

修士論文

LHC-ATLAS 実験における SCT 検出器の位置分解能評価

大阪大学 大学院理学研究科物理学専攻
南條研究室 博士前期課程 2 年

泉尾 翼

概要

ATLAS 実験は、陽子陽子衝突型円形加速器 Large Hadron Collider (LHC) を用いて、新粒子の探索やヒッグス粒子の精密測定を行っている。陽子陽子衝突で発生する粒子を、ATLAS 検出器で観測する。内部飛跡検出器で荷電粒子の通過位置を測定し、飛跡を再構成する。その飛跡の曲率から荷電粒子の運動量を測る。内部飛跡検出器の一つに、ストリップ型半導体検出器 (SemiConductor Tracker, SCT) がある。運動量の測定精度に、SCT 検出器の位置分解能が寄与する。

ATLAS 実験は現在、ビームの重心系エネルギー 13.6 TeV で Run3 実験 (2022 年から 2026 年) が行われている。内部飛跡検出器は、ATLAS 検出器の最内層にあり、高放射線下で運転している。Run3 終了時点での照射量は、Run1 から Run2 にかけての照射量と同程度となることが予想される。放射線損傷により、位置分解能が悪化する恐れがある。Run3 以降では、SCT 検出器の位置分解能を系統的に調査した研究はされていない。そこで、本研究では Run3 環境で運転し続けている SCT 検出器の位置分解能を調べた。位置分解能には、検出器に印加する高電圧や、ビーム内の粒子衝突数、検出器の位置などの依存性があることがわかった。それらの依存性を取り除いたうえで、2022 年から 2024 年にかけての位置分解能の変化を調べた。その結果、位置分解能と放射線照射量に相関があることがわかった。

目次

1	序論	4
1.1	LHC-ATLAS 実験	4
1.2	ATLAS 検出器	5
1.3	内部飛跡検出器	5
1.4	SCT 検出器	6
1.5	本研究の目的	6
2	SCT 検出器	8
2.1	動作原理	8
2.1.1	半導体	8
2.1.2	n 型半導体、p 型半導体	8
2.1.3	pn 接合	9
2.2	SCT 検出器のレイアウト	10
2.3	SCT 検出器	11
2.3.1	センサー	11
2.3.2	モジュール	12
2.3.3	クラスターサイズ	13
2.4	放射線損傷	13
2.4.1	格子欠陥	14
2.4.2	漏れ電流	14
2.4.3	電荷収集効率	15
2.4.4	バルクの型変換	17
2.5	Performance Analysis Tool (PAT)	18
3	位置分解能の評価方法	23
3.1	評価方法	23
3.2	飛跡再構成	24
3.2.1	飛跡パラメータ	24
3.2.2	再構成アルゴリズム	24
3.2.3	バイアス	27
4	使用したデータ	28
4.1	ルミノシティ	28
4.2	使用したデータ	28
4.3	飛跡の選択	29

5	評価	32
5.1	パイルアップ依存性	32
5.1.1	方法	32
5.1.2	結果	33
5.2	飛跡再構成に用いるヒット数依存性	34
5.3	高電圧依存性	34
5.3.1	高電圧とヒット検出効率	35
5.3.2	高電圧と位置分解能	36
5.4	各 Run の比較	37
5.4.1	位置分解能の比較	37
5.4.2	放射線損傷と位置分解能	40
5.4.3	放射線損傷とヒット検出効率	41
6	議論	43
7	結論	44
付録 A	ATLAS 検出器の座標系	45
付録 B	各検出器	46
B.0.1	超伝導磁石	46
B.0.2	内部飛跡検出器	47
B.0.3	カロリメータ	49
B.0.4	ミューオン検出器	50
付録 C	検出器の位置依存性	51
	謝辞 56 参考文献 57	

1 序論

本研究の目的を説明するため、まず LHC-ATLAS 実験を説明する。実験で使われる ATLAS 検出器、および本研究の主題である SCT 検出器の概要を説明し、最後に本研究の目的を説明する。

1.1 LHC-ATLAS 実験

Large Hadron Collider (LHC) は、ジュネーブ郊外にある周長 27 km の世界最大の陽子陽子衝突型円形加速器である。スイスとフランスの国境を跨ぐ、地下約 100 m に掘られたトンネル内にある。LHC には 2 つのビームパイプがあり、それぞれで陽子を 7 TeV^{*1}まで加速し、衝突させる。図 1.1 のように、衝突点の一つに ATLAS 検出器があり、陽子陽子衝突で発生する粒子を観測する。ATLAS 実験は、新粒子の探索やヒッグス粒子の精密測定を目的とする。

図 1.2 に示すように、2011 年から 2013 年にビームの重心系エネルギー 7 TeV、8 TeV で Run1 実験が、2015 年から 2018 年に 13 TeV で Run2 実験が行われた。そして現在、13.6 TeV で Run3 実験（2022 年から 2026 年）が行われている。

