ピクセル検出器評価のための
飛跡再構成テレスコープの位置分解能の研究

大阪大学大学院　理学研究科物理学専攻
山中卓研究室　博士前期課程 2 年

山元　大生

2018 年 2 月 1 日

概要

スイス・ジュネーブ郊外に建設された陽子陽子衝突型加速器 Large Hadron Collider (LHC) の衝突点の一つには ATLAS 検出器がある。ATLAS 実験グループは、ヒッグス粒子の性質や標準模型を越える物理の探索を行っている。その研究をさらに推進するために、2026 年頃から LHC の高輝度化が予定されている。ATLAS 検出器では、最内層に位置するピクセル型半導体検出器をアップグレードし、ピクセルサイズを 50 μm 角に小型化する。小型化されたピクセル検出器の性能を評価するために、粒子の飛跡再構成のため別のデバイス（テレスコープ）がある。このテレスコープは、センサー厚 300 μm、ストリップ幅 50 μm のストリップ型半導体検出器である。2 枚のセンサーを組み合わせて 1 層とし、ビーム荷電粒子の通過位置を測定し、計 4 層で飛跡を再構成する。先行研究では、荷電粒子ビームに垂直に設置した場合、1 層での位置分解能は 9.8 μm であった。

本研究では、テレスコープの位置分解能を向上させるために、通過荷電粒子が 2 枚のストリップにまたがるようにテレスコープを傾け、電荷出力の大きさで重み付けをし、位置を再構成した。エネルギー 120 GeV の陽子ビームを用いて実験をした結果、傾けたテレスコープの位置分解能は 5 $\sim$ 7 μm に向上し、飛跡分解能は 3 μm と求まった。また、センサーのノイズ量、電離損失の揺らぎ、多重散乱の位置分解能への寄与について考察した。

目次

第 1 章　序論 1

1.1　LHC 実験 1

1.1.1　HL-LHC 計画 1

1.1.2　ATLAS 検出器 2

1.1.3　ATLAS 内部飛跡検出器とアップグレード 2

1.2　本研究の目的 4

第 2 章　飛跡再構成用半導体検出器 7

2.1　シリコンセンサー 7

2.2　信号読み出し用 ASIC SVX4 8

2.3　データ取得 10

第 3 章　位置分解能 13

3.1　入射角と位置分解能 13

3.1.1　垂直入射の場合 13

3.1.2　斜め入射の場合 14

3.2　電気的ノイズと位置分解能 15

3.3　電離損失の揺らぎと位置分解能 17

3.4　多重散乱の効果 18

第 4 章　テレスコープ位置分解能評価試験 22

4.1　試験の目的 22

4.2　ビームテスト施設 22

4.3　セットアップ 22

4.3.1　検出器固定用治具 25

4.3.2　冷却システム 26

第 5 章　テレスコープ位置分解能評価試験のデータ取得 28

5.1　データの取得条件 28

5.2 読み出し閾値の決定 29
5.3 マスクチャンネルの決定 29
5.4 タイミング調整 30

第 6 章 テレスコープ位置分解能評価試験のデータ解析 33
6.1 チャンネル毎のペデスタル測定と電荷変換 33
6.1.1 ペデスタル測定 33
6.1.2 電荷変換 34
6.2 オフラインマスク 34
6.3 クラスタリング 36
6.3.1 オフライン閾値の設定 36
6.3.2 クラスターサイズ 37
6.4 グローバル座標への変換 38
6.5 アライメント 41
6.5.1 位置補正 41
6.5.2 回転補正 43
6.5.3 補正の繰り返し 46
6.6 データ数と各事象選別 48
6.7 位置分解能 49
6.7.1 検出器の位置分解能 49
6.7.2 飛跡の位置分解能 53
6.8 回転角の見積もりと電荷分割の様子 54
6.8.1 回転角の見積もり 54
6.8.2 電荷分割の様子 56
6.9 分解能の入射位置依存 57

第 7 章 結論 66

謝辞 67

参考文献 68

図目次

1.1 LHC と各検出器 [10] 2
1.2 ATLAS 検出器 [3] 3
1.3 内部飛跡検出器全体 [3] 3
1.4 ピクセル型検出器 4
1.5 現行の内部飛跡検出器のレイアウト [3] 5
1.6 HL-LHC で予定されている内部飛跡検出器のデザイン 5

2.1 ストリップ型シリコンセンサー 8
2.2 SVX4 の 1 チャンネルの回路図 9
2.3 Preamp の出力電圧の変化 10
2.4 SVX4 とセンサーの接続 11
2.5 データ読み出し用 SEABAS2 と Daughter Board 12
2.6 TDC 値 12

3.1 荷電粒子の斜め入射の様子 15
3.2 電気的ノイズによる検出位置の誤差と電荷分割の比の関係 16
3.3 荷電粒子の通過するシリコンの厚みと電離損失するエネルギーの分布におけるピーク値 (MPV) に対する半値全幅の比の関係 [11] 17
3.4 電離損失の揺らぎによる検出位置の誤差と電荷分割の比の関係 18
3.5 1 層目または 4 層目で散乱される場合の飛跡再構成への寄与 19
3.6 2 層目または 3 層目で散乱される場合の飛跡再構成への寄与 19
3.7 2 層目と 3 層目で散乱される場合の飛跡再構成への寄与 20

4.1 フェルミ国立加速器研究所の加速器 23
4.2 テレスコープとピクセル検出器の距離 24
4.3 TLU の信号受け渡しの概略図 24
4.4 検出器固定台と冷却ボックス 25
4.5 テレスコープ回転治具 26

4.6 テレスコープの回転の様子 26
4.7 冷却ボックス 27

5.1 ある ASIC の各チャンネルのペデスタルの分布とノイズ量の分布 30
5.2 ヒット数と読み出す Pipeline の関係 31
5.3 トリガーと SVX4 動作クロックのタイミングによる ADC 値の変化 32
5.4 ADC 値と TDC 値の相関 32

6.1 チャンネル毎の ADC 値の分布 34
6.2 あるチャンネルのペデスタル分布 35
6.3 2 つのペデスタルピークを持つチャンネルの ADC 値の分布 35
6.4 2 つのペデスタルピークを持つチャンネルの ADC 値と Pipeline ID の相関 36
6.5 あるセンサーの最大電荷を持つチャンネルの電荷量 37
6.6 各センサーのクラスターサイズの分布 39
6.7 クラスターの合計電荷の分布 40
6.8 グローバルヒット位置への変換方法 40
6.9 1 層目のセンサーのグローバルヒット位置 41
6.10 グローバル位置の Z 座標と X 方向の位置補正量 42
6.11 グローバル位置の Z 座標と Y 方向の位置補正量 43
6.12 飛跡再構成における直線フィット時の χ^2 分布 44
6.13 位置補正の方法 44
6.14 2 層目の Y 方向の残差分布 45
6.15 回転角が正しく反映されていない場合のトラック位置が並ぶ軸とヒット位置が並ぶ軸の関係 46
6.16 2 層目のトラック位置の X 座標と残差 X の相関 47
6.17 Z 軸周りの回転の残差に対する影響 48
6.18 2 層目のトラック位置の X 座標と残差 Y の相関 49
6.19 3 層目の位置補正量の変化 50
6.20 3 層目の X, Y 軸周りの回転補正量の変化 50
6.21 3 層目の Z 軸周りの回転補正量の変化 51
6.22 アライメント後の各センサーの残差分布 52
6.23 X 方向のトラック位置とローカルヒット位置の相関 55
6.24 Y 方向のローカルヒット位置とグローバルヒット位置の差と X 方向のグローバルヒット位置の相関 55
6.25 Y 方向のトラック位置とローカルヒット位置の相関 56

6.26 2 層目の電荷量とローカル座標に対応させたトラック位置の相関 58
6.27 4 層目の電荷量とローカル座標に対応させたトラック位置の相関 59
6.28 2 層目のクラスターの合計電荷量のトラック位置依存 60
6.29 4 層目のクラスターの合計電荷量のトラック位置依存 60
6.30 2 層目のローカル座標に対応させたトラック位置とローカル座標に対応させたグローバルヒット位置の相関 61
6.31 2 層目のトラック位置とグローバルヒット位置の残差とローカル座標に対応させたトラック位置の相関 62
6.32 4 層目のローカル座標に対応させたトラック位置とローカル座標に対応させたグローバルヒット位置の相関 63
6.33 4 層目のトラック位置とグローバルヒット位置の残差とローカル座標に対応させたトラック位置の相関 63
6.34 2 層目の残差平均と入射位置の相関 64
6.35 2 層目の残差の RMS と入射位置の相関 64
6.36 4 層目の残差平均と入射位置の相関 65
6.37 4 層目の残差の RMS と入射位置の相関 65

表目次

2.1 テレスコープに用いられているストリップ型のシリコンセンサーの詳細 . 8

6.1 取得データ量と取得条件 33
6.2 テレスコープの各層の位置と回転角 38
6.3 各事象選別と事象数 48
6.4 テレスコープの各層の位置分解能 53
6.5 見積もったテレスコープの回転角 54

第 1 章

序論

本章ではまず、Large Hadron Collider (LHC) の概要と High Luminosity LHC (HL-LHC) 計画について述べる。次に、ATLAS 検出器の概要と内部飛跡検出器について述べ、HL-LHC 計画に向けた内部飛跡検出器のアップグレードについて述べる。最後に本研究の目的を述べる。

1.1 LHC 実験

LHC は、欧州原子核機構 (CERN) にある周長 27 km の陽子・陽子衝突型加速器である。LHC の 4 つの陽子陽子衝突点には ATLAS 、ALICE 、CMS 、LHCb の検出器が設置され、ヒッグス粒子の性質測定や、新物理の探索を行っている。位置関係を図 1.1 に示す。2018 年現在、重心系エネルギー 13 TeV で運転しており、世界最高の衝突エネルギーを達成している。また、瞬間ルミノシティの設計値は $1 \times 10^{34}\ \mathrm{cm^{-2}s^{-1}}$ であるが、2017 年にはこれを越える $2.06 \times 10^{34}\ \mathrm{cm^{-2}\ s^{-1}}$ の瞬間ルミノシティを達成した [1]。

1.1.1 HL-LHC 計画

HL-LHC は、2026 年頃から予定されている、LHC のビーム輝度を向上させる計画である。これにより、実験取得データの統計を増やし、より精密なヒッグス粒子の性質測定やより高いエネルギー領域での新物理探索を行う。瞬間ルミノシティは LHC 設計の約 7 倍を予定しており、 $7.5 \times 10^{34}\ \mathrm{cm^{-2}s^{-1}}$ となる [2]。10 年間のデータ取得期間で、$4000\ \mathrm{fb^{-1}}$ の積分ルミノシティを目標とする [2]。

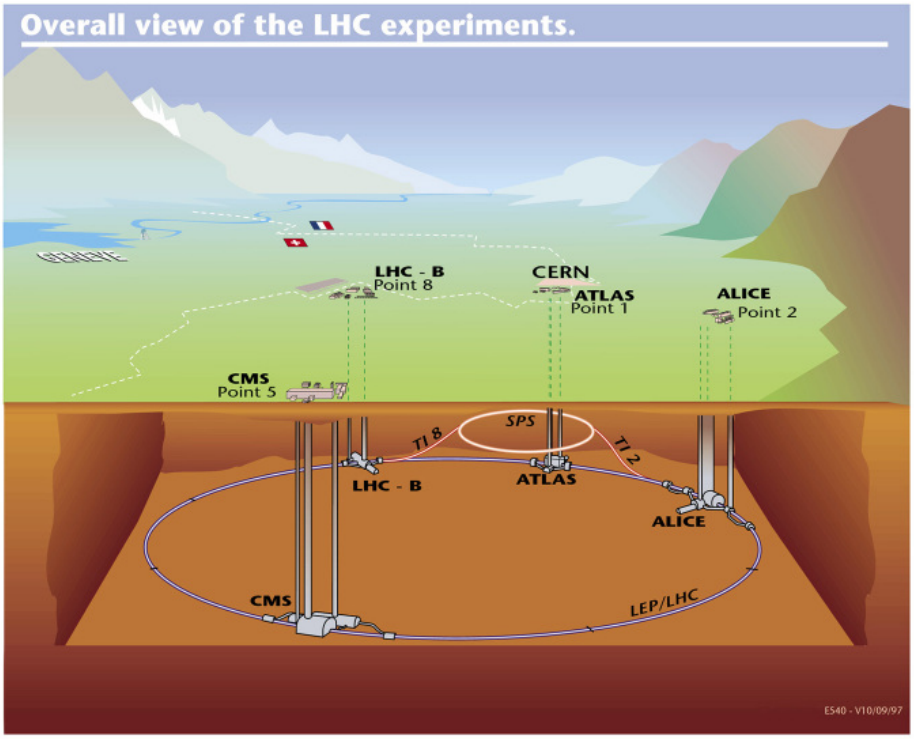


図 1.1　LHC と各検出器 [10]

1.1.2　ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は、ヒッグス粒子の性質測定、標準模型の検証、超対称性粒子や余剰次元模型などの新物理の探索を目的とした検出器である。図 1.2 に外観と大きさを示す。中央に陽子陽子衝突点があり、外に向かって内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミューオン検出器と続く。

1.1.3　ATLAS 内部飛跡検出器とアップグレード

内部飛跡検出器は中心から順に、ピクセル型検出器、SemiConductor Tracker (SCT)、Transition Radiation Tracker (TRT) という構造になっている。内部飛跡検出器の構造を図 1.3 に示す。

最内層に位置するピクセル型検出器は、格子状に細分割された信号読出しにより 2 次元の位置情報が取得可能な半導体検出器である。SCT はストリップ型の半導体検出器であり、1 次元の位置情報を取得する。TRT はストローチューブ型のガス検出器である。ピクセル型検出器は図 1.4 に示すように、barrel 4 層と 3 層 1 組の end-cap disk 2 組から構成される。SCT は barrel 4 層と、9 層 1 組の end-cap 2 組から構成されている。TRT はスト

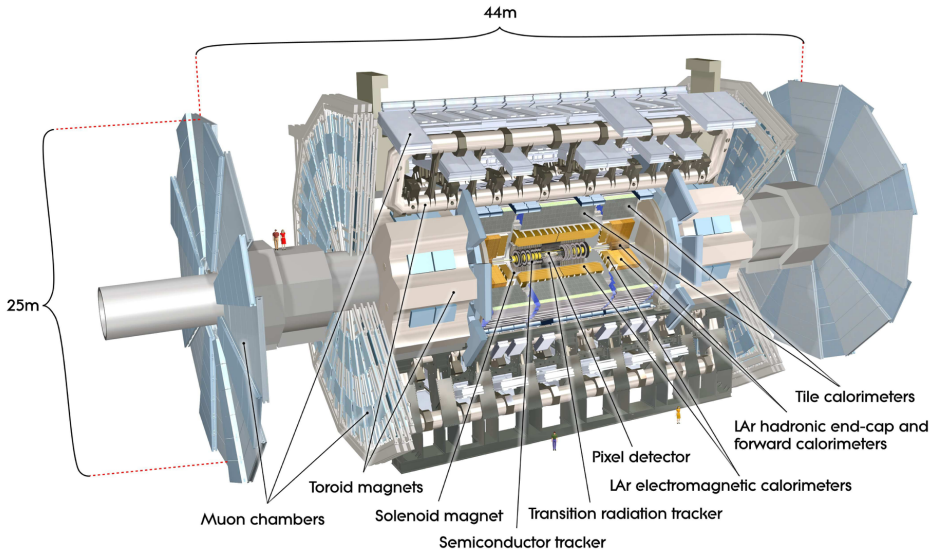


図 1.2　ATLAS 検出器 [3]

ローチューブが並んだ層を barrel 部、end-cap 部それぞれに持つ。これらの各検出器からの情報を用いて、衝突点で発生した荷電粒子の飛跡を決定する。これにより、陽子陽子の衝突点や二次生成粒子の崩壊点の位置を測定する。外部にあるソレノイド磁石が内部飛跡検出器領域に磁場を作る。この強さと飛跡の曲率から粒子の運動量を決定する。

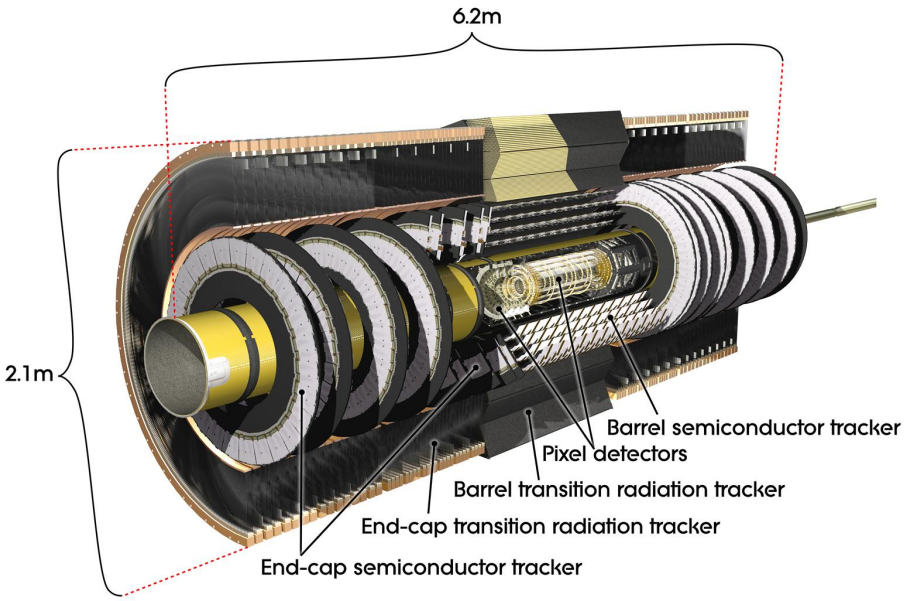


図 1.3　内部飛跡検出器全体 [3]

HL-LHC 計画に伴った検出器のアップグレードとして、内部飛跡検出器の総入れ替えを予定している。TRT は撤去され、内部飛跡検出器は全てピクセル型検出器とストリッ

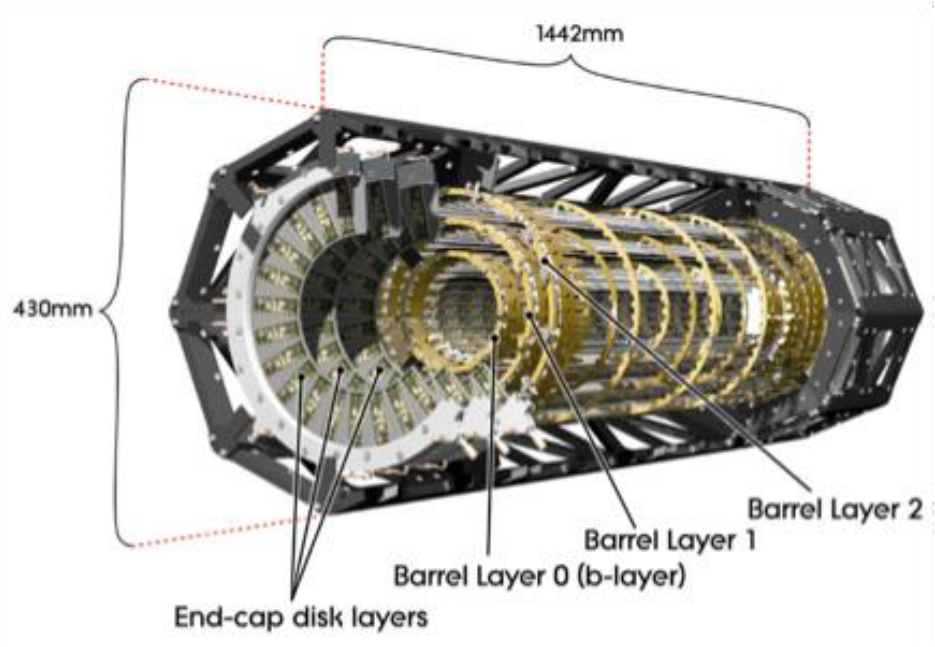


図 1.4　ピクセル型検出器 [3]　※ 2014 年に追加された IBL は含まれていない。

プ型検出器になる。現行の検出器のレイアウトを図 1.5 に、HL-LHC 時のデザインを図 1.6 に示す。ピクセル型検出器とストリップ型検出器を組み合わせることにより、擬ラピディティー[*1] $|\eta| < 4$ までのトラッキング領域を達成する。

HL-LHC における衝突事象数の増加は以下の 2 点の問題を生む。

- 放射線環境が厳しくなり、現行の検出器の耐えうる放射線損傷[*2]を超える。
- 検出器のヒット占有率[*3]が上がり、粒子の飛跡候補が増え、飛跡再構成の精度が下がる。

これらを解決するために、放射線耐性の高い、目の細かい (ピクセルサイズの小さい) ピクセル型検出器を開発している。開発は試作版の製造と性能評価が並行して行われている。

1.2　本研究の目的

ATLAS 日本グループでは、HL-LHC に向けて、最内層に位置するピクセル型半導体検出器のアップグレードを計画しており、ピクセルサイズを 50 μm 角に小型化する。ピク

[*1] ビーム軸周りの角を方位角、ビーム軸とのなす角を極角 θ とし、擬ラピディティー $\eta = -\ln\tan(\theta/2)$ と表される。

[*2] ここでは、半導体結晶中に欠陥準位を作ることを指す。

[*3] 1 事象における、各検出器の全チャンネルのうち検出されたチャンネル数の割合。LHC は 40 MHz で陽子陽子衝突を起こしているが、一回の衝突で生成される粒子が増えるため、検出される粒子数も増える。

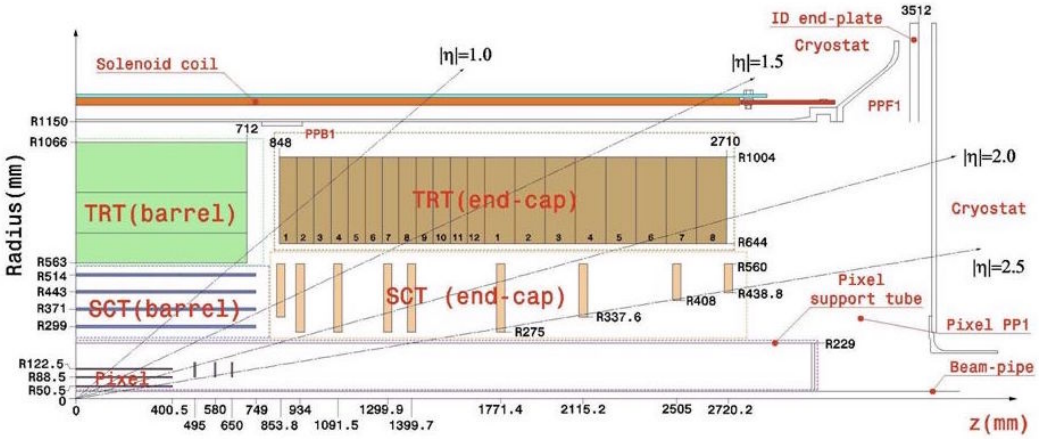


図 1.5　現行の内部飛跡検出器のレイアウト [3]

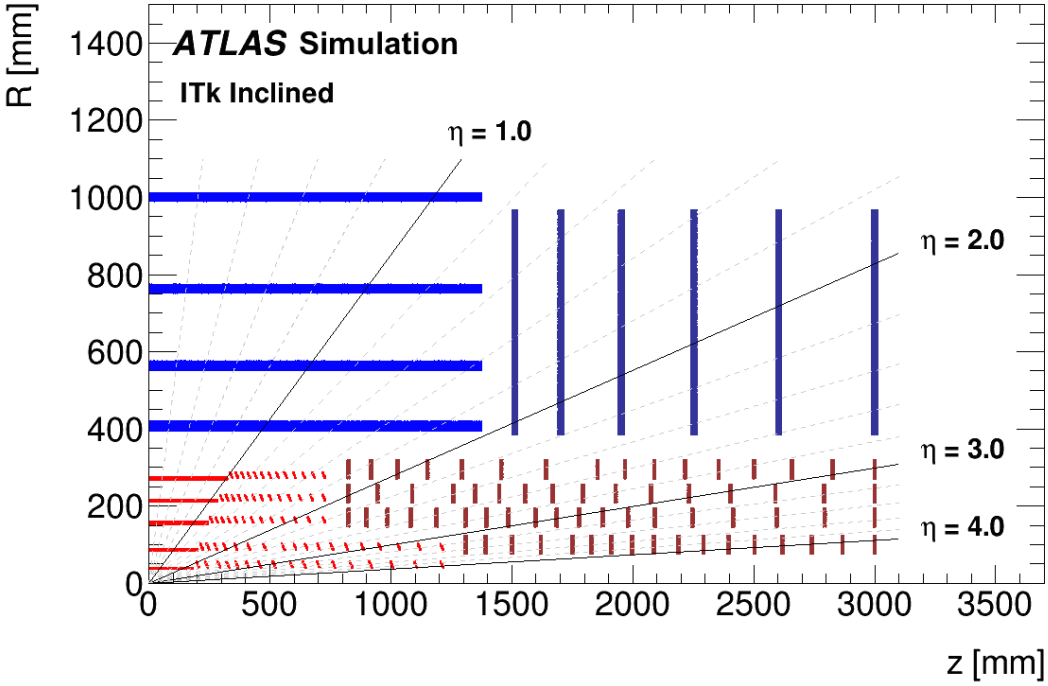


図 1.6　HL-LHC で予定されている内部飛跡検出器のデザイン。赤はピクセル型検出器を、青はストリップ型検出器を示す。それぞれ濃い色が End-cap 部分を示す [2]。

