$\begin{array}{c} x\\ 30.76\\ 30.68 \end{array}$	<i>y</i> -30 -30.26	$\frac{\theta}{0}$ 4.5×10^{-5}		$\begin{array}{c} y \\ 0 \\ 0 \end{array}$	$\begin{array}{c} \theta \\ 0 \\ 0 \end{array}$

表 4.3: テレスコープの相対的な位置関係 [μm, θ]

本解析ではx, y、そしてz軸周りの回転という3方向のみ補正を行ったが、x軸 周りの回転、y軸周りの回転も補正が可能である。回転の補正ができているかどう かを確かめるために、x方向のセンサーの residual 分布に存在する2つのピークを 利用した。回転に関する alignment が正しく行われていれば、y方向のヒット位置 は residual に見られる2つのピークの位置によらず同じ分布を持つはずである。図 4.16 はテレスコープ3のx方向の範囲を $-30 \sim 0\mu$ m $\geq 20 \sim 40\mu$ m で分けたとき のそれぞれのyのヒット位置の分布で、y方向の分布が異なることがわかる。すな わち回転の補正が不十分であることを示している。よって、x, y軸周りの回転を 考慮する、もしくは現在のz軸周りの回転の補正方法の見直しが必要となる。x, y軸周りの回転はz軸周りの回転と同じ手法で補正を行うのが難しいため、補正す べき値をパラメーターとして χ^2 の最小化をはかる方法が必要になる。回転3方向 と平行移動3方向の移動値をパラメーターXとして、 $\partial\chi^2/\partial X = 0$ となるような Xの値を探すことで補正を行えば、全ての方向に対して alignment を行うことが でき、また全てのパラメーターを同時に補正することができる。



図 4.16: 青線の分布がテレスコープ3のx方向のセンサーの residual 分布の左側の ピークのときのy方向のセンサーの位置分布。赤線が右側のピークのときのy方 向の位置分布。

第5章 SVX4テレスコープを用いた ピクセル検出器の性能評価

SVX4テレスコープがテレスコープとして使えることを確認するために、2台の ピクセル検出器の性能評価を行った。

ビームテストで使用したピクセル検出器は、pバルクに n⁺ を埋め込んだ n-in-p 型のセンサーである。厚さ $320\mu m$ で、全空乏化電圧は 100V である。ピクセルは $80 \times 336 = 26880$ 個あり、その大きさは $250\mu m \times 50\mu m$ である。ピクセル検出器は、 各ピクセル毎に閾値を設定することができ、信号が閾値を超えていた時間を計測 することで Time Over Threshold (ToT) として電荷情報を読み出す。テレスコー プを用いた飛跡再構成の方法と、性能評価について以下で述べる。

5.1 飛跡再構成

入射粒子の飛跡の再構成はテレスコープの性能評価と同様に行う。

5.1.1 ヒット位置の決定

ピクセル検出器のヒット位置の決定方法について述べる。信号が閾値を超えた ピクセルにヒットがあったとみなす。各ピクセル検出器でヒット位置は一カ所と し、複数のピクセルでヒットがある場合はToTが最大のピクセルの中心の位置を *x、y*方向でのヒット位置とする。本解析ではクラスタリングは行わなかった。ま た、*z*方向のヒット位置はセンサーの中心とした。

5.1.2 Alignment

テレスコープの性能評価と同様に、テレスコープとピクセル検出器のそれぞれ の相対位置関係を求め、各テレスコープとピクセル検出器の位置を絶対座標上で 決める。x方向、y方向、z軸周りの回転 θ の3つの自由度を考慮し、alignment を 行う。テレスコープのみの alignment と同様に、テレスコープ0を基準としてセン サー同士の位置関係を求める。センサー同士の位置関係を求める際、テレスコープ 同士の場合はチャンネルの相関から補正を行ったが、ストリップ幅とピクセルサイ ズは異なるためヒット位置の相関から補正を行った。その後テレスコープのみで alignment を行い位置関係を補正したテレスコープ4台の絶対座標軸上での位置を 固定して、ピクセル検出器の詳しい補正を行う。手法はテレスコープのalignment 方法と同様である。また、飛跡再構成の際にピクセルのヒット位置の誤差は長辺 方向 (x 方向) は 250 $\sqrt{12}\mu$ m とし、短辺方向 (y 方向) は 50 $\sqrt{12}\mu$ m とした。z 方向 の誤差は 0 とした。