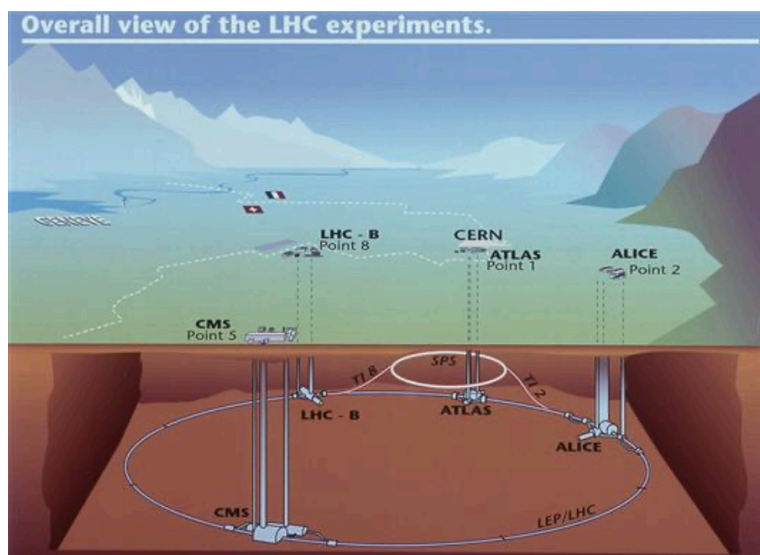


図 1.1 LHC 加速器の俯瞰図。4 箇所の衝突点で実験が行われる。[1]

*1 設計値が 7 TeV であり、2024 年では 6.8 TeV

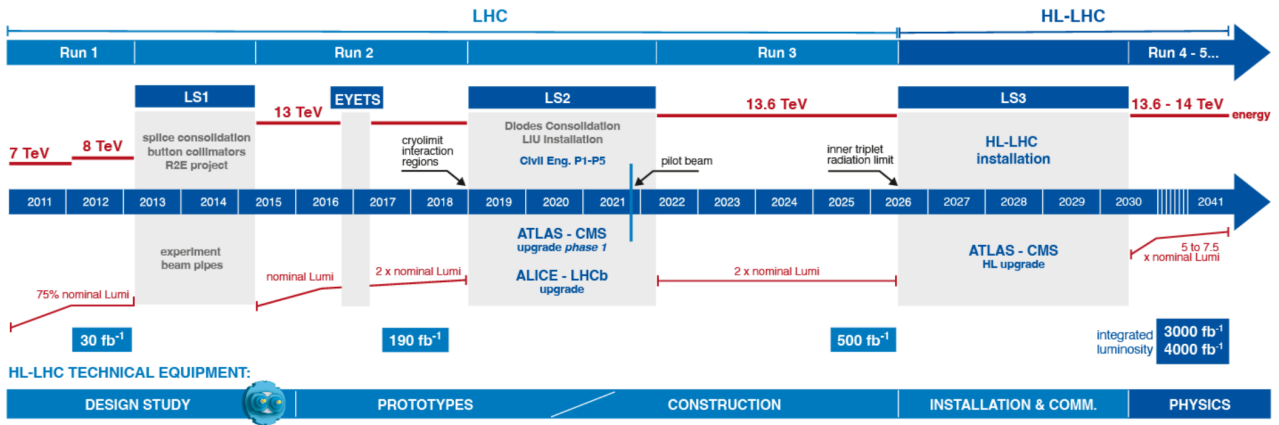


図 1.2 LHC の運転スケジュール [2]

1.2 ATLAS 検出器

ATLAS 実験では、図 1.3 に示す ATLAS 検出器を用いる。ATLAS 検出器は直径 25 m、長さ 44 m の円筒形である。ATLAS 検出器を構成する複数の検出器で取得した信号を用いて、陽子陽子衝突で発生した粒子を再構成し、運動量やエネルギーを測定し、粒子の種類を同定する。

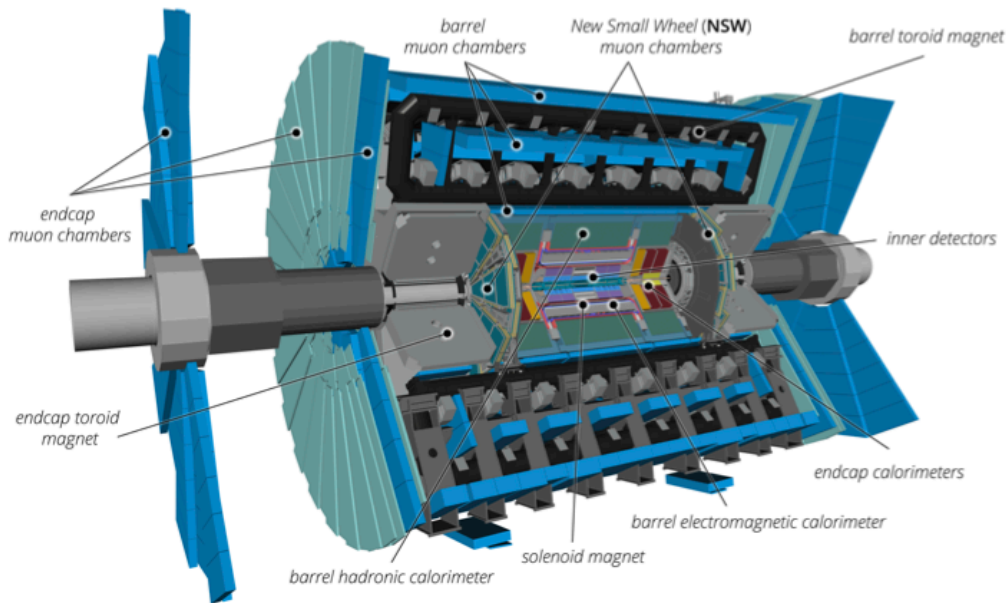


図 1.3 ATLAS 検出器の全体像 [3]