セル型検出器の性能評価のためには、高い運動量を持つ荷電粒子ビームを用いて試験を行う。評価対象のピクセル型検出器の他に、粒子の飛跡を再構成するための検出器 (テレスコープ) を用いて荷電粒子の入射位置を特定し、ピクセル型検出器の検出効率の入射位置依存性を評価する。本実験で用いるテレスコープは、センサー厚 300 μm、ストリップ幅 50 μm のストリップ型半導体検出器である。2 枚の直交するセンサーを組み合わせて 1 層とし、ビーム荷電粒子の通過位置を測定し、計 4 層で飛跡を再構成する。先行研究 [7, 8] では、荷電粒子ビームに垂直に設置した場合、1 層での位置分解能は 9.8 μm であった。

本研究では、HL-LHC で用いるピクセル型検出器のピクセル境界や、ピクセル内部の配線などの構造による影響を調査するためにテレスコープの位置分解能を向上させる。このため、通過荷電粒子が 2 枚のストリップにまたがるようにテレスコープを傾けた。垂直入射の場合、信号の読み出しは 1 つのストリップに限定され、測定位置は 50 μm のストリップ幅により制限される。これに対し、センサーを荷電粒子に対して傾けることにより、電荷出力の大きさで測定位置に重み付けをして粒子の通過位置を評価することができる。この場合、位置分解能はセンサーの電気的ノイズや電離損失の揺らぎによって決まる。本論文では評価試験や評価方法について述べ、ストリップ型シリコンセンサーの位置分解能の評価をする。

第 2 章

飛跡再構成用半導体検出器

本章では、本研究で用いたストリップ型半導体検出器について述べる。本研究で用いた検出器はシリコンセンサー、信号読み出しチップ、データ読み出しボードから構成されている。初めにシリコンセンサーの動作原理について述べ、次に信号読み出しチップの仕組みとデータ取得方法を述べる。

2.1 シリコンセンサー

本研究で用いた検出器はストリップ型のシリコンセンサーである。図 2.1 にその模式図を示す。半導体は PN 接合に対し、逆バイアス電圧をかけて電子ホールのキャリアを排除する。キャリアの排除された領域を空乏層と呼び、全領域を空乏層化するために必要な電圧を全空乏層化電圧と呼ぶ。荷電粒子の通過に伴い生成された電子ホール対は電場勾配に従って移動する。電子ホール対の移動により Al 電極側に電荷が誘起される。SiO_2 での絶縁を介してシリコンと Al 電極を AC 結合させ、信号を読み出す。Al 電極は 50 μm 間隔で配置されており、読み出した電極の位置から荷電粒子の入射位置の 1 次元情報を得ることができる。

本研究で用いた検出器は、ストリップが直交するように 2 枚のセンサーを組み合わせることにより、実質的に 2 次元情報を得ている。これを 1 層とし、計 4 層を用いて荷電粒子の飛跡を再構成する。これらの検出器群をテレスコープと呼ぶ。表 2.1 に検出器に用いられているセンサーの詳細を示す。

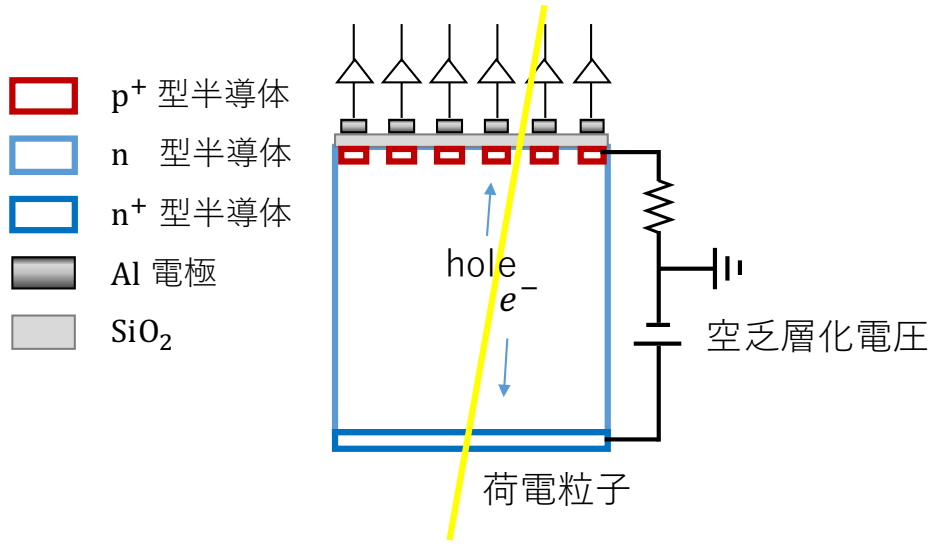


図 2.1　ストリップ型シリコンセンサー。黄色の線は荷電粒子の飛跡を示す。p^+ 型、n^+ 型は不純物濃度が高いシリコンである。SiO_2 は Al 電極とシリコンを絶縁する。

表 2.1　テレスコープに用いられているストリップ型のシリコンセンサーの詳細

ストリップ間隔	50 μm
ストリップ幅	10 μm
センサー厚	300 μm
ストリップ数	256 本
有感領域 (面積)	13 mm × 15.4 mm
全空乏層化電圧	約 80 V

2.2　信号読み出し用 ASIC SVX4

各ストリップ (チャンネル) から取り出した電気信号は、SVX4 と呼ばれる ASIC[*1] で読み出される。図 2.2 に SVX4 の内の 1 チャンネル分の読み出し回路を示す。

Preamp はシリコンセンサーからの電荷を図 2.2 preamp 部のコンデンサーに蓄え、電圧に変換する。図 2.3 に示すように、センサーからの信号が来る度にこのコンデンサーに電荷が蓄積され、それに応じて Preamp 出力電圧が変化する。たまった電荷は 46μs の周期で開放し、出力電圧の飽和を防ぐ。電荷解放に 200 ns を要し、この間データ収集はでき

[*1] Application Specific Integrated Circuit の略称。ここではセンサーからの電気信号を処理する集積回路を指す。

ない。

Pipeline は、125 ns (動作クロックの周期) 毎に Preamp の出力電圧の変化分を順次記録する。図 2.3 では、動作クロック番号 1 や 4 での記録が、センサーからの電荷入力に対応する。図 2.2 中央の 46 個の記録用コンデンサーには ID があり、SVX4 の動作クロックに合せて異なる ID のコンデンサーに順次切り替える。この他にペデスタル用のコンデンサーが 1 つあり、Preamp の電荷解放時に充電される。記録用コンデンサーとペデスタル用コンデンサーの差をとることにより、動作クロックより長い周期の電気回路のノイズを打ち消す[*2]。トリガー信号を受け取ると、決められたクロック数だけ遡ったタイミングに相当するコンデンサーから信号を読み出す。タイミングはトリガーを出力する装置に依存し、セットアップに従って遡るクロック数を決める。実際の調整について 5.4 節で述べる。

ADC は Pipeline から読み出した電気信号をデジタル情報に変換する。SVX4 は 8bit の ADC を搭載している。

センサーのストリップと SVX4 ASIC の入力をチャンネル毎にワイヤーボンディングで接続している。センサーのストリップは 256 チャンネルあり、SVX4 は 128 チャンネルを読み出すので、1 枚のセンサーに 2 枚の ASIC を接続している。図 2.4 にセンサーと SVX4 の接続を示す。

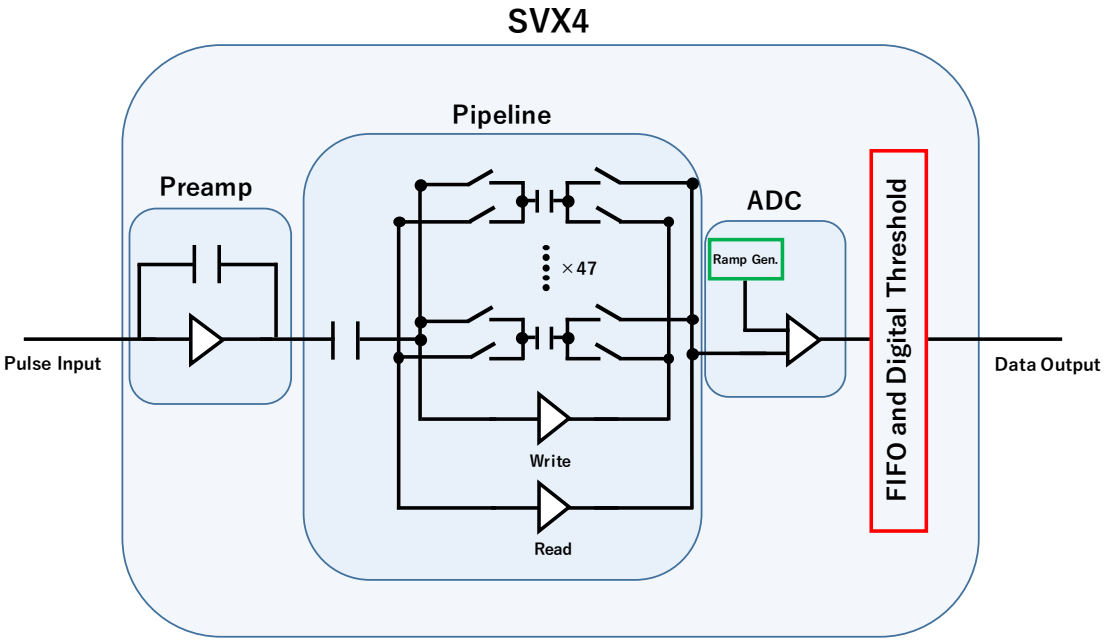


図 2.2　SVX4 の 1 チャンネルの回路図 [6]

[*2] Double Correlated Sampling と呼ばれる。

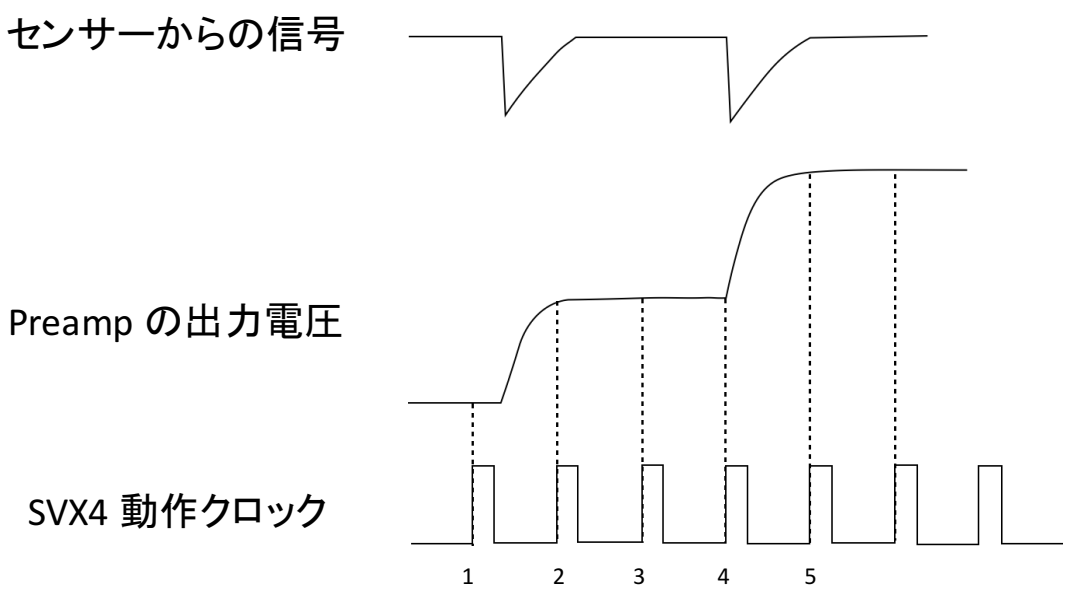


図 2.3　Preamp の出力電圧の変化

2.3　データ取得

SVX4 から出力されるデータは、汎用読み出しボード SEABAS2 に送られ処理された後に、PC へ送られる。図 2.5 にテレスコープと SEABAS2 の接続を示す。各テレスコープと SEABAS2 は、フラットケーブルと Daughter Board を用いて接続する。

先行研究 [7, 9] により、SEABAS2 を用いた SVX4 向けの読み出しシステムが開発された。TDC を SEABAS2 内の FPGA に実装しており、図 2.6 に示すように、SVX4 動作クロックの立ち上がりをスタート信号、トリガー信号の立ち上がりをストップ信号としている。TDC は 160 MHz でカウントされる。ストップ信号を受け取るまでに次の動作クロックに移った場合、TDC のカウントはリセットされる。SVX4 動作クロックは 8 MHz であるので、TDC のカウントは 0 から 19 の値をとる。この TDC 値により、トリガーと動作クロックの位相関係がわかる。

PC では SEABAS2 からの情報のデコードと記録をソフトウェアによって行う。

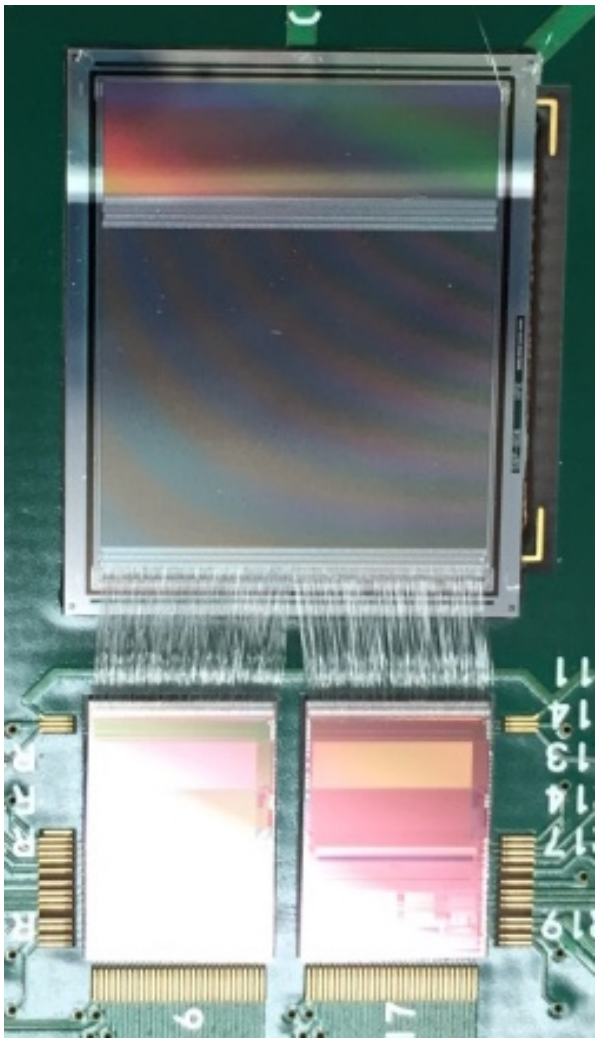


図 2.4　SVX4 とセンサーの接続。図の上部がセンサーであり、センサー下部からワイヤーボンディングにより 2 枚の SVX4 に接続している。

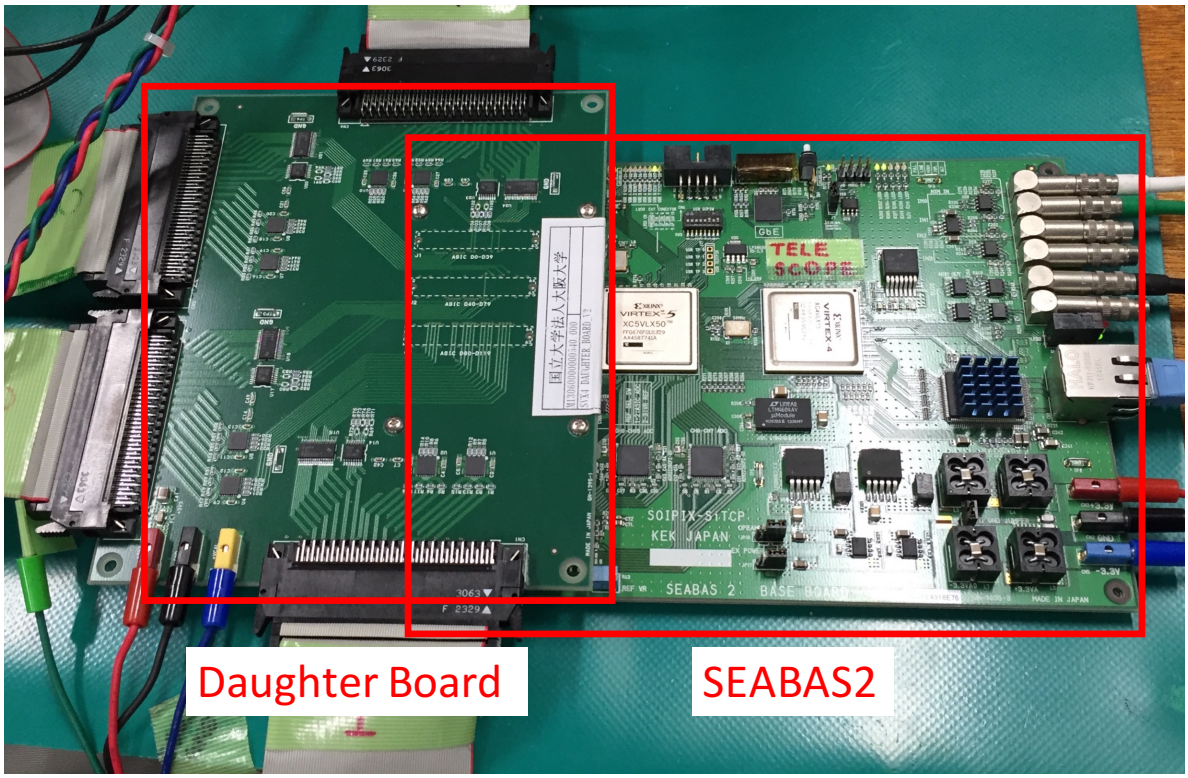


図 2.5　データ読み出し用 SEABAS2 と Daughter Board

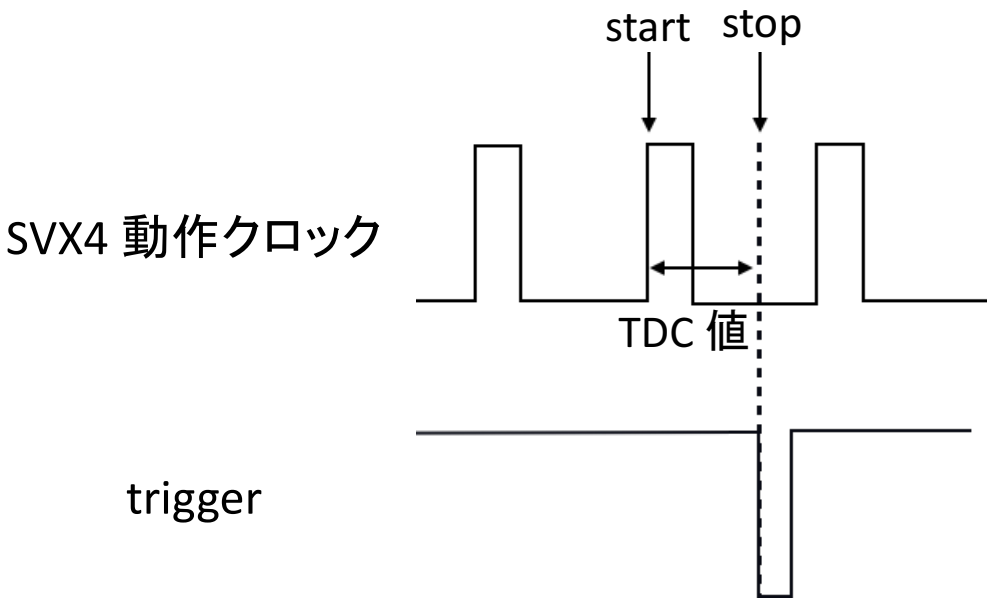


図 2.6　TDC 値

第 3 章

位置分解能

この章では、期待されるテレスコープの位置分解能について述べる。はじめに、荷電粒子の検出器に対する入射角と位置分解能について述べる。電荷重心法を用いて検出位置を決定する場合、センサーや ASIC の電気的ノイズの寄与や電離損失の揺らぎが位置分解能に寄与し、それぞれについて本研究で用いた半導体検出器に沿って評価する。

3.1 入射角と位置分解能

期待される位置分解能について、荷電粒子の入射角に注目して述べる。

3.1.1 垂直入射の場合

注目する 1 つのストリップ (幅 d とする) に 1 つの荷電粒子が一様に入射する場合を考える。ストリップ境界部を除き、入射荷電粒子は当該ストリップ 1 つにシグナルを作る。読み出したストリップの左端 (原点に近い方の端点) の位置を x_0 とする。荷電粒子の入射位置は一様に分布するので、存在確率密度 P は入射位置 x に依らず、以下のようになる。

$$P = \frac{1}{d} \tag{3.1}$$

入射位置の期待値 $E(x)$ は、

$$\begin{aligned} E(x) &= \int_{x_0}^{x_0+d} P\, x\, dx \\ &= x_0 + \frac{1}{2} \end{aligned} \tag{3.2}$$

となる。従って、位置分解能 σ_x は、

$$\begin{aligned} {\sigma_x}^2 &= \int_{x_0}^{x_0+d} P \times (x - E(x))^2 dx \\ &= \frac{d^2}{12} \end{aligned} \tag{3.3}$$

よって、

$$\sigma_x = \frac{d}{\sqrt{12}} \tag{3.4}$$

$d = 50\ \mu\mathrm{m}$ なので、

$$\sigma_x \sim 14\ \mu\mathrm{m} \tag{3.5}$$

となる。先行研究 [7, 8] では、隣接するストリップに電荷が収集されている可能性を考慮して、シグナルが検出されたストリップの両隣の電荷出力も解析に用いた。3 つのストリップの位置を電荷出力で重み付けをし検出位置を決めた場合、位置分解能は 9.8 μm であった。

3.1.2 斜め入射の場合

センサーの検出面を荷電粒子ビームに対して傾け、荷電粒子が必ず 2 ストリップを通過するようにした場合、それらの電荷情報からより良い位置分解能が得られると期待される。以下では、図 3.1 に示すように、センサー面に対して荷電粒子が $\arctan\left(\frac{50\ \mu\mathrm{m}}{300\ \mu\mathrm{m}}\right) \sim 10$ 度の角度で入射する場合を考える。この場合、荷電粒子は入射位置に依らずちょうど 2 つのストリップにシグナルを作る。図 3.1 において、荷電粒子が通過する 2 つのストリップ上での通過距離を $l_1,\ l_2$ 、2 つのストリップの左端 (原点に近い方の端点) の位置を $x_1,\ x_2$、それぞれのストリップで読み出される電荷量を $Q_1,\ Q_2$ $(Q_1,\ Q_2 > 0)$ とする。

最小電離損失粒子 (Minimum Ionizing Particle, MIP) が入射し、生成される電子ホール対の数が通過距離に比例する場合、$l_1 : l_2 = Q_1 : Q_2$ である。荷電粒子の通過位置の左端 (原点に近い方の端点) を x とすると、

$$\begin{aligned} x &= \frac{x_1 l_1 + x_2 l_2}{l_1 + l_2} \\ &= \frac{x_1 Q_1 + x_2 Q_2}{Q_1 + Q_2} \end{aligned} \tag{3.6}$$

となる。

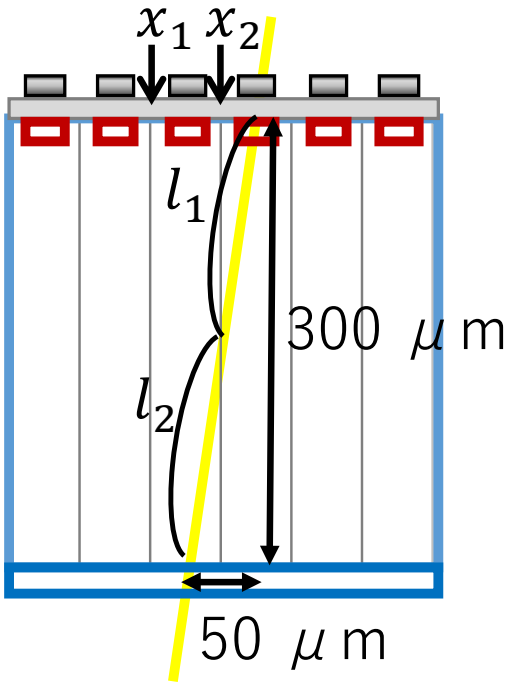


図 3.1　荷電粒子の斜め入射の様子

3.2　電気的ノイズと位置分解能

読み出される電荷には、センサーや ASIC のノイズ、荷電粒子のシリコン中での電離損失の揺らぎによりごさが s 位置分解能は悪化する。読み出される電荷の誤差を $\delta Q_1, \delta Q_2$ とすると、検出位置の誤差 δx は、

$$\begin{aligned}\delta x &= \sqrt{\left(\frac{(x_1-x_2)Q_2}{(Q_1+Q_2)^2}\right)^2 \delta Q_1^2 + \left(\frac{(x_2-x_1)Q_1}{(Q_1+Q_2)^2}\right)^2 \delta Q_2^2} \\ &= \frac{x_2-x_1}{(Q_1+Q_2)^2}\sqrt{Q_2^2\,\delta Q_1^2 + Q_1^2\,\delta Q_2^2}\end{aligned} \tag{3.7}$$