5.1.3 最終的に得られる飛跡

Alignment により検出器同士の相対的な位置関係を求めた後、4台のテレスコー プのヒットを使用し、最終的な飛跡の再構成を行う。この際、ヒット位置の誤差 は x、y 方向については第4章で求めた表 4.7 の位置分解能を使用し、z 方向の誤 差は0とした。再構成した飛跡を用いて、ピクセル検出器2台の性能評価を行う。

5.2 解析結果

再構成した飛跡を使用して検出効率と位置分解能の性能評価を行った。飛跡再 構成の結果と、性能評価の手法、解析の結果について述べる。

5.2.1 飛跡再構成の結果

最終的な飛跡を用いた residual 分布を図 5.1 に示す。飛跡の入射位置は離散的で あるため、residual 分布にも特徴的なピーク構造が存在する。このピークの幅が2 つのセンサー同士で違うのは、一方のセンサー (図 5.1a と図 5.1c) に比べてもう一 方のセンサー (図 5.1b と図 5.1d) の回転の補正があまり正確に行なえていないため である。また、x 方向の residual 分布では 50μ m の間に 2 つピークがあるが、これ は、2 つピークがある residual 分布を持つテレスコープがあるため、二通りの角度 の飛跡がそれぞれ 50μ m おきに分布しているためである。y 方向の residual 分布が 4 つに分かれているのも同じ理由である。

5.2.2 検出効率

検出効率を求める際に使用する飛跡の条件を、飛跡再構成時のフィットの χ^2 /自 由度が5以下であること、もう1台のピクセル検出器でもヒットと飛跡が一致して いることとした。ピクセル検出器もテレスコープと同様にあるタイミングによっ ては電荷が収集できないため、同じタイミングで動いているピクセル検出器にヒッ トがあるという条件を要求し、電荷が収集できないタイミングの事象を排除する。 検出効率はテレスコープと同様に定義し、ヒット位置と飛跡の一致条件を最適化 するために、ヒット位置と飛跡との間の距離の範囲の関数として検出効率を求め



図 5.1: それぞれのセンサーの residual 分布。(a)(c) が上流側センサーの x、y 方向、(b)(d) が下流側センサーの x、y 方向の residual 分布である。

た (図 5.2)。飛跡とヒット位置の差がx方向については $\pm 500 \mu m$ 以内、y方向については $\pm 400 \mu m$ 以内のときにヒットと飛跡が一致していると定義した。

センサー内での位置による検出効率の変化を図 4.11 に示す。また、図 4.11 に 示すように、ビームは一部にしか当たっていないため、有効領域をx方向、y方 向共にセンサーの端から 3000μ m~ 10000μ m とし、その領域での検出効率の平均 を求めると上流側のピクセル検出器は $97.91\pm0.03\%$ 、下流側のピクセル検出器は $97.00\pm0.04\%$ となり、共に 97%以上であることがわかった。

5.2.3 位置分解能

クラスタリングを行わなかった場合のピクセル検出器の位置分解能の期待値は、 式 4.7 より、x 方向は $\sigma = 250/\sqrt{12} \approx 72.17 \mu m$ 、y 方向は $\sigma = 50/\sqrt{12} \approx 14.43 \mu m$ となる。

residual 分布の標準偏差を $\sigma_{residual}$ とすると、ピクセルの位置分解能 (σ_{pos}) と飛 跡の位置分解能 (σ_{track}) との間には、

$$\sigma_{\rm residual}^2 = \sigma_{\rm pixel\ pos}^2 + \sigma_{\rm track}^2 \tag{5.1}$$



図 5.2: ヒット位置と飛跡の入射位置との距離と検出効率の関係。(a) が *x* 方向、(b) が *y* 方向の検出効率である。





の関係がある。そこで飛跡をフィットする際のパラメーターbの誤差の平均を飛跡 の位置分解能 σ_{track} として、 σ_{residual} はx方向は residual 分布の-150 μ m~150 μ m で の RMS、y方向は -50μ m~50 μ m での RMS として、式 5.1 からピクセル検出器の 位置分解能 σ_{pos} を求めた。その結果を表 5.1 に示す。x方向、y方向共に位置分解 能は期待値とよく一致しており、SVX4 テレスコープがテレスコープとして機能し ていることを実証できた。

表 5.1: ピクセル検出器の位置分解能 [µm]