1.3 内部飛跡検出器

ATLAS 検出器の最も内側に、内部飛跡検出器がある。荷電粒子の通過位置を測定し、飛跡を再構成する。通過位置の測定精度を、位置分解能という。また、内部飛跡検出器には 2 T の磁場がかけられており、それにより粒子の飛跡が曲げられる。その曲率から、荷電粒子の運動量を測定

する。図 1.4 に内部飛跡検出器の全体像を示す。

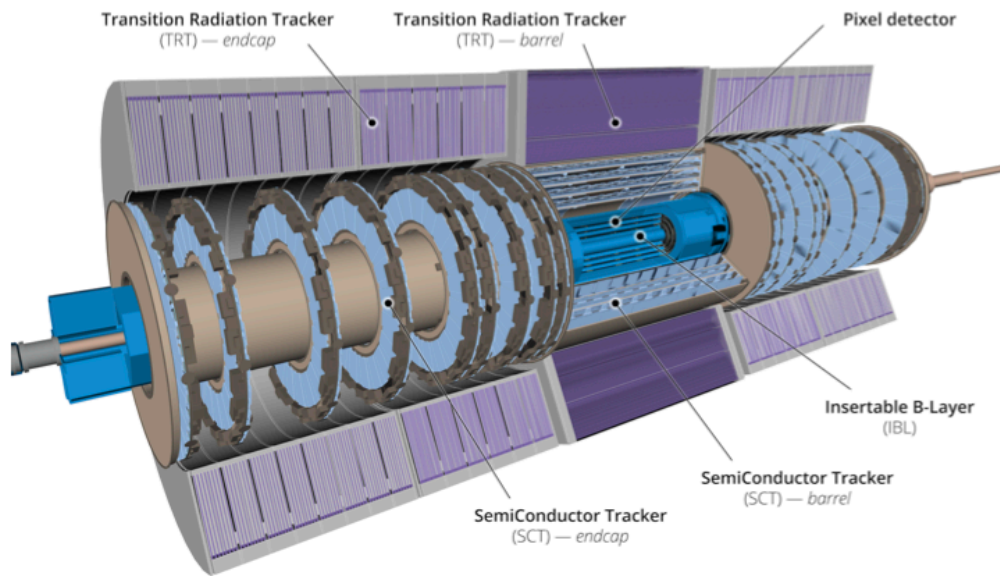


図 1.4 内部飛跡検出器の全体像 [3]

1.4 SCT 検出器

内部飛跡検出器の一つに、ストリップ型半導体検出器 (SemiConductor Tracker, SCT) がある。ビーム軸に対して垂直方向に 0.56 m、ビーム軸方向に 2.7 m の領域を覆う。4 層のバレル部、9 層のエンドキャップ部からなる。バレル部の位置分解能の理論値は 23 μm である。検出器にはシリコン半導体を用いられており、放射線による損傷を受ける。損傷を受けると、ノイズとなる漏れ電流の増加や、電荷収集効率の低下が起きる (それぞれ 2 章で説明)。それにより、位置分解能が悪化する恐れがある。

2014 年に行われた先行研究 [4] では、Run1 終了時点の位置分解能が 22 μm であることが確認された。また、2000 年に行われた放射線照射テスト [5] では、Run3 終了時点と同程度の放射線をセンサーに照射し、位置分解能が悪化しないことが確認された。しかし、実際に Run3 以降のデータを使って、SCT 検出器の位置分解能を系統的に調査した研究はされていない。

1.5 本研究の目的

内部飛跡検出器は衝突点の近くにあり、高放射線下にある。図 1.5 に、Run1 から Run3 にかけてのバレル部各 4 層における放射線照射量を示す。SCT 検出器の運転は Run3 で終了し、2030 年以降の Run では新しい検出器に入れ替えられる。Run3 終了時点での照射量は、Run1 から Run2 にかけての照射量の 2 倍程度となることが予想される。1.4 節で述べたように、放射線損傷により位置分解能が悪化する恐れがある。そこで本研究では、2022 年から 2024 年のデータを使って、放射線損傷による位置分解能の変化を調べた。

本論文では、2章で本研究の主題である SCT 検出器の動作原理と放射線損傷の影響を、3章で位置分解能の評価方法を、4章で評価に使ったデータを説明する。5章で位置分解能の、ビーム衝突量や検出器に印加する高電圧などの運転環境との依存性を述べた後、それらの効果を除いて調べた放射線損傷の影響を述べる。6章で、5章で得られた結果から予想される、Run3 終了時点での位置分解能を述べる。7章で本研究の結論を述べる。