となる。

読み出される電荷の誤差がノイズ量 N のみに起因する場合、$\delta Q_1 = \delta Q_2 = N$, $Q_1 + Q_2 = S$, $x_2 - x_1 = d$ とすると、

$$\begin{aligned}\delta x &= \frac{dN}{S^2}\sqrt{Q_2^2 + Q_1^2} \\ &= \frac{dN}{S}\sqrt{1 - \frac{2Q_1Q_2}{S^2}}\end{aligned} \tag{3.8}$$

ここで、$Q_1 = S - Q_2$ とすると、

$$Q_1 Q_2 = -\left(Q_2 - \frac{S}{2}\right)^2 + \frac{S^2}{4} \tag{3.9}$$

であり、δx は $Q_1 Q_2$ が最小のとき、すなわち $Q_2 = S, 0$ のとき、最大になるので、

$$\delta x < \frac{dN}{S} \tag{3.10}$$

となる。MIP が 300 μm 厚のシリコンを通過するとき、約 22000 個の電子ホール対を生成する [6] [*1]。$d = 50\ \mu\mathrm{m},\ S \sim 22000$ electron, $N \sim 800$ electron[*2] とすると、

$$\delta x \sim 1.8\ \mu\mathrm{m} \tag{3.11}$$

となる。横軸を $\frac{Q_1}{Q_1+Q_2}$、縦軸を δx とすると図 3.2 のようになる。電荷分割の際、$Q_1 = Q_2$ となるとき、この寄与は最小になる。

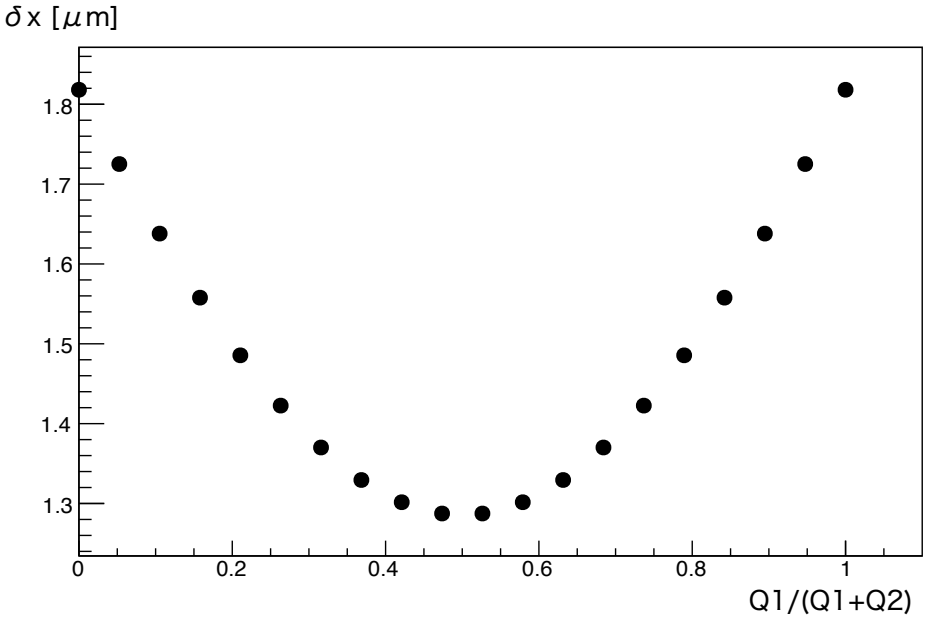


図 3.2　電気的ノイズによる検出位置の誤差と電荷分割の比の関係

[*1] 荷電粒子の半導体内通過距離は入射角に依存するが、10 度前後の場合、寄与は小さい。

[*2] 6 章 図 6.2 のノイズ量と 1 枚目の SVX4 ASIC に設定したゲイン $\sim$ 515 electron/ADC カウント より決めた。

3.3　電離損失の揺らぎと位置分解能

読み出される電荷の誤差が荷電粒子のシリコン中での電離損失の揺らぎに起因する場合を考える。電離損失の揺らぎはランダウ分布で与えられる。実際の揺らぎの幅は、薄い物質ではランダウ分布の予測より広いことが報告されており、Most Probable Value (MPV) に対する半値全幅 (Full Width Half Maximum, FWHM) の比と通過するシリコンの厚みの関係は図 3.3 のようになる [11] 。式 (3.7) より、$Q_1 + Q_2 = S$, $x_2 - x_1 = d$ とすると、

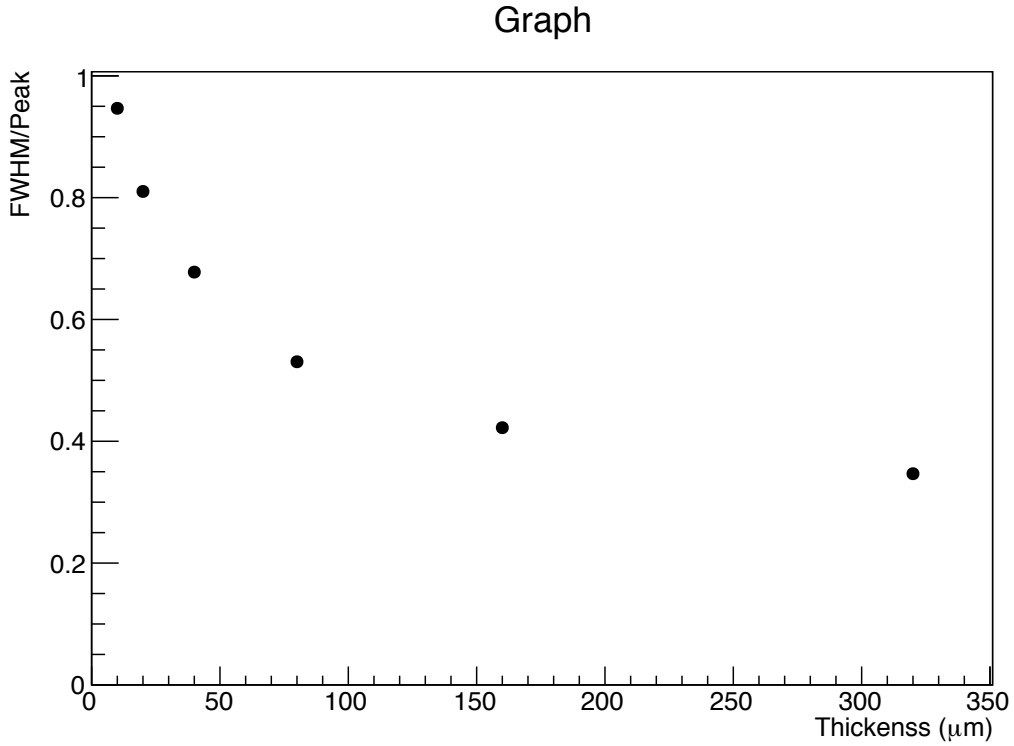


図 3.3　荷電粒子の通過するシリコンの厚みと電離損失するエネルギーの分布におけるピーク値 (MPV) に対する半値全幅の比の関係 [11]。横軸は荷電粒子の通過するシリコンの厚み、縦軸は電離損失するエネルギーの分布をランダウ分布としたときの MPV に対する半値全幅の比を表す。

$$\delta x = \frac{dQ_1Q_2}{S^2}\sqrt{\left(\frac{\delta Q_1}{Q_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q_2}{Q_2}\right)^2} \tag{3.12}$$

となる。図 3.3 から外挿して求めた値を用いて、$\frac{\delta Q}{Q} = \frac{\mathrm{FWHM}/2}{\mathrm{MPV}}$ として式 (3.12) を評価した。横軸を $\frac{Q_1}{Q_1+Q_2}$、縦軸を δx とすると図 3.4 のようになる。従って、

$$\delta x < 3.5\ \mu\mathrm{m} \tag{3.13}$$

となる。

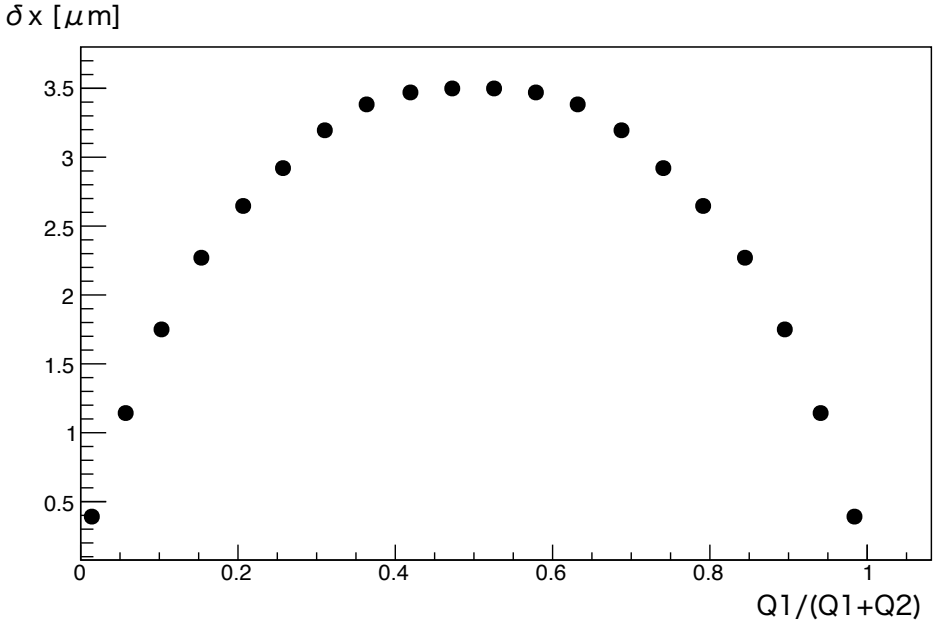


図 3.4　電離損失の揺らぎによる検出位置の誤差と電荷分割の比の関係

3.4　多重散乱の効果

本研究で用いるテレスコープは、検出器 4 層の構成である。検出器の位置分解能は、評価対象の検出器を除く 3 層で荷電粒子の飛跡再構成を行い評価する。飛跡から求まる対象の検出器における粒子の通過位置と対象の検出器の検出位置の差 (残差) の分布の幅は各検出器の位置分解能に依存している。

多重散乱を無視し、飛跡が Z 軸に平行で各検出器の位置分解能が同程度と仮定すると、残差分布の標準偏差と飛跡の位置分解能、検出器の位置分解能の関係は式 (3.15) で表される。

$$\sigma_{1residual}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_{track}^2 \tag{3.14}$$

$$= \sigma_1^2 + \left(\frac{\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2}}{3} \right)^2 \tag{3.15}$$

ここで、$\sigma_{1residual}$ は 1 層目の検出器の残差分布の幅、$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ は 1, 2, 3, 4 層目の検出器の位置分解能、σ_{track} は飛跡の位置分解能である。

荷電粒子が検出器によって多重散乱される場合を考える。本研究で用いたテレスコープは 4 層であり、図 3.5 に 1 層目または 4 層目で散乱される場合を示す。この場合、 4 層で検出される検出位置は直線上に並ぶので、散乱は飛跡再構成に寄与しない。従って、2

層目または 3 層目で散乱される場合のみを考える。図 3.6 に 2 層目または 3 層目で散乱される場合を示す。2 層目のみで散乱される場合、その後直進する。従って、想定される飛跡は 2、3、4 層目の検出位置を結ぶ直線になる。このとき、1 層目の検出位置が飛跡からずれる。3 層目のみで散乱される場合、1、2、3 層目までは直線上に検出位置が存在する。従って、想定される飛跡は 1、2、3 層目の検出位置を結ぶ直線になる。このとき、4 層目の検出位置が飛跡からずれる。次に、2 層目と 3 層目の両方で散乱される場合を考える。2 層目と 3 層目の散乱が起こる点を固定して考える。すると、多重散乱による揺らぎは、1 層目と 4 層目の検出位置に寄与する。

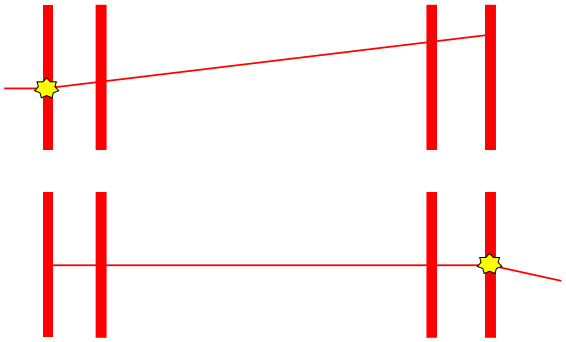


図 3.5　1 層目または 4 層目で散乱される場合の飛跡再構成への寄与

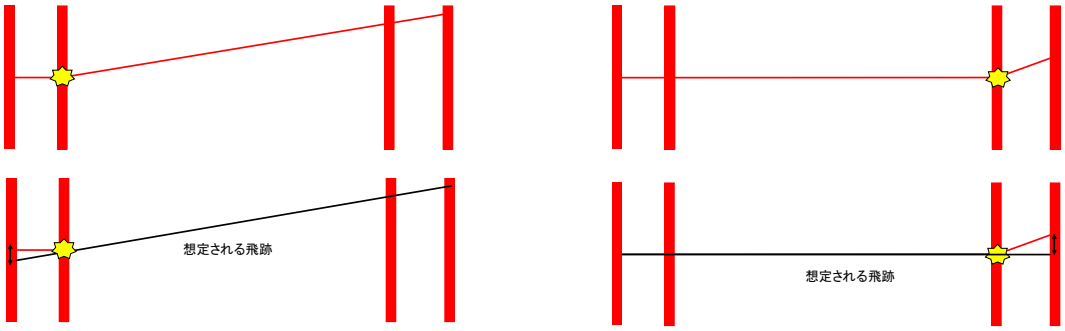


図 3.6　2 層目または 3 層目で散乱される場合の飛跡再構成への寄与

多重散乱の寄与を、式 (3.16)(3.17) で評価した。

$$\theta^{rms} = \frac{13.6[\mathrm{MeV/c}]}{\beta cp} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \tag{3.16}$$

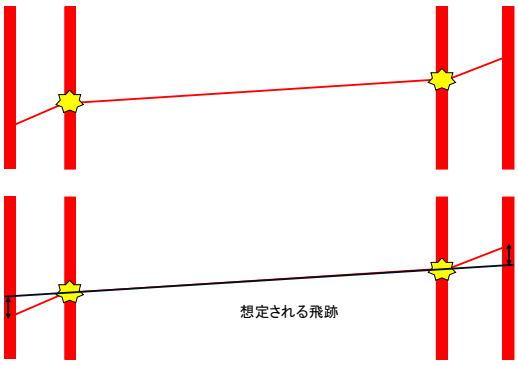


図 3.7　2 層目と 3 層目で散乱される場合の飛跡再構成への寄与

$$\delta_{scat} = \tan(\theta^{rms}) \times d_{layer} \tag{3.17}$$

ここで、θ^{rms} は散乱角の幅、c は光速、β は入射粒子の速度と光速の比、p は入射粒子の運動量、z は入射粒子の電荷、x はシリコンの厚み 、X_0 はシリコンの放射長 9.37 cm、δ^{scat} は散乱による位置の誤差、d_{layer} は層間の距離とした。距離の近い X 方向と Y 方向の 2 枚のセンサーをひとまとめにし、600 μm 厚のシリコンセンサーとすると、散乱角は、

$$\theta^{rms} = 9.1 \times 10^{-6}\ \mathrm{rad} \tag{3.18}$$

となる。1, 4 層目での多重散乱による位置の誤差を $\delta_{scat1}, \delta_{scat4}$ とすると、1 層目と 2 層目の距離、3 層目と 4 層目の距離 (図 4.2 より) から 、

$$\delta_{scat1} \sim 0.82\ \mu\mathrm{m} \tag{3.19}$$
$$\delta_{scat4} \sim 0.73\ \mu\mathrm{m} \tag{3.20}$$

となる。

多重散乱の寄与を含めると、式 (3.15) は、

$$\sigma^2_{1residual} = \sigma^2_1 + \sigma^2_{track} \tag{3.21}$$
$$= (\sigma^2_1 + \delta^2_{scat1}) + \left(\frac{\sqrt{\sigma^2_2 + \sigma^2_3 + (\sigma^2_4 + \delta^2_{scat4})}}{3} \right)^2 \tag{3.22}$$

となる。他の層についても同様に、

$$\sigma^2_{2residual} = \sigma^2_2 + \left(\frac{\sqrt{(\sigma^2_1 + \delta^2_{scat1}) + \sigma^2_3 + (\sigma^2_4 + \delta^2_{scat4})}}{3} \right)^2 \tag{3.23}$$

$$\sigma^2_{3residual} = \sigma^2_3 + \left(\frac{\sqrt{(\sigma^2_1 + \delta^2_{scat1}) + \sigma^2_2 + (\sigma^2_4 + \delta^2_{scat4})}}{3} \right)^2 \tag{3.24}$$

$$\sigma^2_{4residual} = (\sigma^2_4 + \delta^2_{scat4}) + \left(\frac{\sqrt{(\sigma^2_1 + \delta^2_{scat1}) + \sigma^2_2 + \sigma^2_3}}{3} \right)^2 \tag{3.25}$$

となる。従って、外側の 1, 4 層目で評価する残差は、内側の層に比べて大きくなる。式 (3.22)-(3.25) の連立式を解くことで、各検出器の位置分解能が求まる。

第 4 章

テレスコープ位置分解能評価試験

本章では、荷電粒子ビームを用いたテレスコープの位置分解能評価試験 (ビームテスト) について述べる。まず、本研究におけるビームテストの目的を述べ、ビームテストで利用した施設について述べた後、実験のセットアップについて述べる。

4.1 試験の目的

本試験の目的は、HL-LHC で使用する 50 μm 角ピクセル検出器の検出効率の評価と、テレスコープの位置分解能の測定である。また、位置分解能の入射位置依存性を調べた。荷電粒子ビームに対して、SVX4 搭載のテレスコープを傾けた試験を初めて行った。

4.2 ビームテスト施設

2017 年 1 月 20 日から 2 月 7 日にかけてフェルミ国立加速器研究所にてビームテストを行った。フェルミ国立加速器研究所が有する加速器を図 4.1 に示す。研究所内には、ビームテスト可能な共用の施設 Fermilab Test Beam Facility (FTBT) がある。120 GeV の陽子を Main Injector から 60 秒毎に 4.2 秒間取り出している。本実験ではセンサーや基板の物質による荷電粒子の多重散乱を抑えるため、最も運動量の大きい 120 GeV の陽子ビームを直接使用した。ビームの強度は約 $1 - 300$ kHz の範囲で変更可能であり、テレスコープの最大データ取得レート 20 kHz を考慮し、強度を約 $5 - 40$ kHz とした。

4.3 セットアップ

陽子ビームの上流から順に、トリガーカウンター 2 台、テレスコープ 2 台、50 μm 角ピクセル検出器 1 台、テレスコープ 2 台、トリガーカウンター 2 台を設置した。図 4.2 にテレスコープとピクセル検出器の距離を示す。トリガーカウンターは高エネルギー加速器研

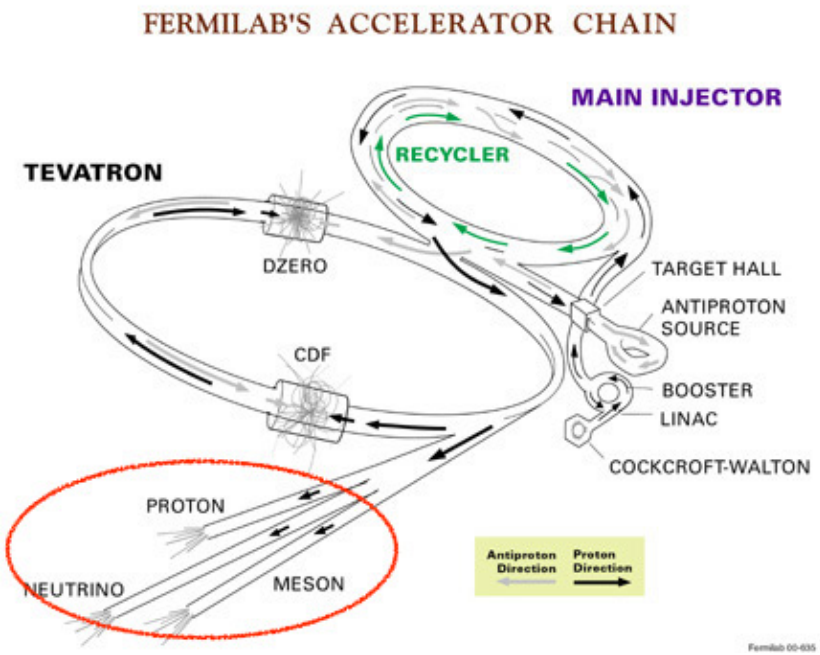


図 4.1　フェルミ国立加速器研究所の加速器 [4]。赤色の丸で囲われた領域に FTBF が所在する。

究所が準備したものを用いた。

トリガーカウンター

トリガーカウンターには、直交させた 2 cm × 3 cm のプラスチックシンチレーターを用いた。シンチレーター内には波長変換ファイバーが埋め込まれており、シンチレーターで起こる発光を Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) と呼ばれる半導体検出器を用いて読み出した。4 台全ての coincidence を要求してデータ取得を行うと、トリガーレートがビームの強度に対して極端に低く、検出効率の悪いトリガーカウンターを含んでいることがわかった。従って、検出効率の悪い 1 台を除いて、3 台 の coincidence を取りデータ取得を行った。

テレスコープ

テレスコープについては、2 章に述べた。多重散乱による寄与を小さくするため、テレスコープ間の距離は可能な限り小さくした。テレスコープとピクセル検出器の距離は後述する冷却ボックスの大きさによって制限されている。テレスコープはビーム通過領域を切り抜いたアルミ製の筐体に入っている。

50 μm 角ピクセル検出器

50 μm 角ピクセル検出器は、ビームに対してセンサー面を垂直に設置した。センサー厚は 150 μm である。ピクセル検出器は冷却が必要であり、冷却ボックス内に設置した。テレスコープの評価に用いたデータの取得の際にもビーム上に設置した。

Trigger Logic Unit (TLU)

TLU は、各検出器に対してトリガー信号と BUSY 信号の受け渡しを行う。各検出器と TLU の信号受け渡しの概略図を図 4.3 に示す。トリガー信号は、荷電粒子の通過時にトリガーカウンターから出力される。BUSY 信号は各検出器がデータ取得可能かどうかを示す信号である。トリガー信号の coincidence を取り、各検出器からの BUSY 信号を確認し、各検出器にトリガー信号を配る。

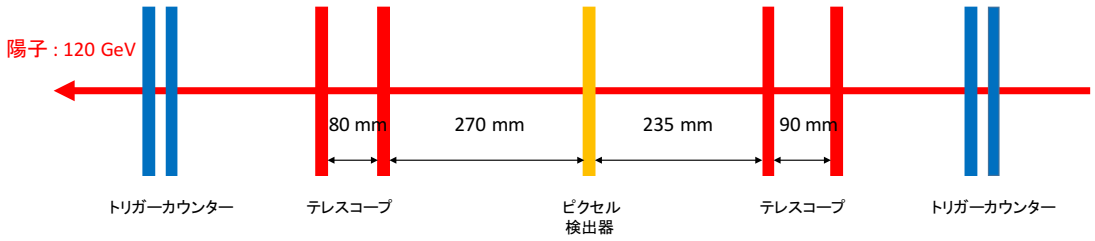


図 4.2　テレスコープとピクセル検出器の距離

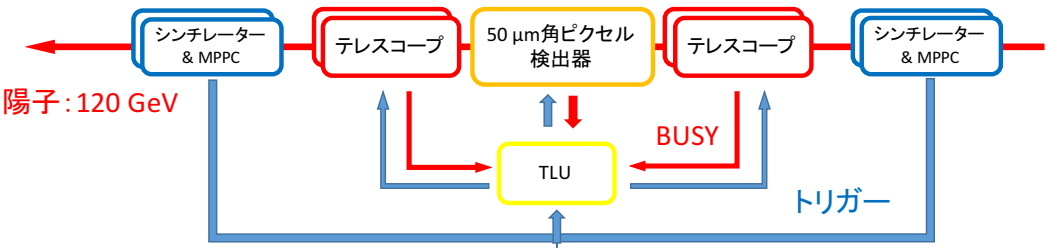


図 4.3　TLU の信号受け渡しの概略図

4.3.1　検出器固定用治具

ビームテストでは、粒子ビームに対して全ての検出器を一列に整列し固定する必要がある。このため共通の土台としてアルミ合金のフレームを用いて、各検出器のセンサー中心が揃えられるように固定治具を設計、製作した。