ピクセル	x	y
0	$73.00 {\pm} 0.11$	$15.48 {\pm} 0.27$
1	72.74 ± 0.11	15.44 ± 0.27

5.3 考察

5.3.1 ヒット位置の決定方法について

ピクセル検出器でも ToT の値を用いればクラスタリングを行える。最大の ToT を持つピクセルを選んだ後、そのピクセルに閾値を超える電荷を持つピクセルが 隣接していれば、そのピクセルをクラスタに組み込む。更にそのピクセルに隣接 するピクセルが閾値を超える電荷を持っていれば組み込むことを繰り返してクラ スタリングを行う。クラスタのヒット位置はクラスタ内にあるピクセルの電荷の 値の重み付き平均とする。こうすることで、ピクセル検出器の位置分解能を上げ ることが可能になり、その場合はテレスコープの位置分解能も更に高い値が必要 となる。

第6章 結論

ATLAS アップグレード用シリコン検出器の試験のために、日本グループが開発 している SVX4 テレスコープについて性能評価を行い、検出効率と位置分解能を 求めた。

検出効率は全てのセンサーで 97%以上、位置分解能は 6~14µm となった。位置 分解能は予想される値と比べ大きくなった。原因としては、電荷分割法の手法に 問題があること、alignment が十分でないことが考えられる。

また、SVX4 テレスコープを用いてピクセル検出器の評価を行い、テレスコープ として使えることを確認した。ピクセル検出器の検出効率は97%以上であると求 めた。ピクセル検出器の位置分解能は短辺方向で約15µm、長辺方向で約73µm と なり、期待される値とよく一致した。テレスコープより位置分解能の低い検出器 については位置分解能を求めることができ、テレスコープとして使用できること を実証した。

謝辞

本研究を進めるにあたって、山中卓教授には素晴らしい研究環境を与えていた だき、また実験に関する考え方や姿勢を教えていただきました。本当にありがと うございました。

指導教官である花垣和則教授には研究の開始から今に至るまで熱心な指導をし ていただきました。研究内容だけでなく研究の進め方、研究成果のまとめ方など 仔細にわたり様々なアドバイスをしていただき非常に感謝しております。本当に ありがとうございました。

KEKの海野義信さん、池上陽一さん、安芳次さん、中村浩二さんにはシリコン 検出器に関する知識を教えていただいたり、研究内容に対して様々な助言をいた だきました。特に中村さんにはビームテストの際も本当にお世話になり、参考に なる他検出器の解析方法やATLAS実験のアップグレードに関する話を教えていた だいたりと非常に感謝しています。本当にありがとうございました。

ATLAS 大阪大学グループの同期である矢島和希くんにはテレスコープの試験を 共にやっていたこともあり、研究に関することを議論したり相談にのってもらうこ とが本当に多くあり、そのおかげでここまで研究を進めることができました。ス タッフの山口洋平さん、先輩である石島直樹さん、Teoh Jia Jian さんには多くの 助言をいただきました。また元 ATLAS 大阪グループの遠藤理樹さん、荒井泰貴さ んにもプログラミングに関する知識などの助言をいただき、解析方法について議 論をしてもらったりと非常にお世話になりました。後輩の今坂俊博くんには、研 究の話をしたり質問をもらうことでたくさんの刺激をもらいました。

助教の外川学さん、スタッフの小野峻さん、村山理恵さん、杉山泰之さん、辻 嶺二さん、宮崎康一くん、原口弘くん、森哲平くんには違う実験グループではあ りますが、機会がある毎に研究に関するたくさんの助言や指摘をいただきました。 また、元山中卓研究室の佐藤和史さんには解析の手法やプログラミングに関する 助言をたくさんいただきました。ありがとうございました。

4年生の佐藤友太くん、澤田恭範くん、西宮隼人くん、留学生の Diana Seitova さんが卒業研究に励む姿にもたくさんの刺激をもらいました。

秘書の川原さんには、様々な事務手続きで大変お世話になり、面倒な頼み事な ども聞いていただきました。ありがとうございました。

最後に、私の研究生活を支えてくれた全ての方々に感謝とお礼を申し上げます。 本当にありがとうございました。



- [1] The ATLAS Collaboration, [The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider], JINST 3 S08003 (2008).
- [2] The ATLAS Collaboration, [Letter of Intent for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Experiment], (2012).
- [3] L. Christofek, K. Hanagaki, et al. [SVX4 User 's Manual], D0NOTE 4252 (2005).
- [4] 矢島和希, [ATLAS 実験アップグレード用シリコン検出器の試験システムの開発], 大阪大学修士論文 (2016)
- [5] Fermilab Test Beam Facility. http://ftbf.fnal.gov.