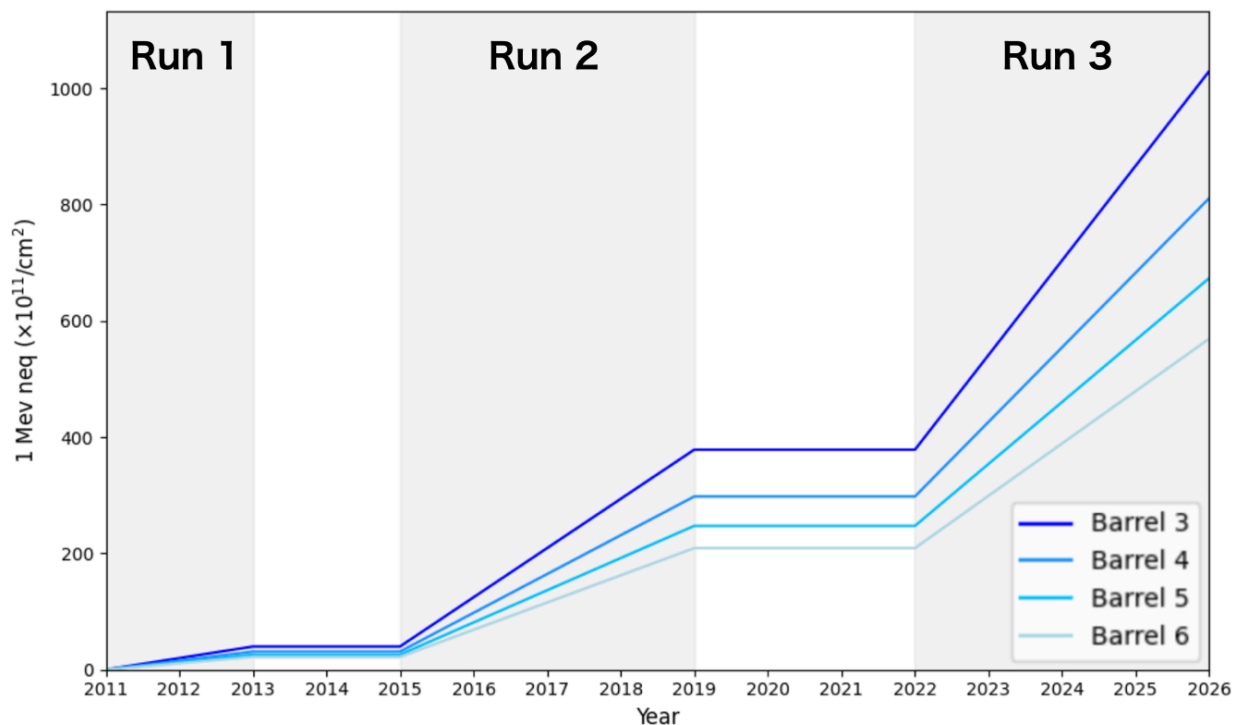


図 1.5 バレル部各 4 層における、1 MeV 中性子に換算した放射線照射量。FLUKA シミュレーションで予想される照射量 [6] を使って計算した。

2 SCT 検出器

この章では、本論文の研究対象である SCT 検出器を説明する。2.1 節ではその動作原理を、2.2 節では検出器の配置を、2.3 節ではセンサーやモジュールを、2.4 節では放射線が SCT 検出器に与える影響を、2.5 節では自身が開発に携わった Performance Analysis Tool (PAT) を説明する。

2.1 動作原理

2.1.1 半導体

半導体は、導体と絶縁体の中間の性質を持つ物質である。図 2.1 に導体・絶縁体・半導体の模式図を示す。半導体では、バンドギャップにより価電子帯と伝導帯が分かれており、このエネルギー差をバンドギャップエネルギーと呼ぶ。SCT 検出器で用いられるシリコン半導体のバンドギャップエネルギー E_g は、1.12 eV である。導体はバンドギャップがなく、電子が伝導帯に存在するため、外部から電場をかけると電流が流れる。絶縁体はバンドギャップが大きいため、外部から電場をかけても、電子が伝導帯に移動できるだけのエネルギーが得られず、電流は流れない。半導体は、熱エネルギーなどの外部からのエネルギーによって電子が伝導帯に移動でき、外部から電場をかけると電流が流れる。また、電子が存在する確率が 50% となるエネルギー準位を、フェルミ準位 E_f と呼ぶ。

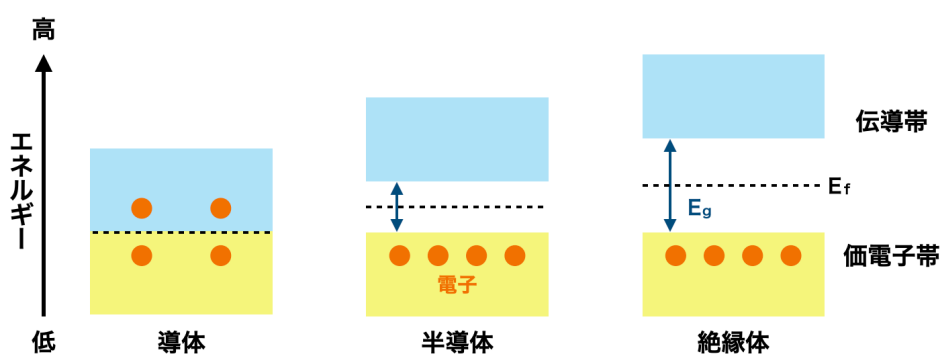


図 2.1 導体・半導体・絶縁体の価電子帯、伝導帯、バンドギャップの模式図

2.1.2 n 型半導体、p 型半導体

純粋な半導体は電気伝導性が低いので微量の不純物を加えて伝導性を高める。これを不純物半導体と呼び、n 型半導体と p 型半導体に分けられる。ここでは、SCT 検出器で用いられるシリコン半導体を例として説明する。n 型半導体は、不純物としてリンなどの 5 価の元素をわずかに混ぜたものを指す。この時、不純物として加えた元素をドナーと呼ぶ。5 価の元素を加えると、シリコン原子と結合する際に電子が一つ余り、ドナー準位が新たにできる。ドナー準位は伝導帯の近