図 4.4 に各検出器の設置の様子を示す。また、図に示した通り、ビーム上流から下流へ向かう方向を Z 軸方向、鉛直上向きを Y 軸方向とし、右手系に従い X 軸方向を定める。

テレスコープは、2 章で述べたようにビームに対してセンサー面を傾けた。図 4.5 に示すアルミニウムのステージで、Y 軸周りの回転を与えた後に X 軸周りの回転を与えた。実際に回転している様子を図 4.6 に示す。回転角の精度はアルミニウムのステージの加工精度から、およそ 0.5 度である。センサーのビームに対する回転角には、ビームに対する土台のフレーム傾きも寄与する。

全ての検出器の設置位置には、治具の加工精度や取り付ける際の精度等によってずれが生じる。これはビームデータを用いて補正 (アライメント) することができるため、治具による設置精度は、1 mm を目指した。補正方法や結果、補正が十分にできる範囲に設置できていたかは、6 章 6.5.1 節で述べる。

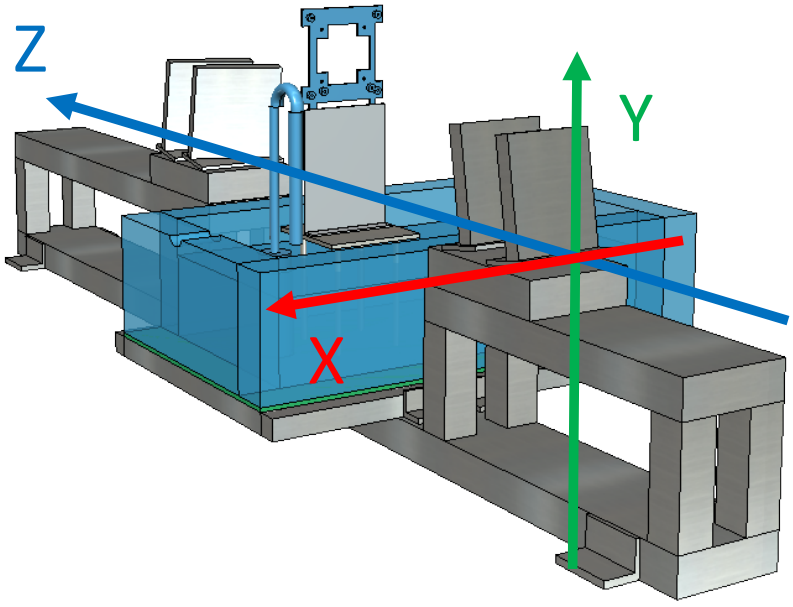
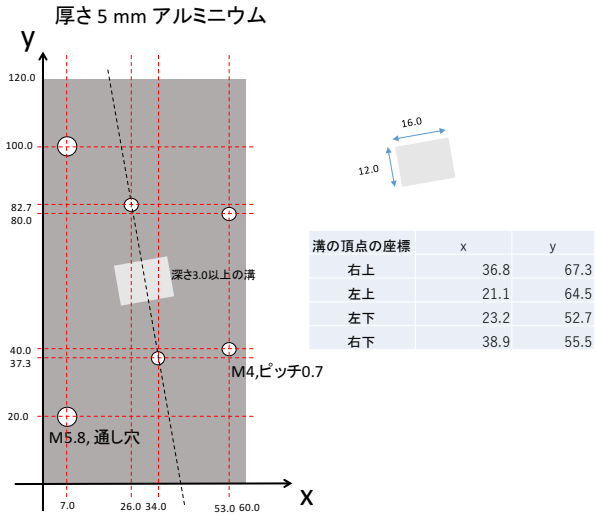


図 4.4　検出器固定台と冷却ボックス。水色で示した箱が冷却ボックス下部である。



溝の頂点の座標	x	y
右上	36.8	67.3
左上	21.1	64.5
左下	23.2	52.7
右下	38.9	55.5

図 4.5　テレスコープ回転治具

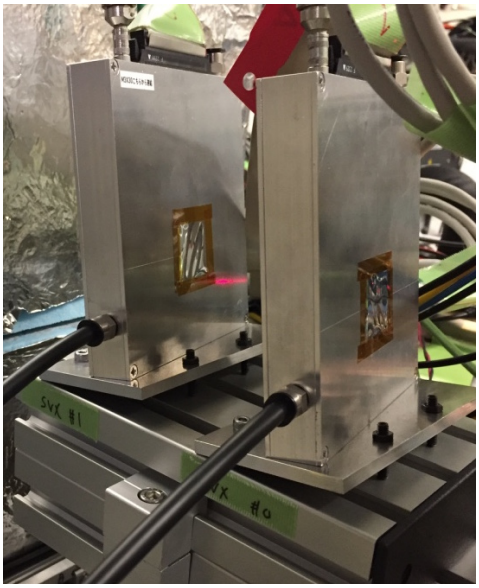


図 4.6　テレスコープの回転の様子。Y 軸周りに 10 度回転後、X 軸周りに 10 度回転させた。

4.3.2　冷却システム

陽子線照射後のピクセル検出器は暗電流を抑制するために、冷却する必要がある。冷却には投げ込み式冷却器[*1]を用いた。冷却器の熱交換部にファンで風を送り、冷却ボックス内の気体を冷やす。冷却ボックスは発泡ポリスチレン製[*2]で、熱伝導率は $0.036\,\mathrm{W/(m\cdot K)}$ のものを用いて制作した。密度は $2\times10^{-2}\,\mathrm{g/cm^3}$ であり、ビーム方向には合計 10 cm の厚みを持つ。冷却ボックスの大きさは図 4.7 に示す通りであり、主に 50 μm 角ピクセル検出器と冷却器の大きさにより制限された。容積は 51 L であり、冷却開始から約 2 時間でボックス内温度約 -30 度の熱平衡に至る。最低到達温度 -33 度 を達成した。また、冷却の際に結露による検出器の故障を防ぐため、冷却ボックス内に窒素ガスを供給した。

[*1] クールパイプ 250DF
[*2] ダウ化工の製品 スタイロフォーム IB を使用した。

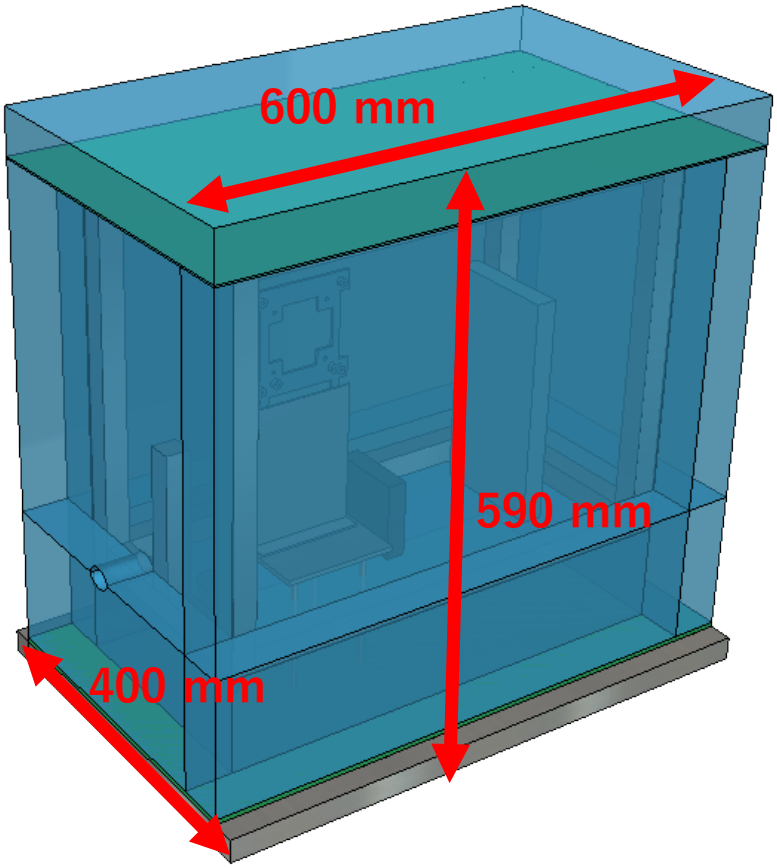


図 4.7　冷却ボックス

第 5 章

テレスコープ位置分解能評価試験のデータ取得

本章では、ビームテストにおけるテレスコープのデータ取得について述べる。初めに、データ取得条件を項目立てて説明し、次に設定値の決定方法を実測したデータとともに示す。

5.1 データの取得条件

本研究で用いたテレスコープは、目的に合わせてオンラインでデータを選別するための機能を備えている。以下に本研究の解析に関わる設定を説明する。

マスク

ADC 値に異常があるチャンネルを選択的に読み出さないことができる。読み出さないチャンネルをマスクチャンネルと呼ぶ。

読み出し閾値

データ量の削減とデータ転送速度の向上を目的として、トリガー信号に対し閾値を超えた ADC 値を持つチャンネルのみを読み出す。読み出し閾値は SVX4 ASIC 毎に決定する。ペデスタル部分とヒットの切り分けをよくするために、ペデスタルの ADC 値より十分大きな読み出し閾値に設定する。

全チャンネル読み出し

マスクチャンネルや読み出し閾値を超えないチャンネルも合わせてすべてのチャンネルから ADC 値を読み出す。主にペデスタル測定に用いる。

隣接チャンネル読み出し

荷電粒子がストリップ境界を通過し、隣接するストリップ間で電荷を分割する場合、通過距離が短いストリップでは粒子が通過したにも関わらず ADC 値が閾値を超えず読み出されない。これを避けるために、閾値を超えたチャンネル及びその両隣を読みだす。

タイミング調整

セットアップに従って、トリガーを受け取った時間から遡って Pipeline のどのコンデンサーを読み出すかを決める。まずは SVX4 の動作クロック単位で遡る時間を決定する。さらに、より細かなタイミング調整として、トリガーを受け取る時間を 10 ns 刻みで遅らせ、最適な遅延時間を決定する。

5.2 読み出し閾値の決定

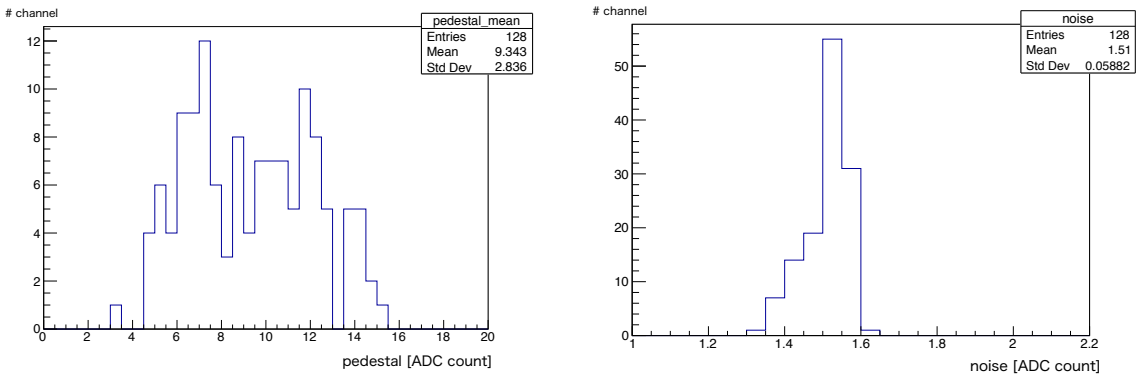
全チャンネルのペデスタルとノイズ量を求め、それぞれ ASIC 毎の平均値を求める。ただし、ADC 分布のペデスタル部を正規分布でフィットしたときのピーク値をペデスタル、標準偏差をノイズ量と定義した。図 5.1 は、今回ビームテストで測定したある ASIC のチャンネル毎に求めたペデスタルの分布とノイズ量の分布である。ノイズ量に対してペデスタルの分布の広がりが大きい。読み出し閾値は、チャンネル毎には設定できないので、閾値を低くするとペデスタルの大きなチャンネルを常に読み出してしまう。一方、閾値を高くするとペデスタルの小さなチャンネルの信号を損失してしまう。今回はデータ取得レートを優先し、閾値を (ASIC 毎のペデスタルの平均値)+(ASIC 毎のノイズ量の平均値) × 3+ 2 ADC カウント と高めに設定した。

5.3 マスクチャンネルの決定

マスクチャンネルの条件を以下に示す。いずれかを満たすチャンネルをマスクチャンネルとした。

- チャンネル内の最頻 ADC 値の度数が ASIC 毎の平均値より極端に小さい。
- ASIC 毎のペデスタルの平均値と当該チャンネルのペデスタルとのずれが ASIC 毎のノイズ量 (5.2 節で定義) の平均値の 5 倍以上。

1 つ目の条件は、アンプが働いていない場合やワイヤーボンディングが外れている場合にノイズが小さくなることを利用している。2 つ目の条件は、ペデスタルが極端に他とずれていること示す。ADC 値が極端に大きいチャンネルは、常に読み出し閾値を越え、データ量の増大やデータ転送速度の低速化の原因となるため排除する。この結果、全



[a] [b]

図 5.1　[a] ある ASIC の各チャンネルのペデスタルの分布。[b] ある ASIC の各チャンネルのノイズ量の分布。[a], [b] 共に、横軸は ADC 値である。

2048 チャンネル中 24 チャンネルをマスクチャンネルとした。

5.4　タイミング調整

荷電粒子がセンサーを通過してからトリガー信号を受け取るまでにかかる時間はセットアップに依存する。この時間に対応するように、トリガー受け取り時から SVX4 の動作クロック数単位で遡る時間を決める。

ビーム上にテレスコープを並べ、トリガー信号のタイミングから遡るクロック数を変えて、それぞれ 5000 事象のデータを取得した。図 5.2 に遡るクロック数とヒット数の関係を示す。ここでは、ある閾値を超えるチャンネルの数をヒット数の定義とした。トリガーから 7 カウント遡ったときに最もヒット数が多い。

6 カウントにもヒット数が多く見えるのは、トリガーに対するクロックの位相が異なるためである。図 5.3 にトリガー信号と SVX4 動作クロックの位相関係を示す。図中の (A) では、センサーからの信号による Preamp の電圧の変化分全てを動作クロック数 7 カウントにおいて読み出している。従って、動作クロック数 6 カウントや 8 カウント分遡ってもヒットはみられない。一方、図中の (B) では、動作クロック数 6 カウント分遡った場合、Preamp の電圧差は 0 でないため、ヒットがみられる。

SVX4 動作クロックを 20 等分し、動作クロックの立ち上がりからトリガー信号を受け取るまでの時間を TDC 値とすることにより、トリガーと動作クロックの位相関係がわかる。遡る動作クロック数を 7 カウントに設定した場合を考える。読み出される ADC 値が

TDC 値に依存しないような TDC 値の範囲では、トリガーとクロックの位相関係は (A) のようになる。(A) のような位相関係をとる TDC 値の範囲が最大になるように、SEABAS2 の機能を用いて、トリガーを 40 ns 遅延させた。

図 5.4 に ADC 値と TDC 値の相関を示す。各 TDC カウントについて事象数を規格化した。TDC 値がおよそ 6 から 14 の間、ADC 値が最大でフラットなっている。今回のセットアップでは、トリガーを TLU で 100 MHz のクロックに同期させているが、SVX4 は 8 MHz で動作している。このため、SVX4 からみたトリガーのタイミングは、SVX4 動作クロックの幅 125 ns と トリガー用クロックの幅 10 ns を合わせた 135 ns の幅を持つ。このため、TDC 値の端で ADC 値がペデスタルまで下がっていない。

本解析では TDC 値が 4 から 16 の事象のみを用いた。この結果、全トリガー数の 32 % の事象を除いた。

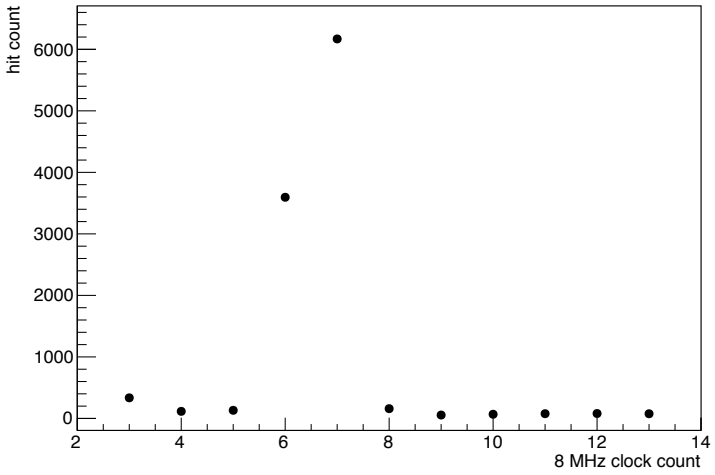


図 5.2　ヒット数と読み出す Pipeline の関係。

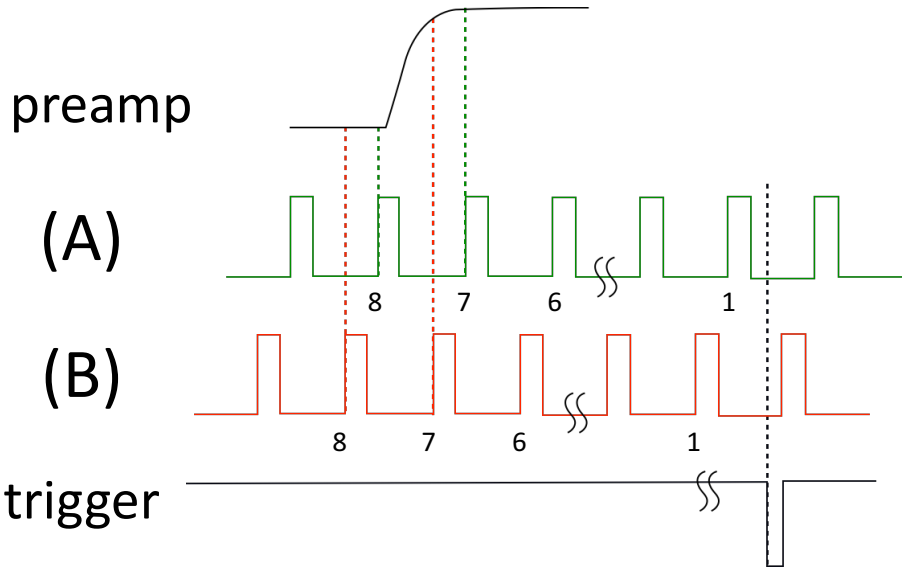


図 5.3　トリガーと SVX4 動作クロックのタイミングによる ADC 値の変化。(A) (B) は異なる位相の SVX4 動作クロックを示す。トリガーとクロックの位相関係によって、Pipeline に記録される電圧差が異なる様子を示す。

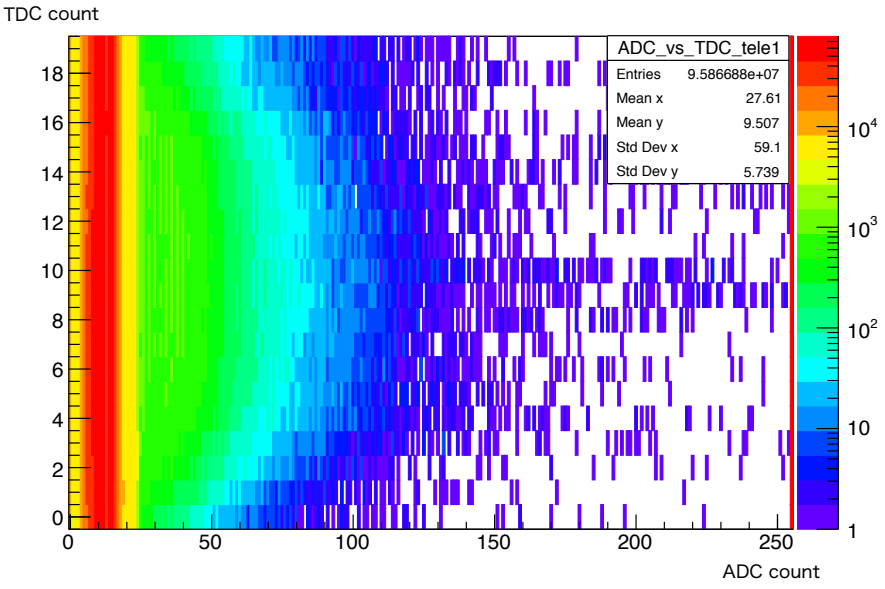


図 5.4　ADC 値と TDC 値の相関

第 6 章

テレスコープ位置分解能評価試験のデータ解析

本章では、ビームテストで取得したテレスコープのデータ解析について述べる。データの取得条件とデータ数は表 6.1 に示すとおりである。

表 6.1　取得データ量と取得条件

取得条件	事象数
全チャンネル読み出し	13 万
読み出し閾値設定、かつ隣接チャンネル読み出し	132 万

6.1　チャンネル毎のペデスタル測定と電荷変換

6.1.1　ペデスタル測定

チャンネル毎のペデスタルを測定するため、全チャンネル読み出しを行い、陽子ビームによるデータを取得した。チャンネル毎の ADC 値の分布を図 6.1 に示す。ADC 値がおよそ 20 以上の領域は、陽子ビームのエネルギー損失による電荷出力に対応する。電離損失の揺らぎや電荷分割の仕方によって ADC 値は様々な値をとる。ADC 値が 10 付近の赤い帯は、ペデスタルに対応する。ペデスタルのピーク値はチャンネルによって異なる。図 6.2 の [a] に典型的なチャンネルのペデスタル分布を示す。チャンネル毎にガウシアンでフィットしてペデスタル分布のピーク ADC 値を求めた。

6.1.2　電荷変換

事象毎の ADC 値からペデスタルのピーク ADC 値を引いて、ゲインをかけることで電荷に変換した。ゲインは先行研究 [7, 8] で用いられた値を用いた。およそ 1 ADC カウントが 500 ～ 1000 electron である。先行研究のゲインを用いたことの妥当性は 6.3 節で検討する。

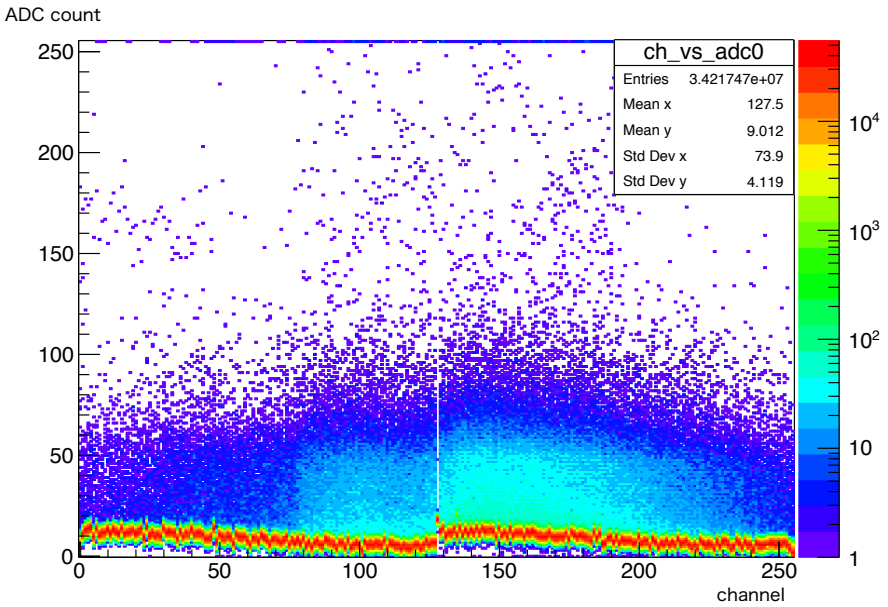


図 6.1　チャンネル毎の ADC 値の分布。横軸はチャンネル、縦軸は ADC 値である。

6.2　オフラインマスク

図 6.3 に示すように、ペデスタル分布に 2 つのピークを持つチャンネルが全 2048 チャンネルのうち 40 チャンネルあった。そのうちの 2 チャンネルの ADC 値と Pipeline ID の相関を図 6.4 に示す。特定の ID でペデスタルが高くなっている。すなわち、Pipeline のコンデンサーのうち特定のコンデンサーに正しく電荷情報が記録されていない。該当するチャンネルが 2 % と少ないので、これらをマスクチャンネルとして扱った。オンラインでのマスクチャンネル 24 チャンネルと、オフラインのマスクチャンネル 40 チャンネルを合わせて 64 チャンネルをマスクした。