くにあり、フェルミ準位が伝導帯に近づくため、ドナー準位から伝導帯への移動が容易になる。p型半導体は、不純物としてホウ素などの3価の元素をわずかに混ぜたものを指す。この時、不純物として加えた元素をアクセプタと呼ぶ。3価の元素を加えると、シリコン原子と結合する際に電子が一つ不足し、アクセプタ準位が新たに形成される。アクセプタ準位は価電子帯の近くにあり、フェルミ準位が価電子帯に近づくため、価電子帯からアクセプタ準位への移動が容易になる。電子がアクセプタ準位に移動すると、価電子帯に正孔ができる。正孔はキャリアとして働き、電流が流れやすくなる。

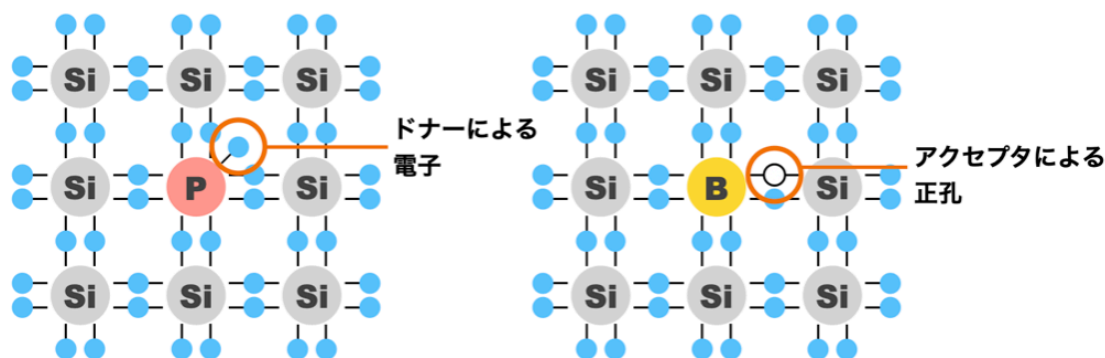


図 2.2 n 型半導体 (左) と p 型半導体 (右)

2.1.3 pn 接合

n 型半導体と p 型半導体を接合することを pn 接合と呼ぶ。pn 接合により、電子と正孔の濃度勾配が生じる。熱運動により、n 型半導体の電子は p 型半導体方向へ、p 型半導体の正孔は n 型半導体方向へ動く。電子と正孔は互いに打ち消し合うため、接合部には電子も正孔も存在しない空乏層と呼ばれる領域が生じる。空乏層において、ドナーが正に、アクセプタが負にイオン化することで帯電し、内蔵電場と呼ばれる電場が生じる。ここで、それぞれのイオンをドナーイオン、アクセプタイオンと呼ぶ。2.3.1 節で述べるように、荷電粒子が空乏層を通過することで、SCT センサーは信号を得る。そのため空乏層を広くすることで、検出効率が上がる。p 型に負、n 型に正の電圧 (逆バイアス電圧) を印加することで空乏層内の電場を強め、空乏層をさらに広げることができる。

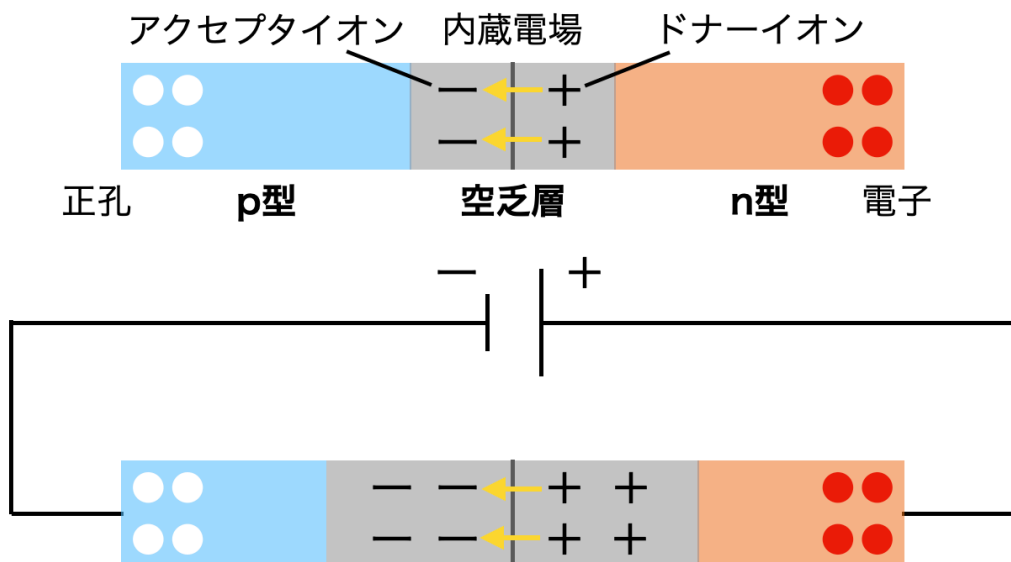


図 2.3 pn 接合の模式図（上）と逆バイアス電圧を印加した時の様子（下）

2.2 SCT 検出器のレイアウト

SCT 検出器は、4 層のバレル部と 9 層のエンドキャップ部サイド A、サイド C から成る。バレル部の各層を、ビームパイプに近い方から、バレル 3 から 6 と呼ぶ。エンドキャップ部の各層を、衝突点に近い方から、ディスク 1 から 9 と呼ぶ。また、各ディスクはビームパイプに近い方から Inner、Middle、Outer の 3 種類に分けられる。図 2.4 に、それぞれの配置を示す。

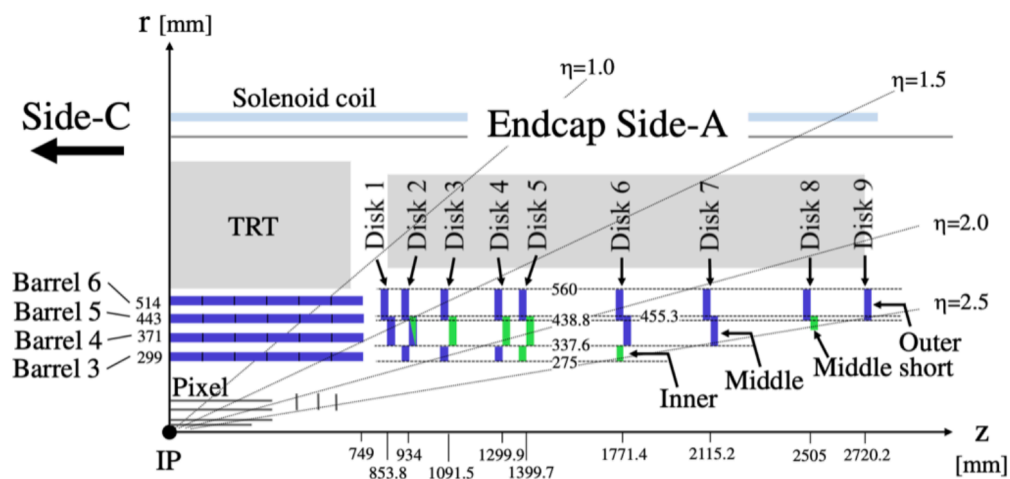


図 2.4 衝突点 (Interaction Point, IP) を原点とした、z-r 平面における SCT 検出器の断面図。SCT 検出器のバレル層、エンドキャップディスクの配置 [11]。

2.3 SCT 検出器

2.3.1 センサー

SCT 検出器のセンサーは、n-バルクと呼ばれる n 型半導体の中に、p+ インプラントと呼ばれる p 型半導体が埋め込まれている。このようなセンサーを p-in-n 型センサーと呼ぶ。n-バルク全体が空乏化する時の電圧を全空乏電圧と呼び、SCT 検出器の動作時にはそれ以上の電圧を印加する。

図 2.5 にセンサーの模式図を示す。センサーに荷電粒子が通過しエネルギーを落とすと、空乏層内で電子-正孔対ができる。正孔は電場によって p+ インプラントへ移動し、p+ インプラントと蒸着されたアルミ読み出しストリップから信号として読み出される。その後、信号は読み出し回路に入る。1 fC の閾値を超えた信号に対してデジタル信号を生成し、荷電粒子のヒットがあるか無いかのバイナリ情報を読み出す。最小電離粒子相当の荷電粒子が、厚さ 285 μm の SCT センサーを通過する際のエネルギー損失は、約 116 keV である。このうち約 80 keV が電子正孔対の生成に使われ、残りのエネルギーは格子振動に使われる。シリコンセンサーにおいて、ひとつの電子-正孔対を生成するために必要な荷電粒子のエネルギーは、300 K において 3.6 eV である。そのため、約 20,000 個の電子-正孔対が生成される [13]。これを電荷に換算すると約 3 fC であり、1 fC の閾値に対して十分な電荷量が得られる。

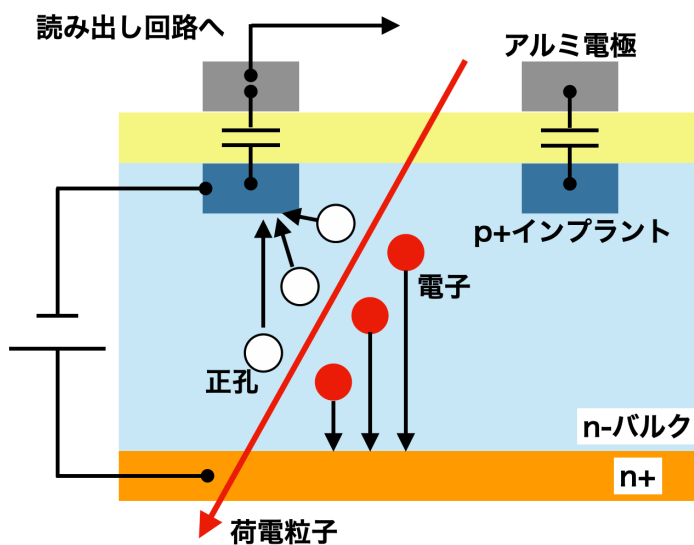


図 2.5 p-in-n 型センサー

ストリップ状に読み出しチャンネルがあり、一次元の位置情報が得られる。バレル部とエンドキャップ部では、一枚のセンサーにおけるストリップの本数は 768 本で同じだが、形状が異なる。バレル部のセンサーは 63.6 mm \times 63.6 mm の正方形で、ストリップ間隔は 80 μm である。一方、エンドキャップ部のセンサーはディスク上に配置されているため、くさび型の形状をとる。またエンドキャップ部は、Inner モジュールは W12、Middle モジュールは W21、W22、Outer モ

ジュールは W31、W32 の 5 種類のセンサーが用いられている。くさび型のため、センサー内の場所によってストリップ間隔が異なる。表 1 に各センサーのサイズ、ストリップ間隔を示す。