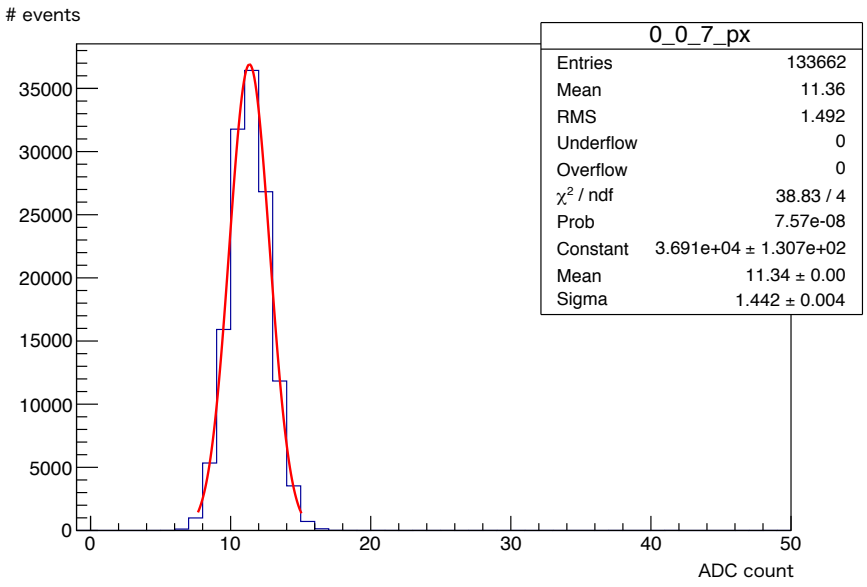


図 6.2　典型的なチャンネルのペデスタル分布。横軸は ADC 値、縦軸は事象数である。

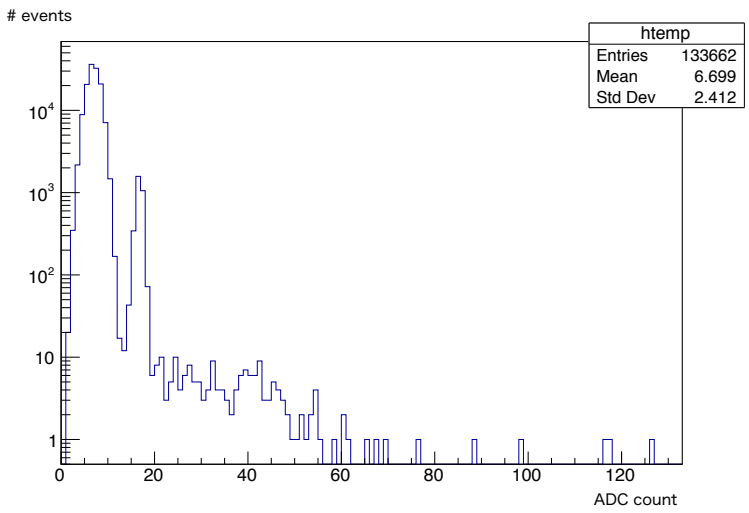


図 6.3　2 つのペデスタルピークを持つチャンネルの ADC 値の分布

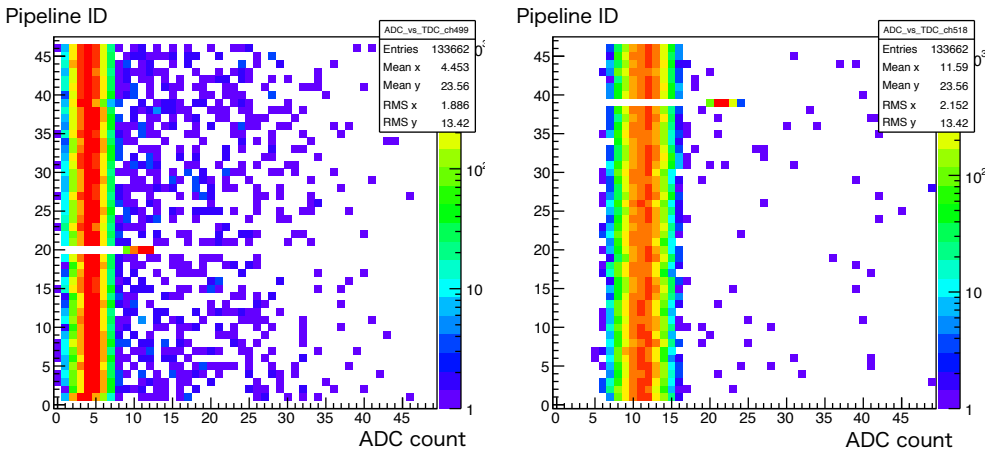


図 6.4　2 つのペデスタルピークを持つチャンネルの ADC 値と Pipeline ID の相関

6.3　クラスタリング

本節以降で用いるデータは、全チャンネル読み出しを行わず、読み出し閾値を ASIC 毎に設定し、隣接チャンネル読み出しを行って収集したデータである。

6.3.1　オフライン閾値の設定

各センサー毎に最大の電荷量を持つチャンネルについて考える。センサーが 10 度傾いている場合を想定すると、必ず 2 つのストリップで電荷分割される。ストリップ毎の荷電粒子の最長通過距離が最小となるのは、2 つのストリップを等距離で通過する場合である。このとき、通過する荷電粒子を MIP と仮定すると、落とすエネルギーは約 11000 electron である。例えば、電荷変換後のノイズ量が最も多い 4 層目の Y 方向のセンサーに対応する ASIC では、ノイズ量が 0.99 ADC カウント、ゲインが 1100 electron/ADC カウントであるので、11000 electron はノイズ量の約 10 倍にあたる。他の ASIC についても同様の基準で評価し、本解析では、(ペデスタル) + (ノイズの 9 倍) を閾値とした。

図 6.5 は、あるセンサーの最大電荷を持つチャンネルの電荷量を示す。青色のヒストグラムは全事象、赤色のヒストグラムは (ペデスタル) + (ノイズの 9 倍) の閾値でデータ選別をしたものである。ランダウ分布に比べてピーク付近の幅が大きいのは、電荷分割により、様々な電荷量を取りうるからである。閾値によって、主にペデスタル付近の電荷量を排除しており、約 25 % の事象を排除した。

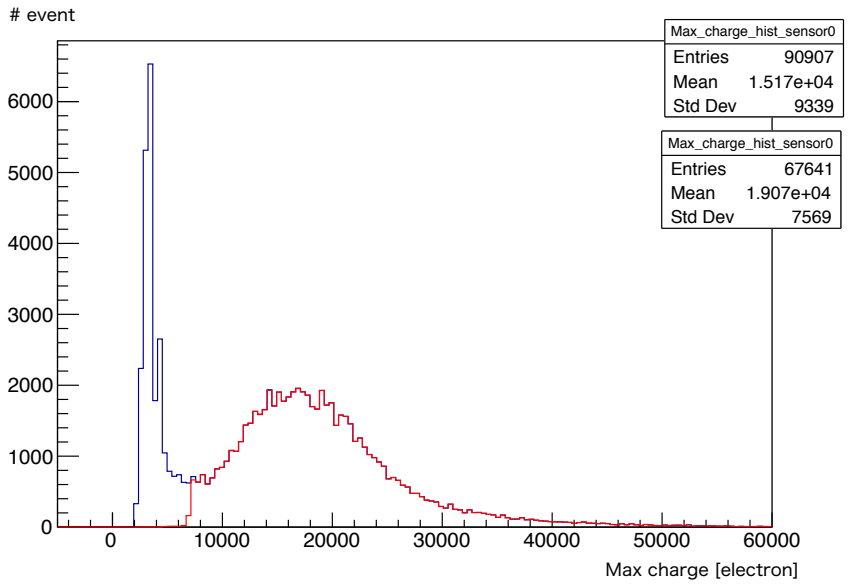


図 6.5　あるセンサーの最大電荷を持つチャンネルの電荷量。横軸は電荷量 [electron]、縦軸は事象数を表す。青色のヒストグラムは全事象、赤色のヒストグラムは (ペデスタル) + (ノイズの 9 倍) の閾値でデータ選別をしたものである。

6.3.2　クラスターサイズ

本解析では、(ペデスタル) + (ノイズの 9 倍) の閾値を超えたチャンネルと、その両隣をグループ (クラスターと呼ぶ) とした。これにより、荷電粒子がストリップ境界を通過した場合、荷電粒子の通過距離が短い方のストリップでの電荷情報も重心法に用いることができる。定義より、最小クラスターサイズは 3 であり、電荷分割する 2 つのストリップでの通過距離が同程度になる場合は、両方のチャンネルで閾値を超え、クラスターサイズは 4 となる。クラスターを構成する際、センサー毎に最大の ADC 値を持つチャンネルをシードチャンネル呼び、シードチャンネルの両隣にマスクチャンネルを含む事象を除いた。これは電荷重心を用いる際に、電荷情報の損失により、偏った位置に再構成されることを避けるためである。

センサー毎のクラスターサイズの分布を図 6.6 に示す。クラスターサイズ 3 と 4 の事象が主であり、2 つのストリップで通過している場合の分布として理解出来る。クラスターサイズ 5 以上の事象は、陽子が半導体原子を電離することよって 2 次的に生成された電子 (δ 線) であると理解出来る。δ 線 を含む事象では、再構成された飛跡がビーム粒子の飛跡から大きくずれ、分解能悪化の原因となるため解析から除いた。クラスターサイズ 5 以上の事象の割合は全てのセンサーで 4 % 以下であった。センサー毎にクラスターサイズ

分布が異なる理由については、6.8 節にて考察する。

クラスターに含まれるヒットチャンネルの電荷合計の分布を図 6.7 に示す。MIP によって得られる電荷量の約 22000 electron に相当するピーク値を持つ。半値半幅は約 5000 electron であった。すべてのセンサーで 10 % 以内の範囲でピークが揃っており、ASIC 毎のゲインは先行研究 [7, 8] と同じ値を用いた。

以降の解析では、荷電粒子がシリコン中で十分エネルギーを落とした事象に絞るため、電荷合計が 10000 electron を超えない事象を除いた。これにより 2 % の事象を排除した。

6.4 グローバル座標への変換

クラスターに含まれるヒットチャンネルの位置と電荷情報を用いて、重心法で粒子の検出位置を決定した。クラスターサイズ n のクラスターの各電荷 Q_i と電荷を読み出したストリップの端の位置 x_i を用いて、荷電粒子の入射位置 x は、

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i Q_i}{\sum_{i=1}^{n} Q_i} \tag{6.1}$$

と求まる。

各層での検出位置をローカルヒット位置と呼び、4.3 節に定義した座標系をグローバル座標と呼ぶ。表 6.2 に示す各層の位置と回転角に応じて、ローカルヒット位置をグローバル座標系での位置 (グローバルヒット位置) に変換した。今回使用した治具では、Y 軸周りの回転を与えてから X 軸周りに回転を与えており、回転させる順番を考慮した。図 6.8 にローカルヒット位置をグローバルヒット位置に変換する手続きを示す。治具による回転を与え、ローカル位置の原点 (センサーの角) がグローバル位置の原点の X, Y 座標と揃うように平行移動を行った。図 6.9 に変換された後のグローバルヒット位置 X, Y を示す。

表 6.2　テレスコープの各層の位置と回転角

層番号	Z (mm)	X 軸周りの回転角 (度)	Y 軸周りの回転角 (度)
1	175	10	10
2	265	10	10
3	770	-10	-10
4	850	-10	-10

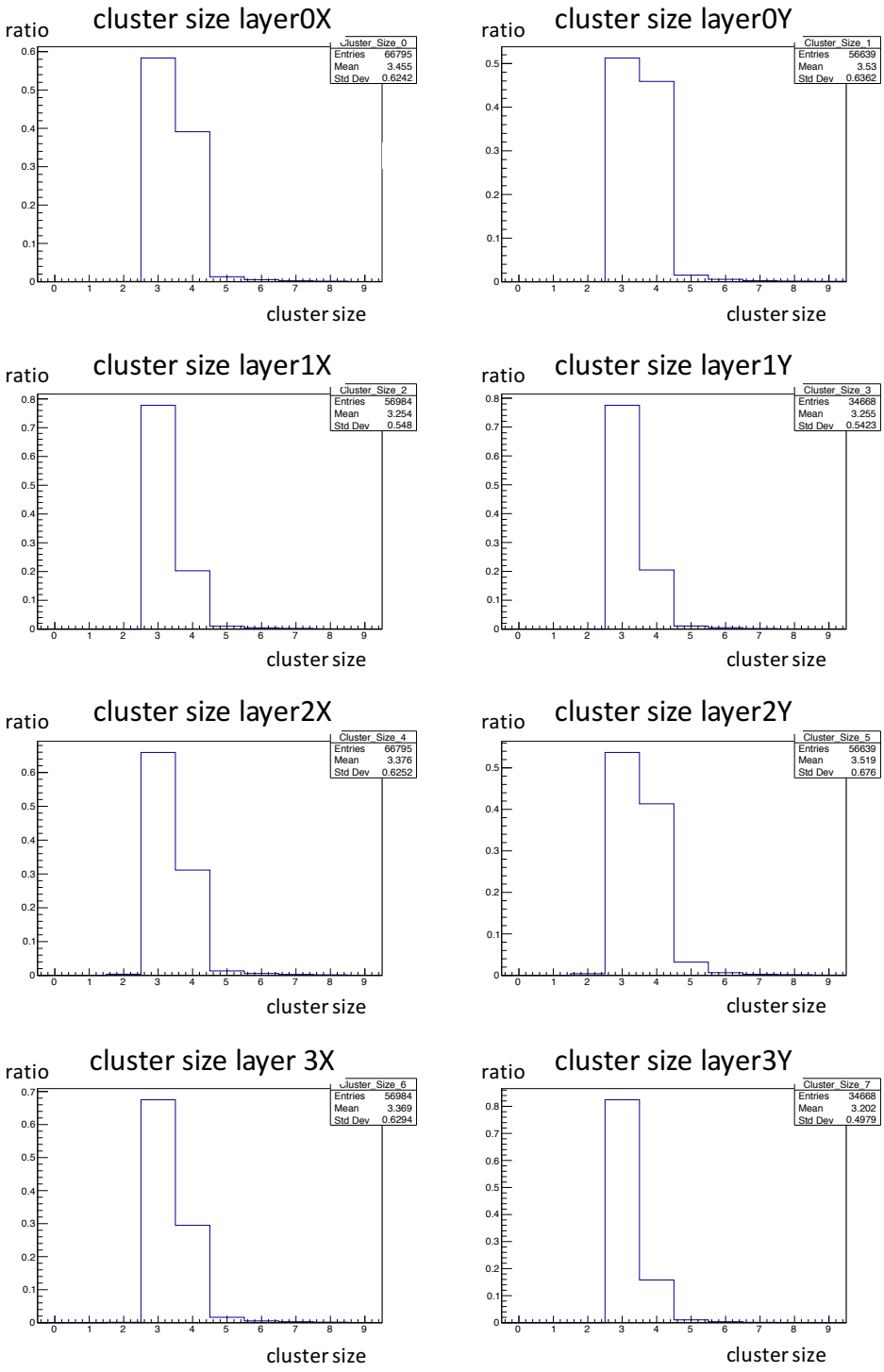


図 6.6　各センサーのクラスターサイズの分布。縦軸を総数で規格化した。左が X 方向、右が Y 方向に対応し、上から順に 1 層目、2 層目、3 層目、4 層目に対応する。

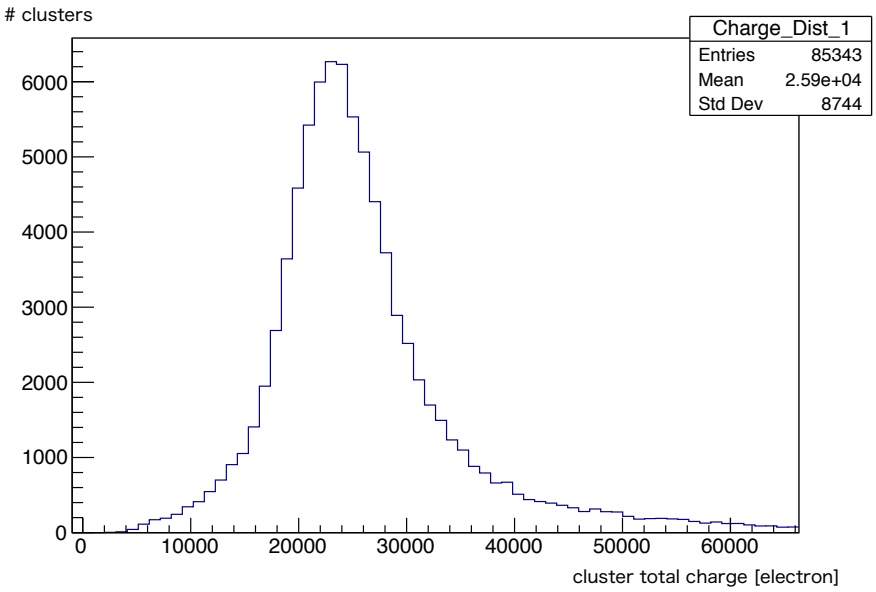
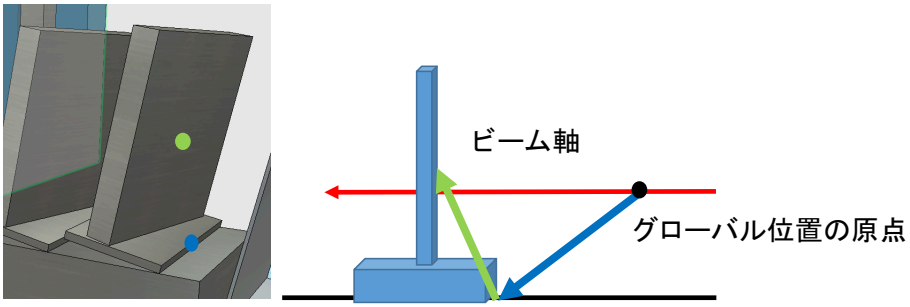


図 6.7　クラスターの合計電荷の分布。半値半幅は約 5000 electron である。



1. ローカル位置を平行移動し、緑の点を原点とする。
2. y軸周りに 10 度回転させる。
3. 青の点が原点となるように平行移動する。(緑のベクトルを足す)
4. x軸周りに10度回転させる。
5. 原点をグローバル位置の原点に揃うように平行移動する。(青のベクトルを足す)

図 6.8　グローバルヒット位置への変換方法

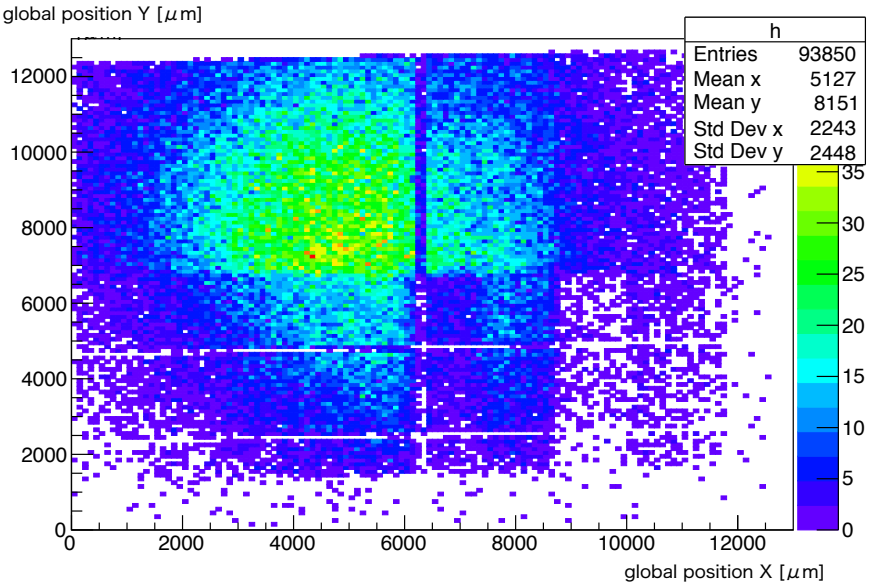


図 6.9　1 層目のセンサーのグローバルヒット位置。筋のように見える位置は、マスクチャンネルを含む位置に対応する。回転角に応じて、X 方向、Y 方向ともにスケールされている。

6.5　アライメント

4 章で述べたように、検出器の配置は設置精度によりずれが生じる。ずれの補正をアライメントと呼び、X , Y 方向の平行移動と X , Y , Z 軸周りの回転の補正に分けて行った。補正を行う際、1 層目を固定した。

6.5.1　位置補正

入射粒子が直線的に進み平行な場合、各層間のグローバルヒット位置 X または Y の差はどの事象についても一定である。実際には、ビームの入射角はある程度広がりを持っているが、まずはこの寄与を無視して大まかに整列させる。図 6.13 に示すように、1 層目と他の各層との検出位置の差を求め、その平均値を各層の検出位置から引いた。ビーム上流から 2 層目では、X 方向に 0.5 mm、Y 方向に 0.1 mm 補正し、3、4 層目は、X 方向に 2 ∼ 3 mm、Y 方向に 1 ∼ 2 mm 補正した。図 6.10, 6.11 にグローバル位置の Z 座標と X, Y 方向の位置補正量を示す。X, Y 方向ともに、3, 4 層目で補正量が大きい。この理由は、ビームに対して検出器固定台自体が角度を持っていたからであると推測できる。各層でビームによるヒットを数ミリ以下の精度で捉えることができており、設置の精度は十分

であった。

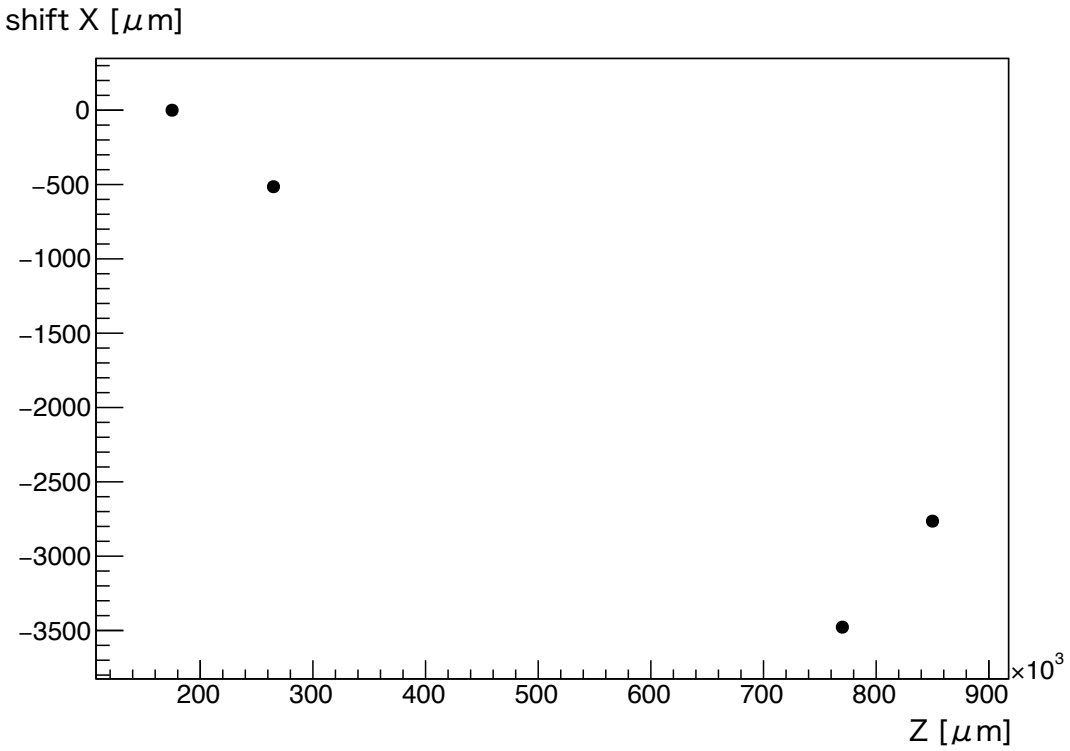


図 6.10　グローバル位置の Z 座標と X 方向の位置補正量。横軸はグローバル位置の Z 座標、縦軸は X 方向の位置補正量である。

次に、より精度よく補正するために、補正対象の層を除いた 3 層で飛跡再構成をした。飛跡再構成の際、3 層全てで検出位置が決まっていることを要求した。飛跡再構成は、X-Z 平面と Y-Z 平面に分けて最小二乗法を用いて直線でフィットした。アライメント前は、フィット時の各検出器の誤差として垂直入射の場合の位置分解能 (式 (3.5)) を用いた。アライメント後は、求まった各検出器の位置分解能を誤差とした。決まりの良い飛跡を選ぶため、フィット時の χ^2 が 3 以下の事象を選び、その結果およそ 17 % の事象を除いた。フィット時の χ^2 の分布を図 6.12 に示す。

再構成された飛跡から求まる補正対象の層での検出位置 (トラック位置) とクラスターから求めた検出位置 (ヒット位置) の差 (残差) を求める。トラック位置とヒット位置が正しければ、残差分布は 0 に鋭いピークを持つ。現実には、飛跡から求まる位置の分解能、検出器の分解能 (電離損失の揺らぎやノイズ量に依存)、検出器の回転の想定と現実でのずれ、荷電粒子の多重散乱等によってピークに幅ができる。残差分布の平均値が補正量となる。飛跡再構成による位置補正前後の残差分布を図 6.14 に示す。図の例では補正後は平