表 1 バレル部・エンドキャップ部のセンサーのサイズ、ストリップ間隔 [12]

Sensor Type	Cut length [μm]	Outer length [μm]	Inner length [μm]	Strip pitch [μm]
Barrel	63960	63560	63569	80
Endcap W12	61060	55488	45735	56.9 - 69.2
Endcap W21	65085	66130	55734	69.9 - 83.0
Endcap W22	54435	74847	66152	83.4 - 94.2
Endcap W31	65540	64635	56475	70.9 - 81.1
Endcap W32	57515	71814	64653	81.5 - 90.4

2.3.2 モジュール

SCT 検出器のひとつのモジュールは、4 枚のセンサーとそれらを組み付けるためのベースボード、12 個の読み出しチップと読み出しボードからなる。SCT 検出器は 4088 個のモジュールからなる。2.3.1 節で説明したように、バレル部とエンドキャップ部では異なるセンサーが用いられる。図 2.6 にモジュールの写真を示す。

モジュール内で表面 2 枚、裏面 2 枚のセンサーが重ねられている。また、表面と裏面は 40 mrad の角度をつけて貼り合わされている。これによって表面と裏面のセンサーのストリップが交差し、図 2.7 に示すようにセンサーに入射した粒子のセンサー平面内での通過位置情報が、二次元で得られる。また、ストリップが交差する点をスペースポイントと呼び、3.2.2 節で説明する飛跡再構成の際に用いる。



図 2.6 SCT のバレルモジュール (左図) とエンドキャップモジュール (右図)。エンドキャップは左から Outer, Middle, Inner の順 [15]。

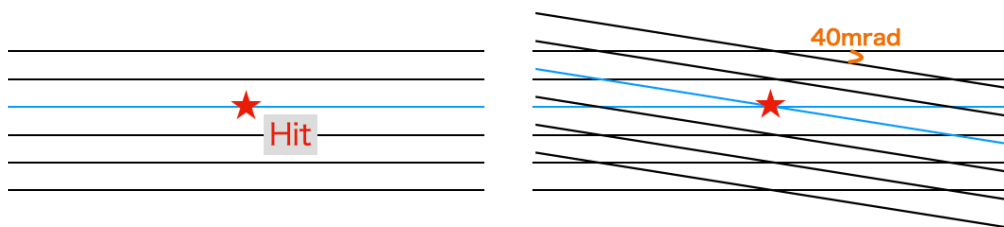


図 2.7 ストリップの模式図。各線がストリップを表し、信号を検出したストリップを水色で示す。左図のように 1 枚では入射粒子の位置情報を 1 次元でしか得られず、スリッに沿った位置情報が得られない。右図のように角度を持って 2 枚重ねることで 2 次元で得られる。

2.3.3 クラスターサイズ

連続してヒットしたストリップの集まりをクラスターと呼び、そのストリップの数をクラスターサイズという。荷電粒子がセンサーに対して垂直に入射した時、ほとんどの場合ひとつのストリップから信号が読み出され、クラスターサイズは最小になる。一方、角度を持って入射すると、複数のストリップにまたがって電子正孔対ができ、クラスターサイズは大きくなる。また、垂直に入射する場合でも、ストリップ間の中間あたりに入射すると、クラスターサイズが 2 となる場合がある。クラスターサイズが 1 の場合は、そのストリップの中心を、クラスターサイズが 2 以上の場合は、クラスターの中心をヒット位置とする。

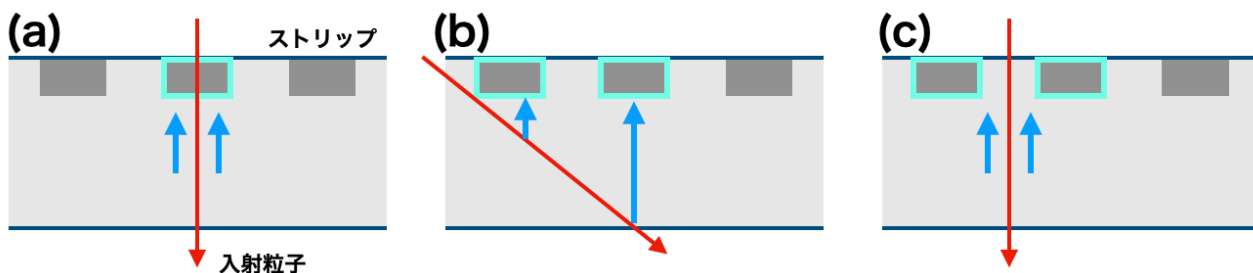


図 2.8 荷電粒子がセンサーに対して、(a) は垂直に、(b) は角度をもって入射した時の様子。(a) の場合はクラスターサイズは 1 となり、(b) の場合は 2 となる。また、(c) のように、ストリップ間の中間あたりに垂直に入射すると、クラスターサイズが 2 となる場合がある。

2.4 放射線損傷

1.3 節で述べたように内部飛跡検出器は ATLAS 検出器の最も内側に位置しているため、継続的に放射線損傷を受けている。この節では、放射線損傷がシリコンセンサーに与える影響について説明する。

2.4.1 格子欠陥

放射線がシリコン結晶を通過する際に、結晶格子中の原子が欠けた状態（格子欠陥）を作る。シリコンセンサーに放射線が入射すると、シリコン原子と衝突を繰り返してエネルギーを失う。この過程でシリコン原子核が弾かれることで生じる空孔と、弾かれた原子核が他の結晶格子間に移動してできる格子間原子の対をフレンケル欠陥と呼ぶ。