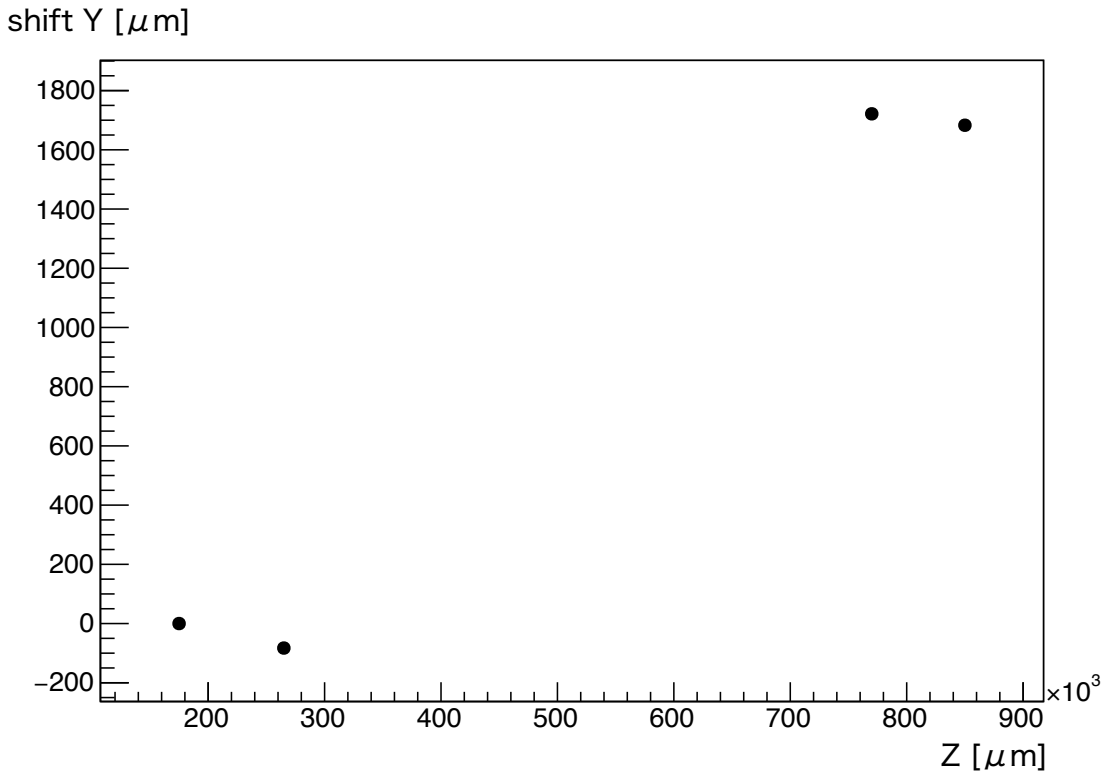


図 6.11　グローバル位置の Z 座標と Y 方向の位置補正量。横軸はグローバル位置の Z 座標、縦軸は Y 方向の位置補正量である。

均値が 0 になる。

6.5.2　回転補正

回転の補正はトラック位置と残差の相関を見て行った。

X , Y 軸周りの回転

位置補正後にトラック位置とヒット位置にずれがある場合を図 6.15 に示す。各層の回転角が正しく反映されていない場合、トラック位置が並ぶ軸とヒット位置が並ぶ軸が角 ϕ を成す。X 軸周りの回転角の補正量はトラック位置の Y 座標と残差 Y の相関、Y 軸周りの回転角の補正量はトラック位置の X 座標と残差 X の相関で評価できる。例として、以下に Y 軸周りの回転角の補正量 ϕ_Y の求め方を示す。幾何学的な関係

$$x_2^{hit} - x_1^{hit} = \frac{x_2^{track} - x_1^{track}}{\cos\phi_Y} \tag{6.2}$$

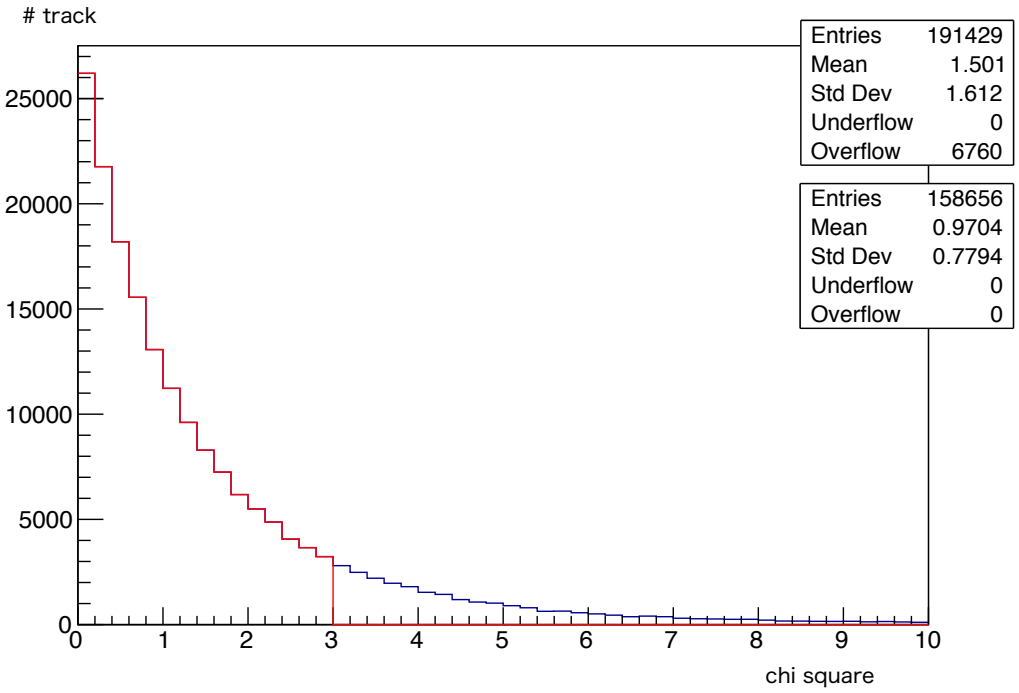


図 6.12　飛跡再構成における直線フィット時の χ^2 分布

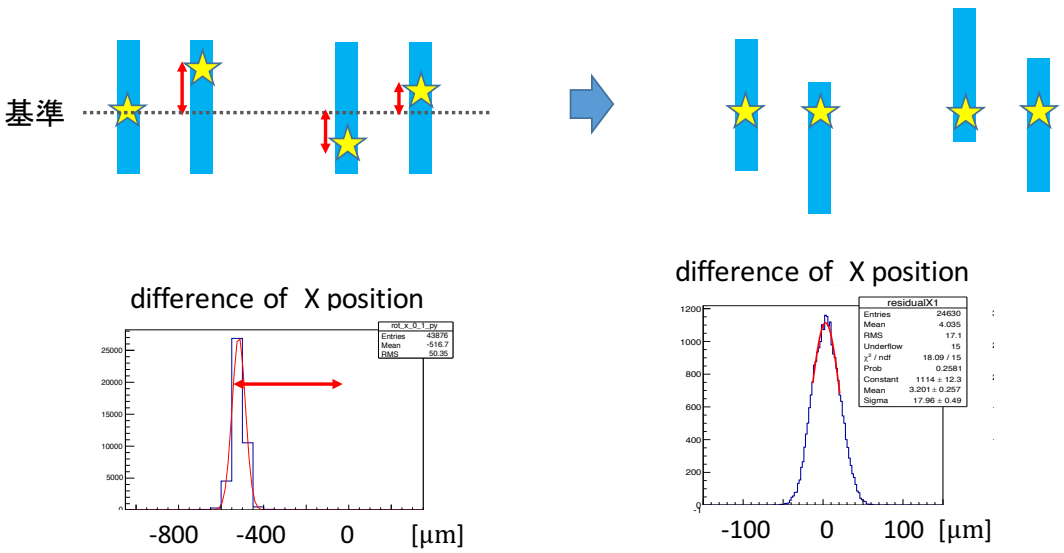
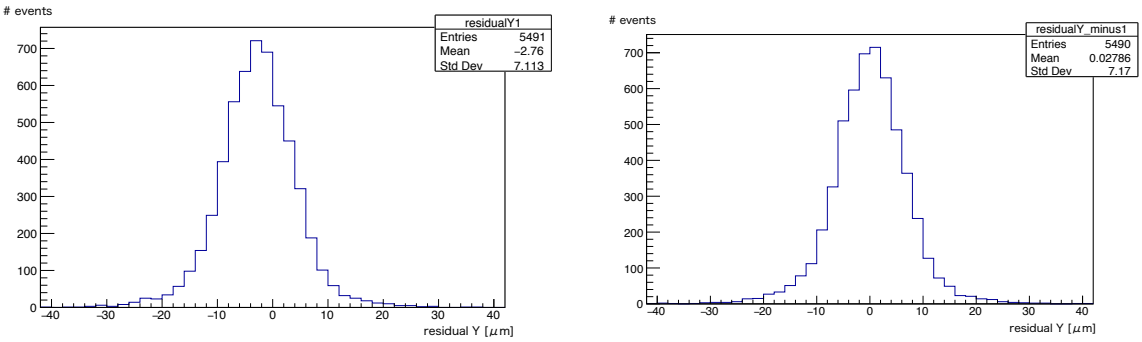


図 6.13　位置補正の方法



[a] [b]

図 6.14　2 層目の Y 方向の残差分布。[a] は位置補正前、[b] は位置補正後の残差分布を示す。

より、トラック位置の X 座標と残差 X の相関の傾き a は、

$$a = \frac{x_2^{residual} - x_1^{residual}}{x_2^{track} - x_1^{track}} \tag{6.3}$$

$$= \frac{(x_2^{track} - x_2^{hit}) - (x_1^{track} - x_1^{hit})}{x_2^{track} - x_1^{track}} \tag{6.4}$$

$$= \frac{(x_2^{track} - x_1^{track})(1 - \frac{1}{\cos\phi_Y})}{x_2^{track} - x_1^{track}} \tag{6.5}$$

$$= 1 - \frac{1}{\cos\phi_Y} \tag{6.6}$$

となる。ここで、x^{hit} はヒット位置の X 座標、x^{track} はトラック位置の X 座標、$x^{residual}$ はトラック位置とヒット位置の X 座標の残差とした。ただし、x_i^{hit}, x_i^{track}, $x_i^{residual}$ は、トラック位置と残差の相関を直線で近似した場合の任意の事象のヒット位置、トラック位置、残差である。図 6.16 に 、補正前後の 2 層目のトラック位置の X 座標と残差 X の相関を示す。回転補正後に相関が弱くなっている。

この回転補正において、回転角の補正量の正負は判定できない。このため、回転を作用させるときに正と負の両方を行い、それぞれに対して補正対象の回転の補正量を再度求めた。正しい向きに回転させた場合、補正対象の回転の補正量 ϕ_Y は小さくなるので、そちらを選択した。

Z 軸周りの回転

図 6.17 に示すように、検出器のストリップが Z 軸周りに回転している場合、ヒット位置の Y 座標はトラック位置の X 座標に依存する。図 6.18 にある層のトラック位置の X

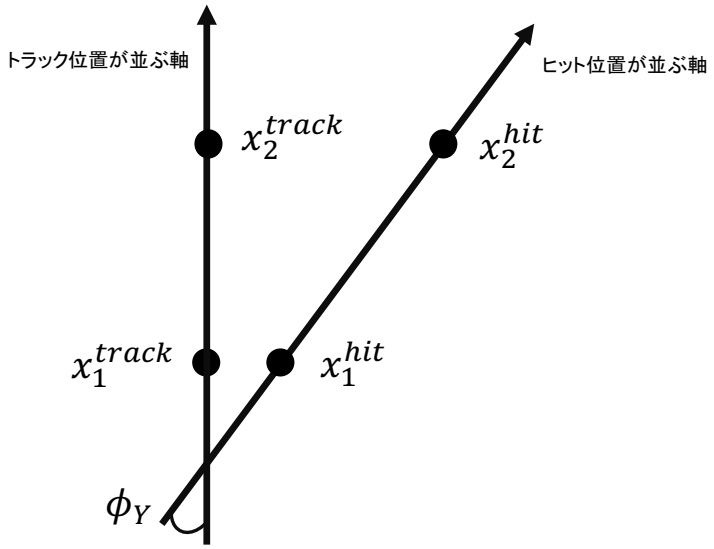


図 6.15　回転角が正しく反映されていない場合のトラック位置が並ぶ軸とヒット位置が並ぶ軸の関係

座標と残差 Y の相関を示す。以下の式を用いて、トラック位置の X 座標と残差 Y の相関の傾き a から回転角の補正量 ϕ_Z を求め、補正した。

$$\begin{pmatrix} \cos\phi_Z & -\sin\phi_Z \\ \sin\phi_Z & \cos\phi_Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^{track} \\ y^{track} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x^{hit} \\ y^{hit} \end{pmatrix} \tag{6.7}$$

より、

$$\sin\phi_Z x^{track} + \cos\phi_Z y^{track} = y^{hit} \tag{6.8}$$

$$\tag{6.9}$$

$\phi_Z << 1$ とすると、$\sin\phi_Z \sim \phi_Z$, $\cos\phi_Z \sim 1$ より、

$$\phi_Z x^{track} + y^{track} = y^{hit} \tag{6.10}$$

$$\phi_Z = \frac{-(y^{track} - y^{hit})}{x^{track}} \tag{6.11}$$

$$= \frac{-y^{residual}}{x^{track}} \tag{6.12}$$

$$= -a \tag{6.13}$$

6.5.3　補正の繰り返し

実際には、飛跡を再構成する過程で補正対象の層を除く 3 層の位置や回転のずれがあり、トラック位置に誤差が生じる。誤差を小さくするために、位置補正と回転補正を繰り

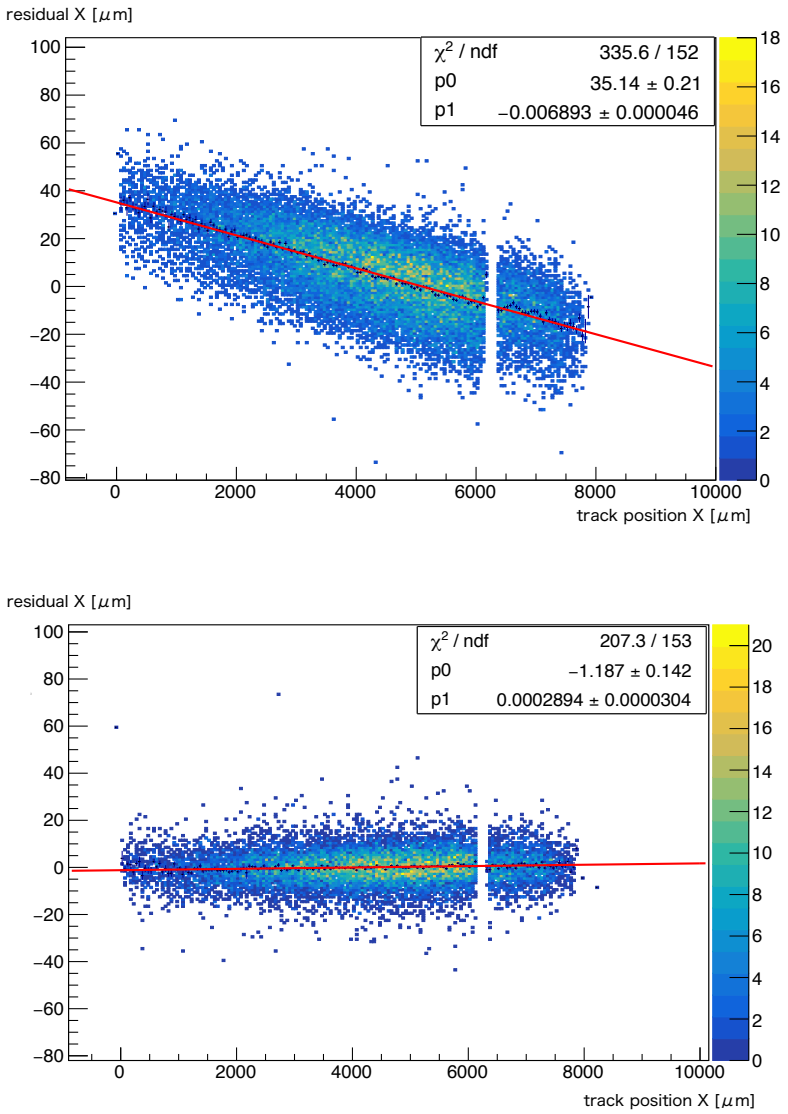


図 6.16　2 層目のトラック位置の X 座標と残差 X の相関。横軸はトラック位置の X 座標、縦軸は残差 X である。補正後は相関がほぼない。

返し行った。トラック位置の誤差が大きい場合は正しく補正できない可能性がある。従って、補正する順番によってアライメント結果が変わる可能性がある。これを避けるため、補正する操作に応じて、平行移動量または回転角の補正量をアライメント前後で比較し、補正量が補正前より大きくなる場合はその操作を無効にし、次の操作へと移るようにした。固定層 (1 層目) 以外が同じ方向に繰り返し回転することを防ぐために、各補正する層の補正量を求めると同時に、固定層も補正は行わないが評価を行った。

繰り返し回数と補正した補正量の例として、3 層目の各補正量の変化を図 6.19、図 6.20、図 6.21 に示す。十分繰り返しを行えば、補正は行われなくなる。繰り返し回数 101 回の

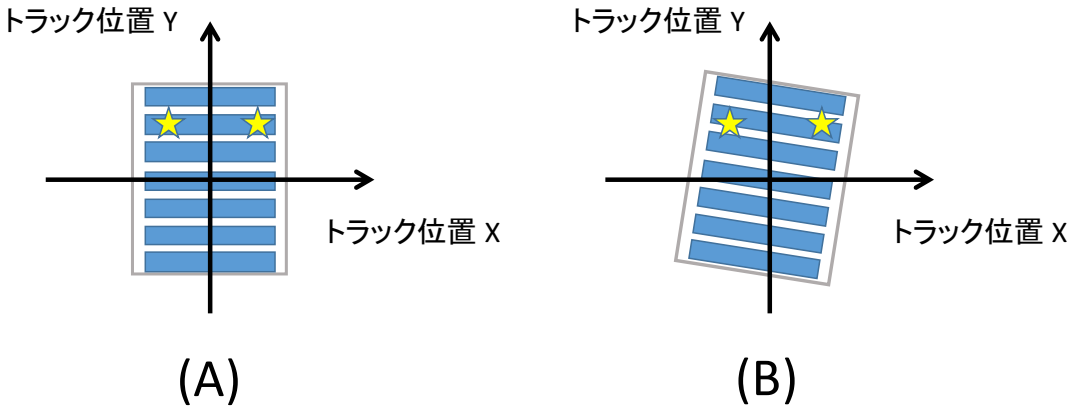


図 6.17　Z 軸周りの回転の残差に対する影響。青色の長方形は Y 方向のヒット位置を読み出すストリップを表す。(A) は Z 軸周りの回転がない場合、(B) は Z 軸周りの回転がある場合を表す。(B) の場合、Y 方向のヒット位置はトラック位置の X 座標に依存する。

結果から、繰り返しにかかる時間を考慮して、本解析では繰り返し回数を 51 回とした。

6.6　データ数と各事象選別

本解析において行った事象選別とその結果を表 6.3 示す。飛跡再構成を行い、各層の補正を行う際、全ての層で検出位置があることを要求した。

表 6.3　各事象選別と事象数

選別条件	事象数
トリガー数	132 万
17 > TDC > 3	90 万
シードチャンネル選択とクラスタリング	53 万
クラスター合計電荷 > 10000 electron と 5 >クラスターサイズ > 2	50 万
4 層全ての検出位置を要求	20 万
飛跡再構成時の $\chi^2 < 3$	15 万

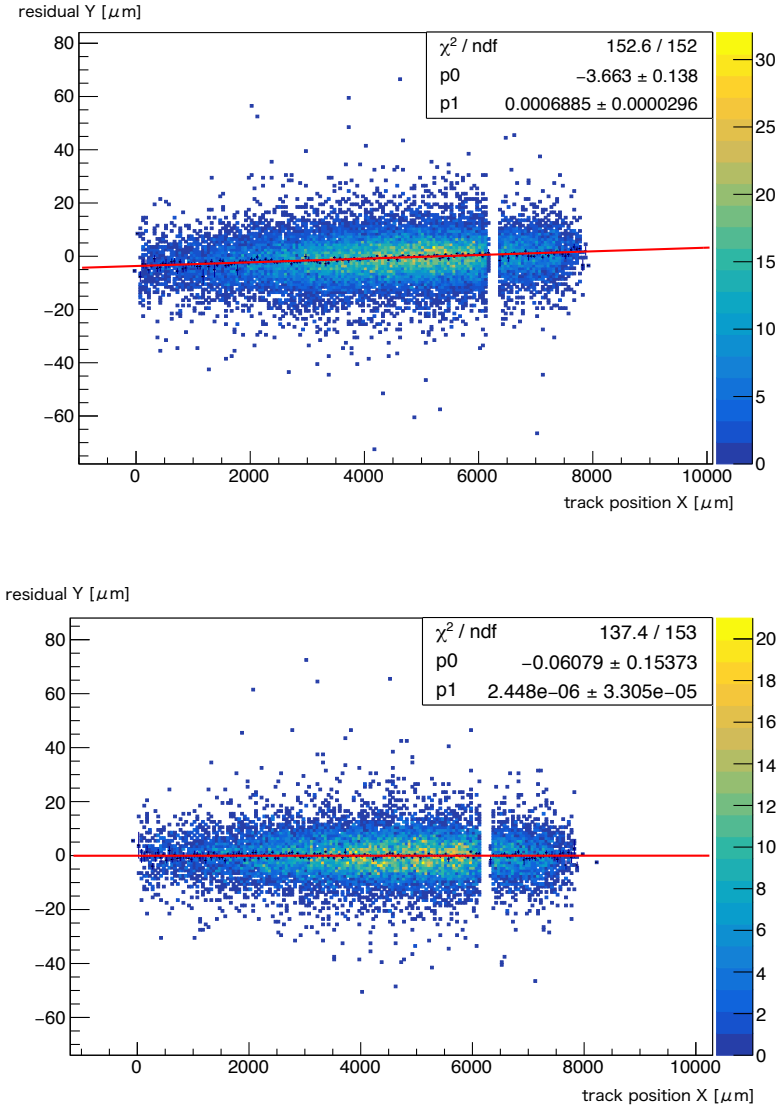


図 6.18　2 層目のトラック位置の X 座標と残差 Y の相関。横軸はトラック位置の X 座標、縦軸は残差 Y である。補正後は相関がほぼない。

6.7　位置分解能

6.7.1　検出器の位置分解能

検出器の位置分解能を残差分布から評価した。各センサーの残差分布を図 6.22 に示す。飛跡を用いたアライメントを行う前の残差分布の幅は 8 ∼ 20 μm であったが、アライメント後の残差分布の幅は 6 ∼ 8 μm となった。

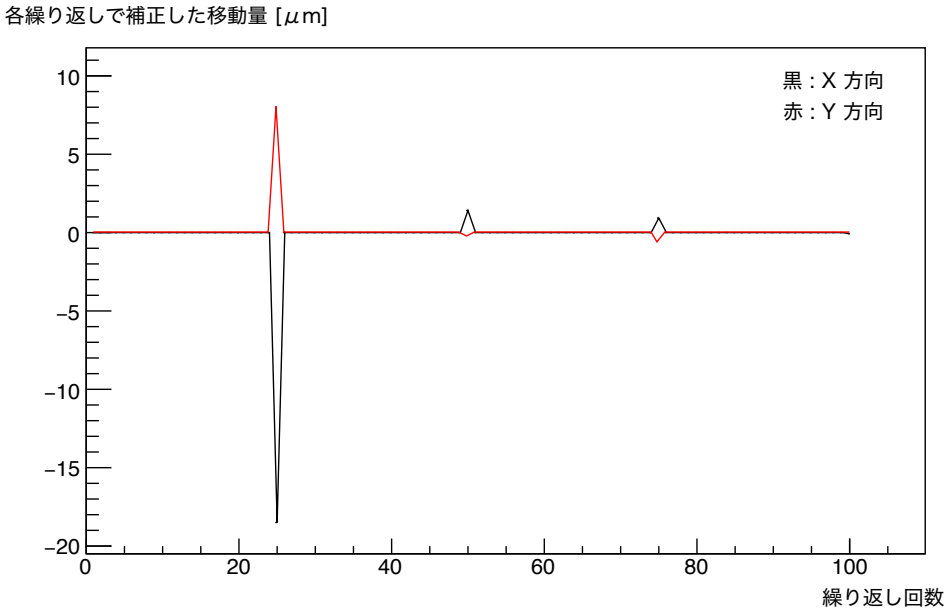


図 6.19　3 層目の位置補正量の変化。黒色が X 方向の位置補正量、赤色が Y 方向の位置補正量を示す。補正量が小さくなっている様子がわかる。位置補正を行わない繰り返し回数に対しては、補正量を 0 としている。

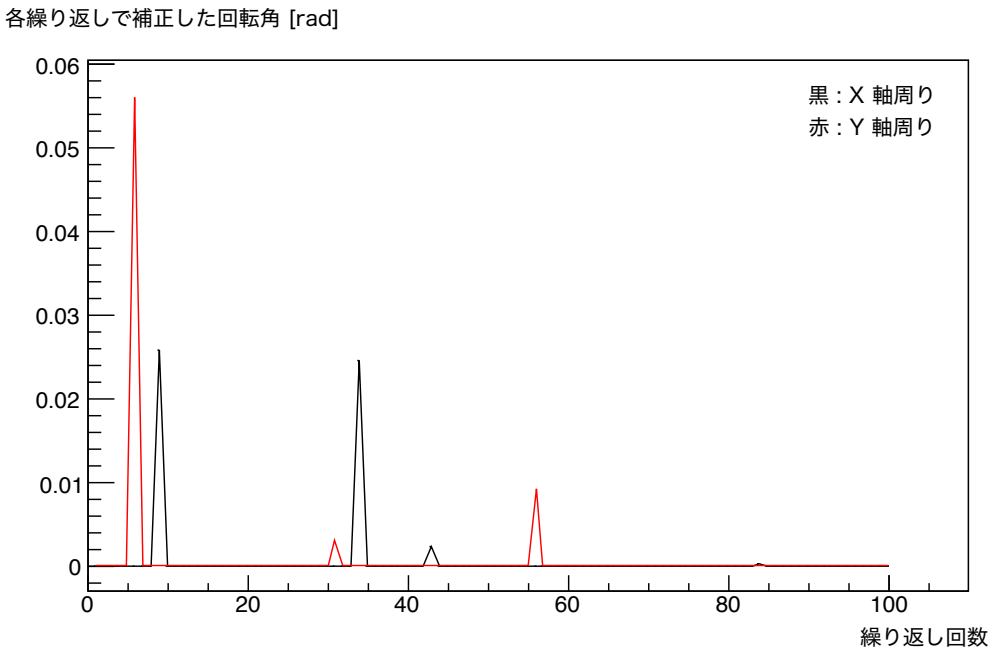


図 6.20　3 層目の X, Y 軸周りの回転補正量の変化。黒色が X 軸周りの回転補正量、赤色が Y 軸周りの回転補正量を表す。

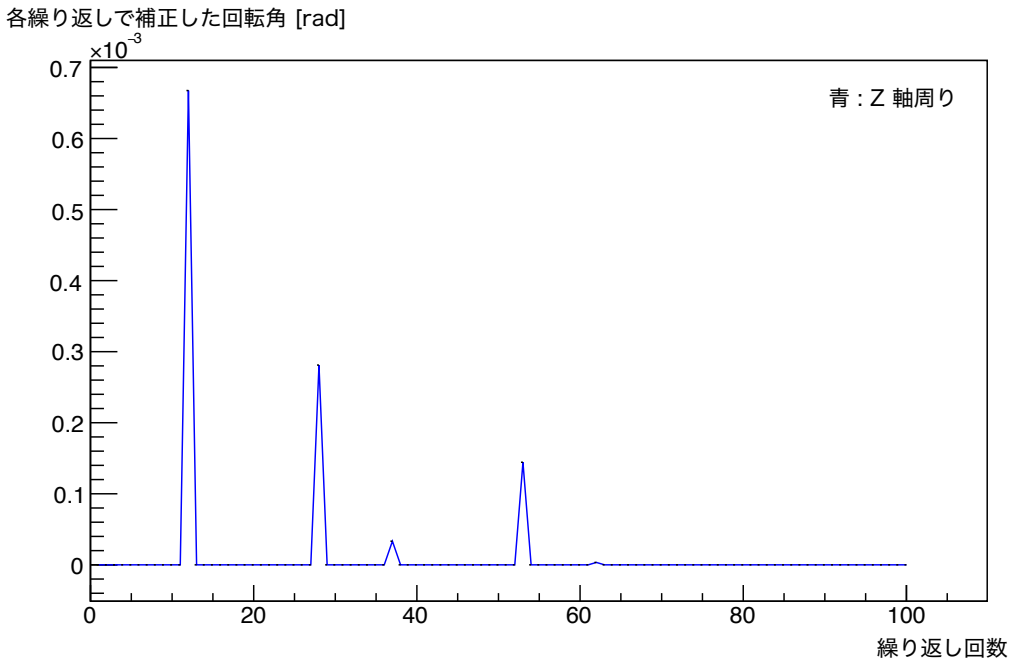


図 6.21　3 層目の Z 軸周りの回転補正量の変化。

式 (3.22) を用いて、σ_1^2 を求める。式 (3.16)、式 (3.18) より、

$$\delta_{scat1}^2 = \tan(9.1 \times 10^{-6}\,\mathrm{rad}) \times 8.0 \times 10^4\,\mu\mathrm{m} \tag{6.14}$$
$$\sim 0.73\,\mu\mathrm{m} \tag{6.15}$$

$$\delta_{scat4}^2 = \tan(9.1 \times 10^{-6}\,\mathrm{rad}) \times 9.0 \times 10^4\,\mu\mathrm{m} \tag{6.16}$$
$$\sim 0.82\,\mu\mathrm{m} \tag{6.17}$$

となる。$\sigma_{2residual}^2$、$\sigma_{3residual}^2$、$\sigma_{4residual}^2$ も同様に評価し、連立方程式を解くことで、各センサーの位置分解能が得られる。結果を表 6.4 に示す。各層のテレスコープで位置分解能は $4.5 \sim 6.5\,\mu\mathrm{m}$ と求まった。

電離損失の揺らぎによる位置分解能への寄与を式 (3.12) を用いて評価した。図 6.7 の分布の幅が電離損失の揺らぎによるものであると仮定すると、合計電荷量の半値半幅の比は $\frac{\delta Q_{total}}{Q_{total}} \sim 0.22$ となる。従って、$Q_1 = Q_2$ のとき、

$$\delta_X \sim 4\,\mu\mathrm{m} \tag{6.18}$$

となる。

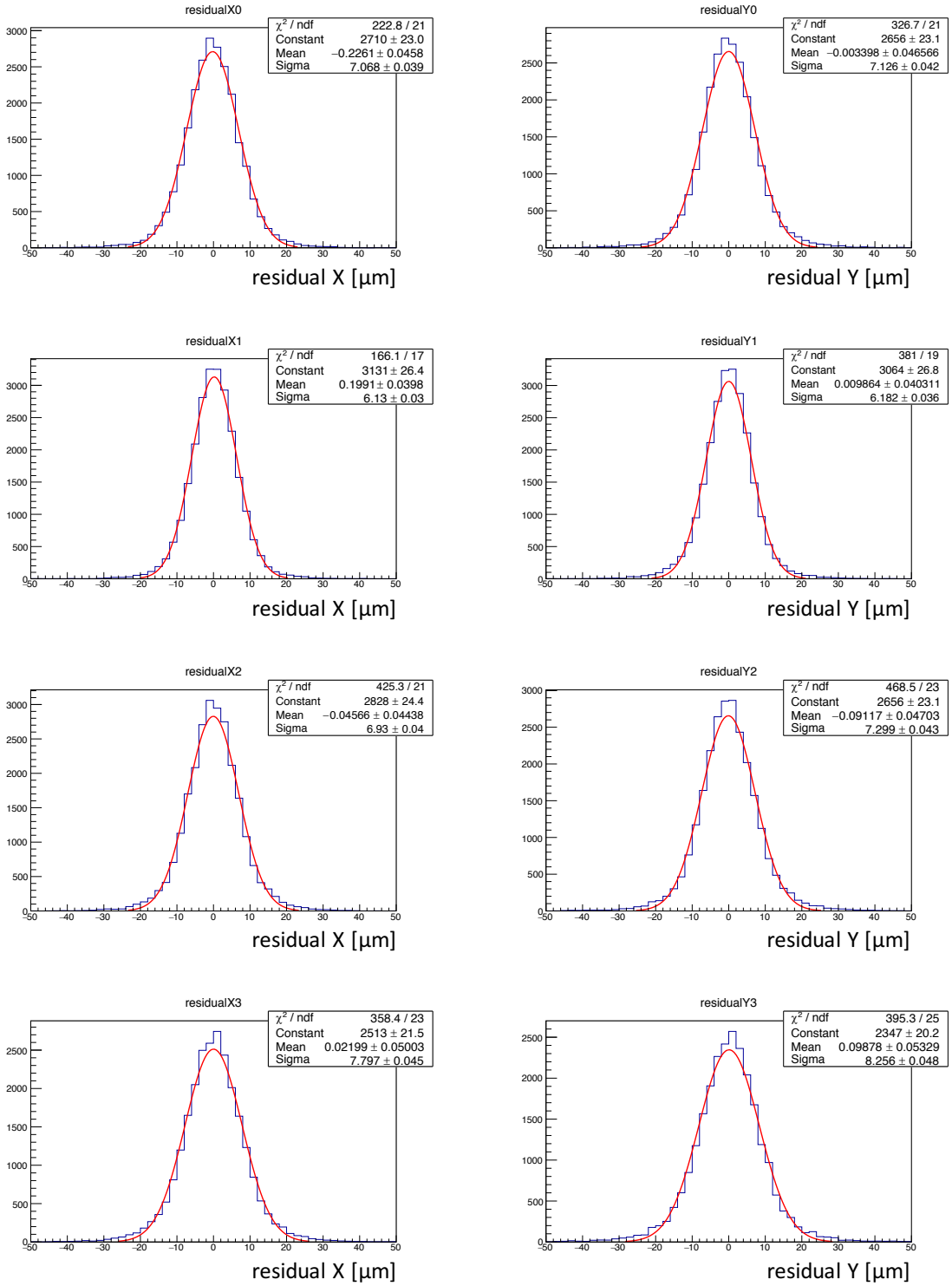


図 6.22　アライメント後の各センサーの残差分布 。左が X 方向、右が Y 方向に対応し、上から順に 1 層目、2 層目、3 層目、4 層目に対応する。

表 6.4　テレスコープの各層の位置分解能

層番号	X 方向の位置分解能 [μm]	Y 方向の位置分解能 [μm]
1	5.2	5.1
2	4.6	4.5
3	5.6	6.0
4	6.0	6.5

1 層目の角度の設置誤差

本解析では、1 層目の X, Y 軸周りの回転角を 10 度に固定してアライメントを行った。この場合、アライメント後には、各層は 1 層目の回転角に合わせた補正を受ける。1 層目の回転角は補正されず、設置精度により微小角 δ_ϕ ずれたままであり、グローバル座標での位置 X に誤差が伝播する。ローカル座標系での位置 X_{local} との関係は、

$$X = \frac{X_{local}}{\cos\phi} \tag{6.19}$$

であり、誤差伝播より、

$$\delta_X = \frac{X_{local}\,\sin\phi}{\cos^2\phi}\,\delta_\phi \tag{6.20}$$

$$= \frac{X\,\sin\phi}{\cos\phi}\,\delta_\phi \tag{6.21}$$

$$\sim \phi\delta_\phi X \tag{6.22}$$

となる。ただし、ϕ は微小角とした。本実験においては、$\phi = 10$ 度$\times\pi/180$, $\delta_\phi \sim 1$ 度$\times\pi/180$ であるので、

$$\delta_X \sim 3 \times 10^{-3}\,X \tag{6.23}$$

となる。これはスケール誤差があることを示し、その寄与は 0.3 % と非常に小さい。

6.7.2　飛跡の位置分解能

飛跡が Z 軸に平行な場合、トラック位置 x^{track} は、各層の検出位置 $x_1,\ x_2,\ x_3,\ x_4$ を分解能 $\sigma_1,\ \sigma_2,\ \sigma_3,\ \sigma_4$ で重み付けすることで、

$$x^{track} = \frac{x_1\sigma_1^{-2} + x_2\sigma_2^{-2} + x_3\sigma_3^{-2} + x_4\sigma_4^{-2}}{\sigma_1^{-2} + \sigma_2^{-2} + \sigma_3^{-2} + \sigma_4^{-2}} \tag{6.24}$$

と表せる。従って、トラック位置の分解能 σ_{track} は、

$$\sigma_{track} = \left(\sqrt{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \frac{1}{\sigma_3^2} + \frac{1}{\sigma_4^2}} \right)^{-1} \tag{6.25}$$

となる。表 6.4 より、位置分解能は 3 μm と求まった。

6.8 回転角の見積もりと電荷分割の様子

6.8.1 回転角の見積もり

トラック位置とローカルヒット位置の相関から、各層の荷電粒子ビームに対する、X 軸周りまたは Y 軸周りの回転角を見積もることができる。

センサーが Y 軸周りに ϕ (rad) 回転しているとき、X 方向のローカルヒット位置に対して X 方向のトラック位置は $\cos\phi$ でスケールされる。図 6.23 に 2 層目の X 方向のトラック位置とローカルヒット位置の相関を示す。傾きからこの層の Y 軸周りの回転角は 12.6 度と求まった。

本研究で用いた治具では、Y 軸周りの回転後に X 軸周りの回転を与えているので、Y 方向のグローバルヒット位置は X 方向のグローバルヒット位置に依存する。Y 方向のローカルヒット位置とグローバルヒット位置の差と X 方向のグローバルヒット位置の相関からこの寄与を見積もることができる。図 6.24 に Y 方向のローカルヒット位置とグローバルヒット位置の差と X 方向のグローバルヒット位置の相関を示す。各 X 方向のグローバルヒット位置に対して平均値を取り、その傾きと切片を評価した。この寄与を打ち消した後の 2 層目の Y 方向のトラック位置とローカルヒット位置の相関を図 6.25 に示す。傾きからこの層の Y 軸周りの回転角は 10.2 度と求まった。求めた各層の X 軸周り, Y 軸周りそれぞれの結果を表 6.5 に示す。

表 6.5　見積もったテレスコープの回転角

層番号	Y 軸周りの回転角 [度]	X 軸周りの回転角 [度]
1	10.1	9.9
2	12.3	10.2
3	10.6	9.2
4	10.1	9.9

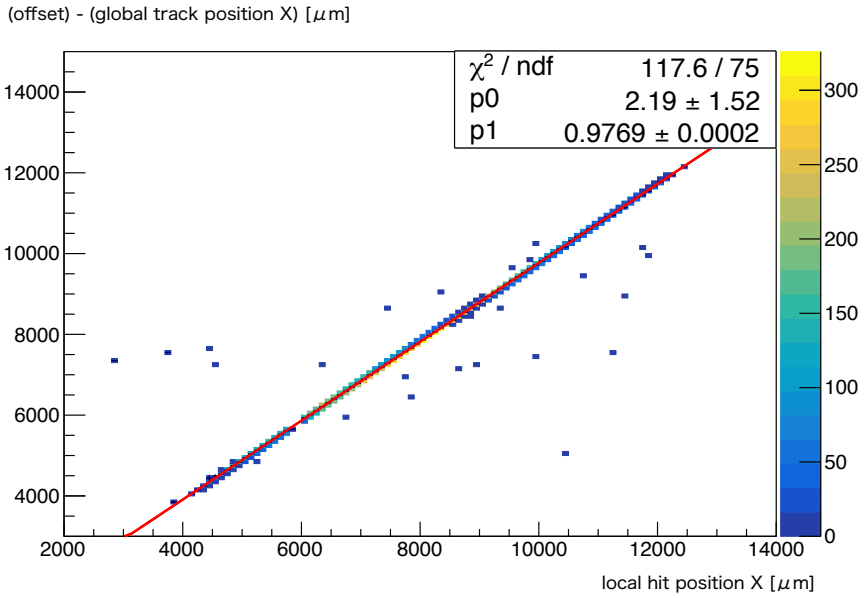


図 6.23　X 方向のトラック位置とローカルヒット位置の相関。横軸は検出した電荷情報とチャンネル情報から、電荷重心を用いて求めた 2 層目の X 方向の検出位置を示し、縦軸は 2 層目以外のテレスコープを用いて求めた X 方向のトラック位置である。

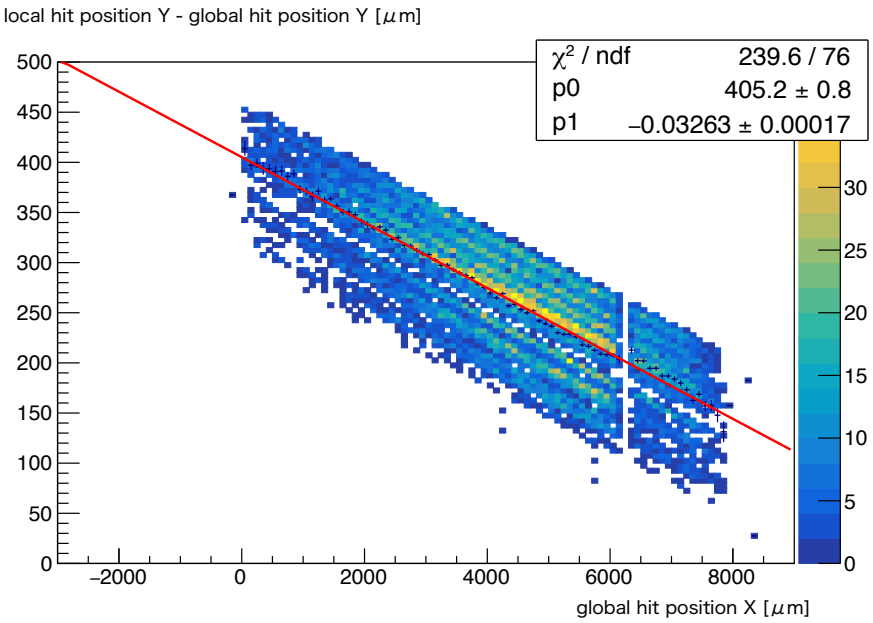


図 6.24　Y 方向のローカルヒット位置とグローバルヒット位置の差と X 方向のグローバルヒット位置の相関。横軸は 2 層目の X 方向のグローバルヒット位置を示し、縦軸は 2 層目の Y 方向のローカルヒット位置からグローバルヒット位置を引いた値である。

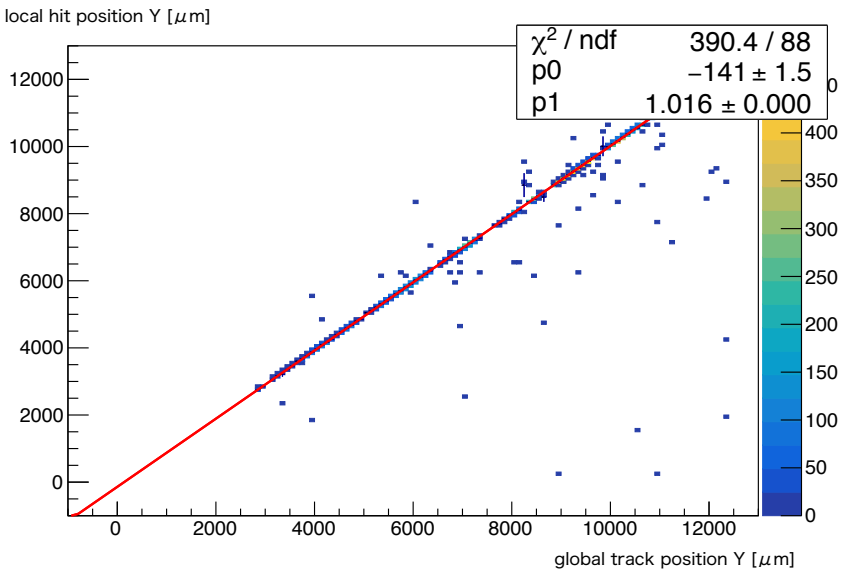


図 6.25　Y 方向のトラック位置とローカルヒット位置の相関。横軸は 2 層目以外のテレスコープを用いて求めた Y 方向のトラック位置を示す。ただし、X 方向のグローバルヒット位置による影響を打ち消すように補正している。縦軸は検出した電荷情報とチャンネル情報から、電荷重心を用いて求めた 2 層目の Y 方向の検出位置である。

6.8.2　電荷分割の様子

評価対象の層以外の層での検出位置から求めたトラック位置を用いることで、電荷分割の入射位置依存性を評価できる。

前節で求めたローカルヒット位置とトラック位置の関係をもちいて、トラック位置をローカル座標に対応させた。ローカル座標に対応させたトラック位置において、50 μm はストリップ幅に相当し、50 μm の周期で重ね書きすることで、ストリップに対する入射位置の依存性を評価する。0, 50 μm はストリップの端に対応する。

図 6.26 にストリップの幅の周期で重ね書きした、2 層目の X 方向の電荷の位置依存性を示す。(A) はクラスターを構成するチャンネルの最大電荷量とローカル座標に対応させたトラック位置、(B) はクラスターを構成するチャンネルのうち 2 番目の電荷量とローカル座標に対応させたトラック位置の相関を示している。3.1 節で述べたように、入射位置と電荷量には相関があり、全入射位置において電荷分割が起きていることがわかる。ストリップ境界では、クラスターを構成するチャンネルの最大電荷量が増え、2 番目の電荷量が減っていることがわかる。この結果は、ストリップ境界で電荷分割をすることと矛盾しない。(C) はクラスターの合計電荷量から最大電荷量と 2 番目の電荷量を引いた値とローカル座標に対応させたトラック位置の相関を示す。ストリップの端では、主にエネルギー

を落とした 2 つのストリップ以外のストリップ上で観測された電荷量が、ペデスタルに比べ有意にあることを確認した。従って、2 層目の X 方向のセンサーは荷電粒子ビームに対して、10 度以上傾いている。このことは表 6.5 に示した結果と一致する。

図 6.27 はストリップの幅の周期で重ね書きした、4 層目の X 方向の電荷の位置依存性を示す。(A), (B), (C) はそれぞれ図 6.26 と対応する。2 層目と異なり、横軸の $0 \sim 5$, $40 \sim 50$ μm において、(B) の電荷量がペデスタルまで落ちている。これは、荷電粒子が 1 つのスリップのみに通過していることを表す。1 つのスリップのみに通過する事象があるような入射角においては、3 つのストリップにまたがるように通過することはない。このことは、(C) の結果と一致している。一方で、表 6.5 に示した結果の 10.1 度の傾きを想定した場合、幾何学的に荷電粒子が 1 つのスリップのみを通過する事象は起こりえない。

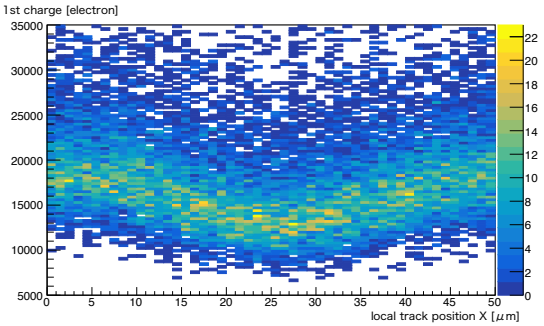
2 層目、4 層目ともに、クラスターの全てのチャンネルの電荷量の和は入射位置に依らず一様であることが図 6.28, 6.29 より確認出来た。

クラスターサイズとの相関

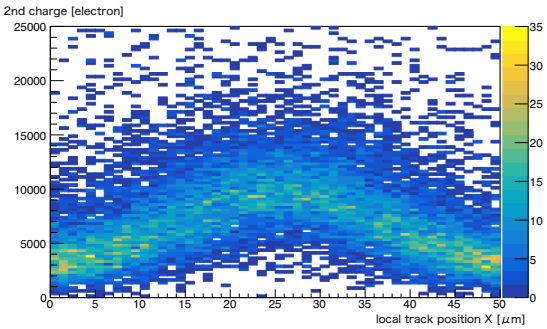
電荷分割の様子からクラスターサイズ分布は推測することができる。本解析では、(ペデスタル) + (ノイズの 9 倍) の閾値を超えたチャンネルとその両隣のチャンネルをクラスターとした。従って、クラスターサイズは閾値を超えたチャンネルの数に 2 を足した数になる。ADC 値から電荷に変換する際にチャンネル毎の誤差がない場合、閾値は一定の電荷量となる。例えば、2 層目の X 方向のセンサーであれば、ノイズ量の平均値が 1.4 ADCcount で、ゲインが 530 electron/ADCcount であるから、閾値は電荷量 6.7×10^3 electron となる。図 6.26 の (A) において、全ての事象で電荷量 6.7×10^3 electron を超えていることから最小クラスターサイズは 3 となる。図 6.26 の (B) において、電荷量 6.7×10^3 electron を超える事象は全事象の 54 % であった。図 6.26 の (C) において、電荷量 6.7×10^3 electron を超える事象は全事象の 0.3 % であり、これらの事象を無視すると、最大クラスターサイズは 4 となる。この見積もりの例では、2 層目の X 方向のセンサーのクラスターサイズは 3 が 46 %、4 が 54 % となるが、これは図 6.6 に示した、各センサーのクラスターサイズの分布と一致しない。これはチャンネル毎にノイズ量やゲインにばらつきがあり、異なった電荷量が閾値となっていることに起因する。

6.9 分解能の入射位置依存

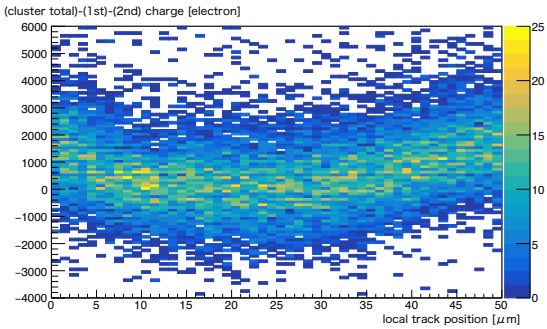
2 層目と 4 層目それぞれについて、ローカル座標に対応させた、グローバルヒット位置とトラック位置の相関を図 6.30、図 6.32 に示す。2 層目ではトラック位置とグローバルヒット位置に正の相関がみられ、入射位置に寄らず線型に検出位置を決定しているこ



(A)

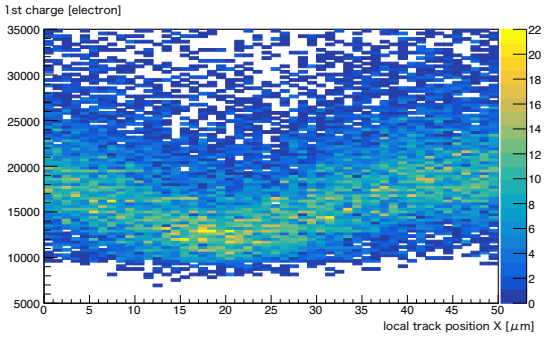


(B)

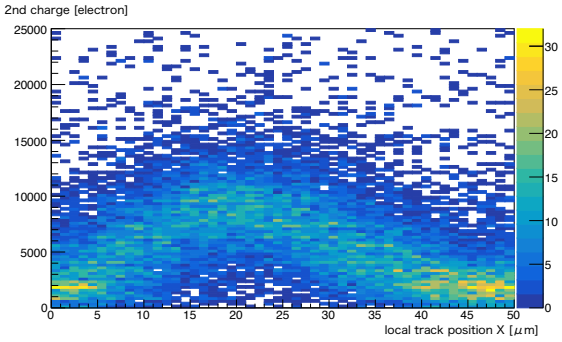


(C)

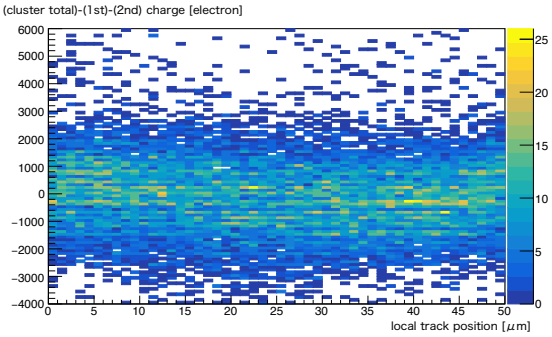
図 6.26　2 層目の電荷量とローカル座標に対応させたトラック位置の相関。(A) の横軸はローカル座標に対応させたトラック位置、縦軸はクラスターを構成するチャンネルのうちの最大電荷量である。(B) の横軸はローカル座標に対応させたトラック位置、縦軸はクラスターを構成するチャンネルのうちの 2 番目の電荷量である。(C) の横軸はローカル座標に対応させたトラック位置、縦軸はクラスターの合計電荷量から最大電荷量と 2 番目の電荷量を引いた値である。



(A)



(B)



(C)

図 6.27　4 層目の電荷量とローカル座標に対応させたトラック位置の相関。(A) の横軸はローカル座標に対応させたトラック位置、縦軸はクラスターを構成するチャンネルのうちの最大電荷量である。(B) の横軸はローカル座標に対応させたトラック位置、縦軸はクラスターを構成するチャンネルのうちの 2 番目の電荷量である。(C) の横軸はローカル座標に対応させたトラック位置、縦軸はクラスターの合計電荷量から最大電荷量と 2 番目の電荷量を引いた値である。

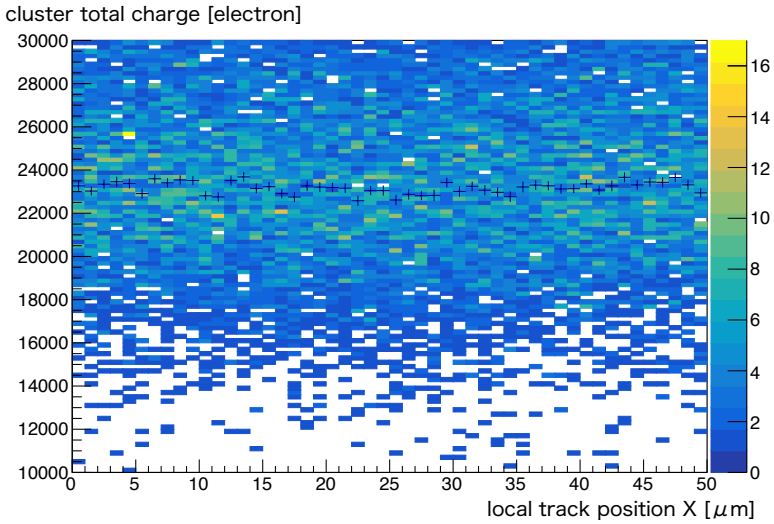


図 6.28　2 層目のクラスターの合計電荷量のトラック位置依存。横軸はトラック位置、縦軸はクラスターの合計電荷量である。横軸のビン毎に平均値と、標準偏差をエントリー数の平方根で除した値を重ね書きした。

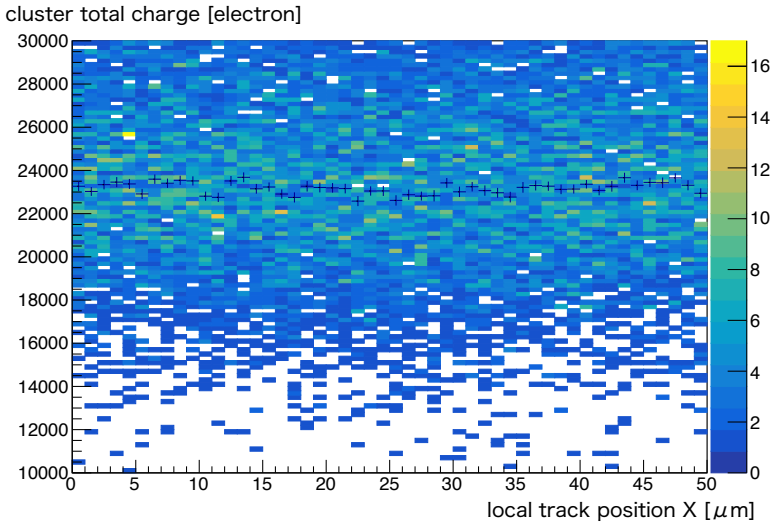


図 6.29　4 層目のクラスターの合計電荷量のトラック位置依存。横軸はトラック位置、縦軸はクラスターの合計電荷量である。横軸のビン毎に平均値と、標準偏差をエントリー数の平方根で除した値を重ね書きした。

とがわかる。一方で、4 層目は線型性がなく歪んでいる。これは、入射位置によって偏ったヒット位置を選んでいることを表している。図 6.27 の (B) が示すように、入射位置 $0 \sim 5$, $40 \sim 50$ μm において、荷電粒子は 1 つのスリップのみに通過している。この領域では電荷情報は意味をなさず、重心法によって求まる検出位置は全てストリップの端へバイアスされる。従って、クラスターサイズが 1 となる入射領域の割合が多いほど、実際の入射位置 (トラック位置) と重心法によって求まる位置 (ヒット位置) の乖離が大きくなる。

2 層目と 4 層目それぞれについて、残差とローカル座標に対応させたトラック位置の相関を図 6.31、図 6.33 に示す。2 層目では残差とトラック位置に強い相関は見られない。一方で、4 層目では残差とトラック位置に相関が見られる。図 6.34 から図 6.37 はそれぞれ、2 層目と 4 層目について描いた、残差の平均とローカル座標に対応させたトラック位置との相関、残差の RMS とローカル位置に対応させたトラック位置との相関である。残差の平均値について、2 層目では横軸との相関はほぼ誤差の範囲内であるのに対して、4 層目では有意に相関が見られる。これは、重心法による検出位置の歪みに起因すると理解出来る。その寄与は、電荷分割によるバイアスが少ない 2 層目については、最大 1 μm 程度であった。電荷分割によるバイアスが大きい 4 層目については、最大 3 μm 程度であった。

図 6.22 において、2 層目と 4 層目の X 方向の残差分布の幅 (ガウシアンフィットで 2σ と定義) の差は ~ 3.3 μm であり、これは残差の位置依存による寄与の差 ~ 2 μm と多重散乱による寄与の差 $2\,\delta_{scat4} \sim 2 \times 0.7$ μm でほぼ説明できる。

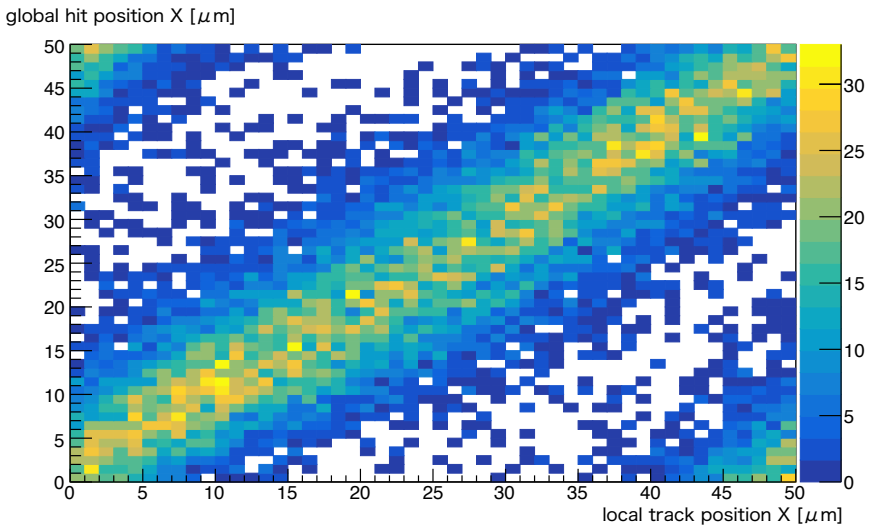


図 6.30　2 層目のローカル座標に対応させたトラック位置とローカル座標に対応させたグローバルヒット位置の相関。横軸は X 方向のローカル座標に対応させたトラック位置、縦軸は X 方向のローカル座標に対応させたグローバルヒット位置である。ほぼ直線の相関がみられる。すなわち、検出位置が特定の位置に偏っていない。

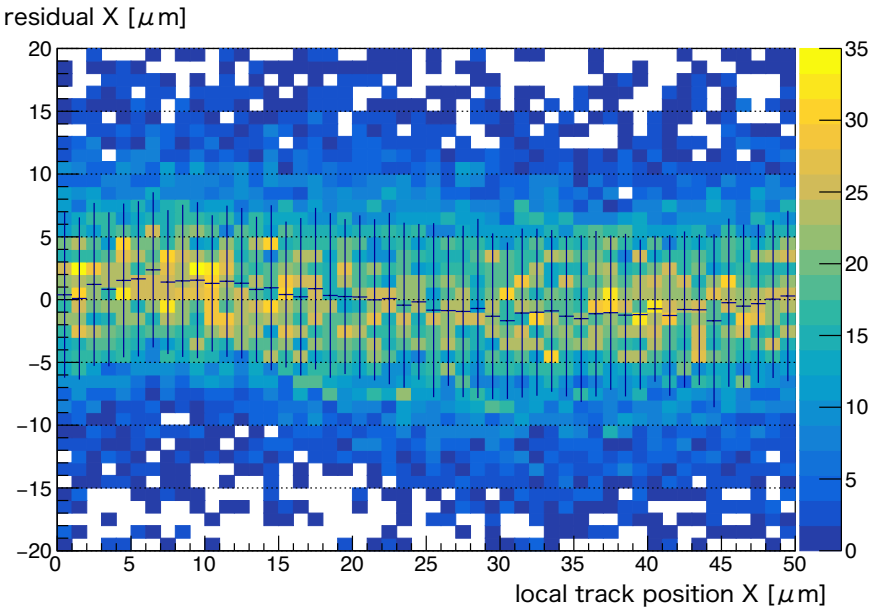


図 6.31　2 層目のトラック位置とグローバルヒット位置の残差とローカル座標に対応させたトラック位置の相関。横軸は X 方向のローカル座標に対応させたトラック位置、縦軸は X 方向のトラック位置とグローバルヒット位置の残差である。横軸のビン毎に平均値と標準偏差を重ね書きした。残差とローカル 座標に対応させたトラック位置に大きな相関はない。

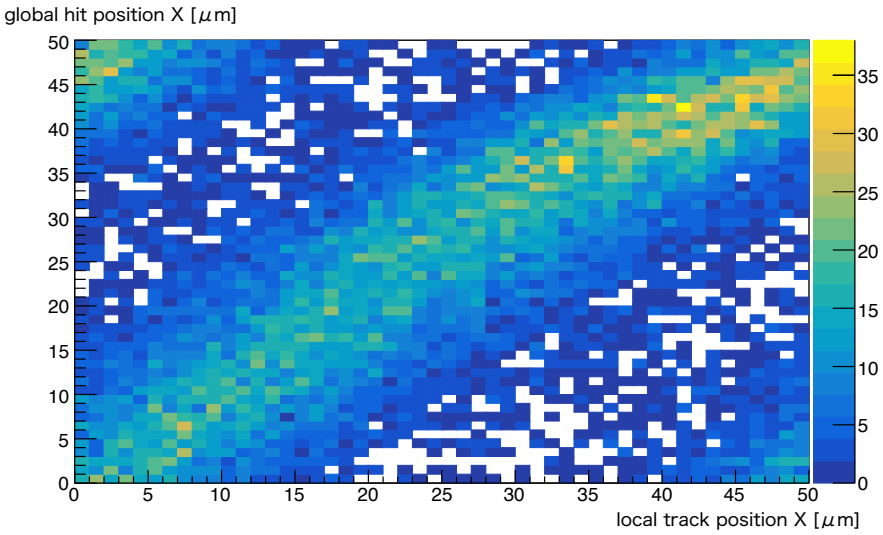


図 6.32　4 層目のローカル座標に対応させたトラック位置とローカル座標に対応させたグローバルヒット位置の相関。横軸は X 方向のローカル座標に対応させたトラック位置、縦軸は X 方向のローカル座標に対応させたグローバルヒット位置である。相関が歪んでいることがわかる。

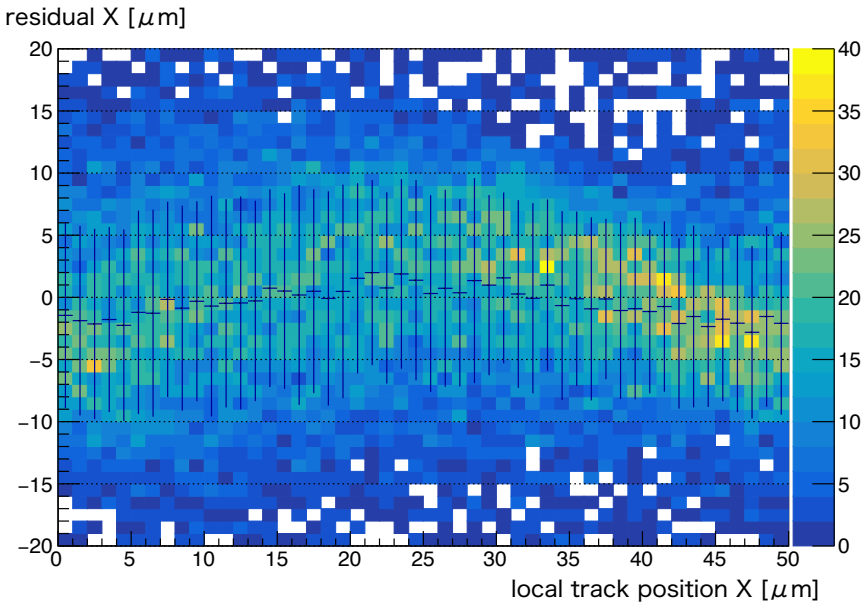


図 6.33　4 層目のトラック位置とグローバルヒット位置の残差とローカル座標に対応させたトラック位置の相関。横軸は X 方向のローカル座標に対応させたトラック位置、縦軸は X 方向のトラック位置とグローバルヒット位置の残差である。横軸のビン毎に平均値と標準偏差を重ね書きした。粒子の入射位置がストリップの中心に来るときに、平均値が高くなっていることがわかる。

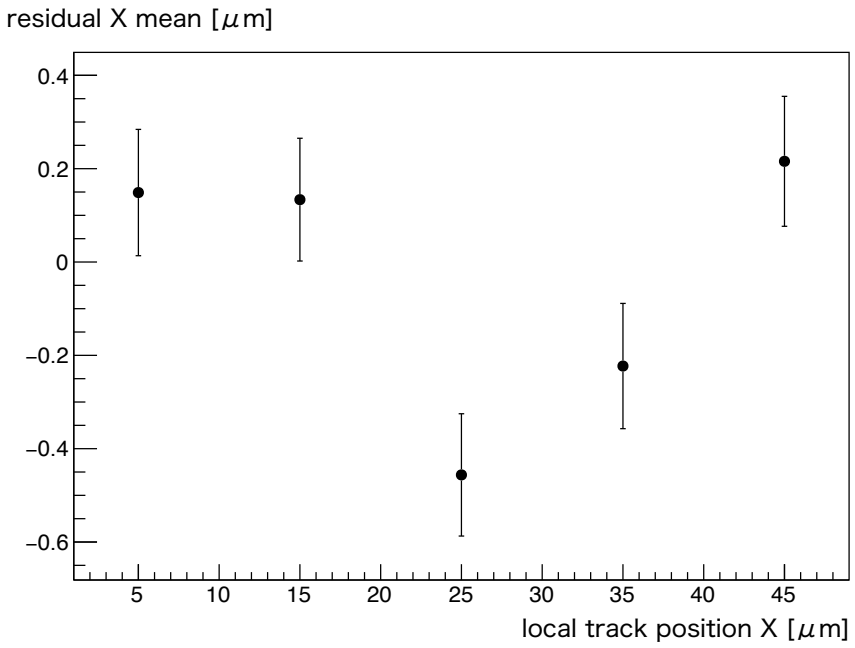


図 6.34　2 層目の残差平均と入射位置の相関

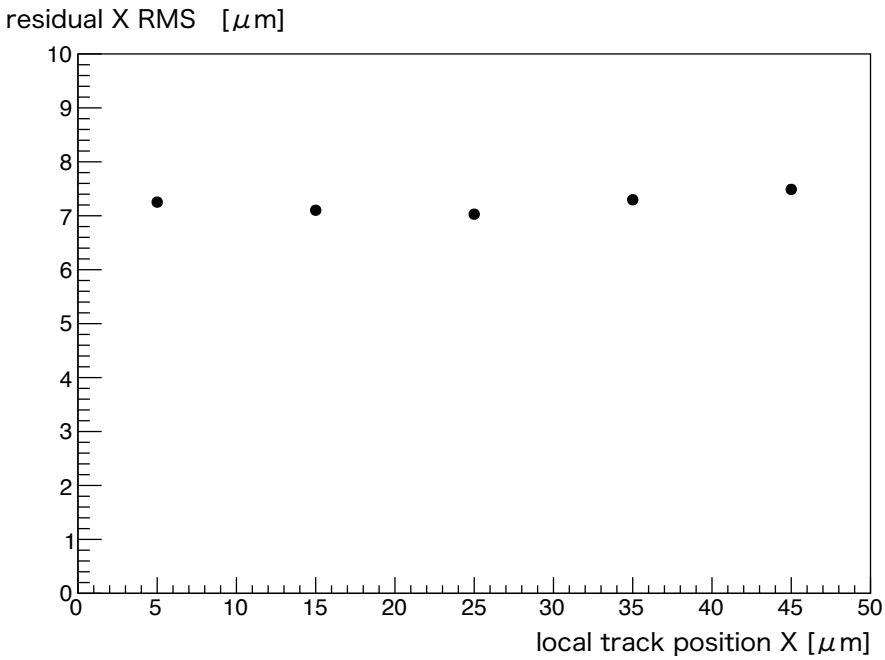


図 6.35　2 層目の残差の RMS と入射位置の相関

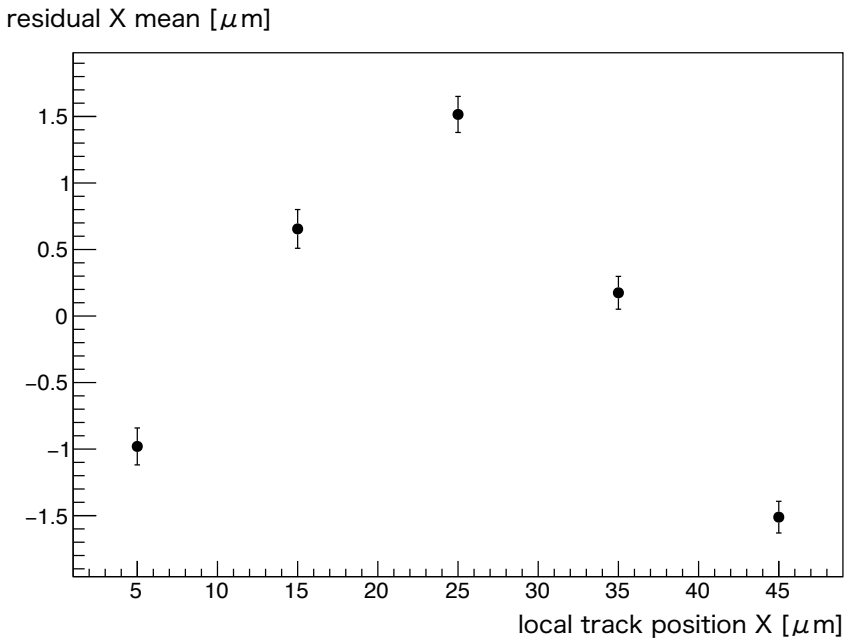


図 6.36　4 層目の残差平均と入射位置の相関

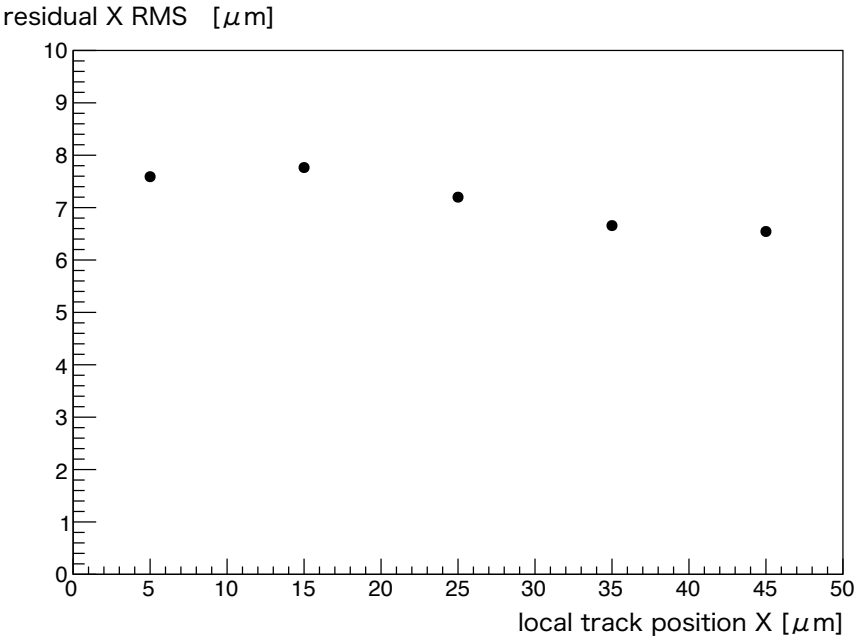


図 6.37　4 層目の残差の RMS と入射位置の相関

第 7 章

結論

HL-LHC で使用予定の 50 μm 角のピクセル検出器を評価するために飛跡再構成テレスコープの位置分解能の研究を行った。センサー厚 300 μm、ストリップ幅 50 μm のストリッ プ型半導体検出器を用いて、ビーム荷電粒子が 2 枚のス トリップにまたがるようにテレスコープ を 10 度を傾け、電荷出力の大きさで重み付けをし、位置を再構成することで分解能を向上させた。

性能評価試験を行った結果、ストリップ型半導体検出器の位置分解能は 5 $\sim$ 7 μm と求まった。センサーのノイズ量、電離損失の揺らぎ、多重散乱の位置分解能への寄与を見積もり、$\sim$ 4 μm が下限値であると評価した。また、1 つのストリップにのみ通過する入射領域がある場合、重心法によって求まる検出位置はバイアスされ、位置分解能は悪くなる。本研究では残差の幅への寄与は $1-3$ μm であった。これらにより検出器の位置分解能への寄与をほぼ理解できた。

4 層のテレスコープの飛跡分解能は 3 μm と求まった。これにより 50 μm 角ピクセル検出器の、検出効率の入射位置依存性の評価が可能になった。

参考文献

[1] CERN, Record Luminosity : well done LHC
https://home.cern/about/updates/2017/11/record-luminosity-well-done-lhc

[2] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the ATLAS ITk Pixel Detector
https://cds.cern.ch/record/2296611/files/ATL-COM-ITK-2017-073.pdf

[3] ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider
https://cds.cern.ch/record/1129811/files/jinst8_08_s08003.pdf

[4] Fermilab, Tevatron Accelerator
http://www.fnal.gov/pub/tevatron/tevatron-accelerator.html

[5] Fermilab, Test Beam Facility : Beam Overview http://ftbf.fnal.gov/beam-overview/

[6] L.Christofek et al., SVX4 Userś Manual
https://www.researchgate.net/publication/255278094_SVX4_User%27s_manual

[7] 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 (2015)

[8] 山内 洋子, 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, 大阪大学修士論文 (2015)

[9] 東野 聡, ATLAS 実験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 プ検出器開発, 大阪大学修士論文 (2013)

[10] CERN, Overall view of lhc experiments http://cds.cern.ch/record/841555

[11] H. Bichsel, Rev. Mod. Phys. **60**, 663 (1988).