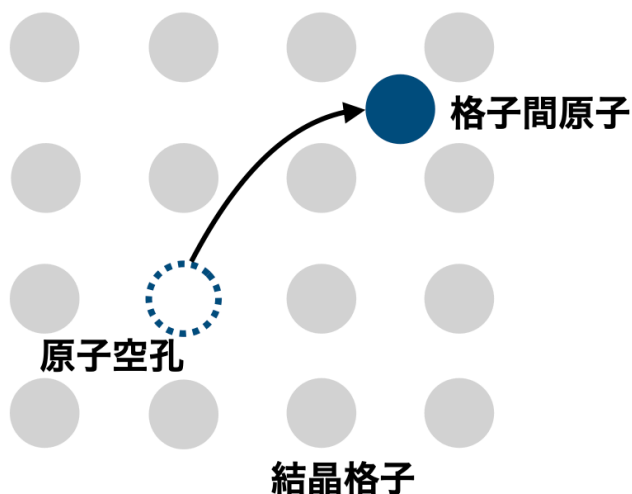


図 2.9 フレンケル欠陥の模式図

2.4.2 漏れ電流

格子欠陥がシリコンセンサーに与える影響として、漏れ電流がある。理想的には、空乏層にはキャリアが存在しないため電流は流れない。しかし、実際には熱励起によりキャリアが生成され、逆バイアス電圧を印加すると微小な電流が流れることがあり、これを漏れ電流と呼ぶ。これによりセンサー内で不要な電流が流れるようになり、信号対ノイズ比が悪化する。

格子欠陥は、バンドギャップ内に新たなエネルギー準位を作る。電子はその準位まで熱的に励起され、その後伝導帯に励起される。その結果として漏れ電流が流れる。

式 1 に示すように、漏れ電流は放射線量に比例することが知られている [14]。

$$\frac{\Delta I}{V} = \alpha \phi \quad (1)$$

ここで、 ΔI は漏れ電流の増加量 [A]、 V はセンサーの体積 [cm^3]、 ϕ は放射線照射量 [cm^{-2}]、 α は漏れ電流の増加率 [A/cm]。

SCT 検出器でも実際に、図 2.10 に示すように Run1 から Run3 にかけて漏れ電流の増加が確認された。

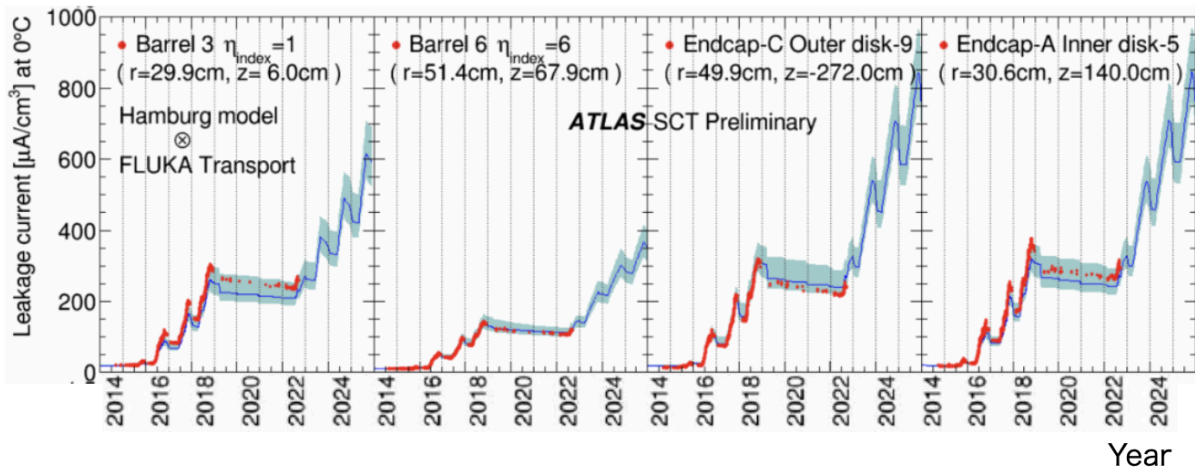


図 2.10 Run2 から Run3 にかけて測定された漏れ電流の増加と、ハンブルグモデルによる予想。左から順に、バレル 3、バレル 6、エンドキャップ Outer ディスク 9 (サイド C)、エンドキャップ Inner ディスク 5 (サイド A) の推移を示す。[16]

2.4.3 電荷収集効率

格子欠陥はセンサーの電荷収集にも影響を与える。SCT 検出器において、実際の収集電荷量を Q_{collect} 、完全空乏化状態かつ放射線照射が無い場合の収集電荷量の理論値を Q とすると、電荷収集効率は $E = Q_{\text{collect}}/Q$ と表される [23]。しかし 2.3.1 節で述べたように、SCT 検出器はバイナリ読み出しであるため、収集電荷量 Q_{collect} を直接測ることはできない。そこで、検出器が粒子の信号をどの程度捉えられたかを示すヒット検出効率 (5.3.1 節で詳細を説明) を使って、収集電荷量を決定する。信号を読み出す閾値を変化させ、検出効率を調べることを threshold scan と呼ぶ。図 2.11 に示すように、検出効率が 50% となる閾値を Q_{median} とし、それを SCT 検出器の収集電荷量とする [21]。

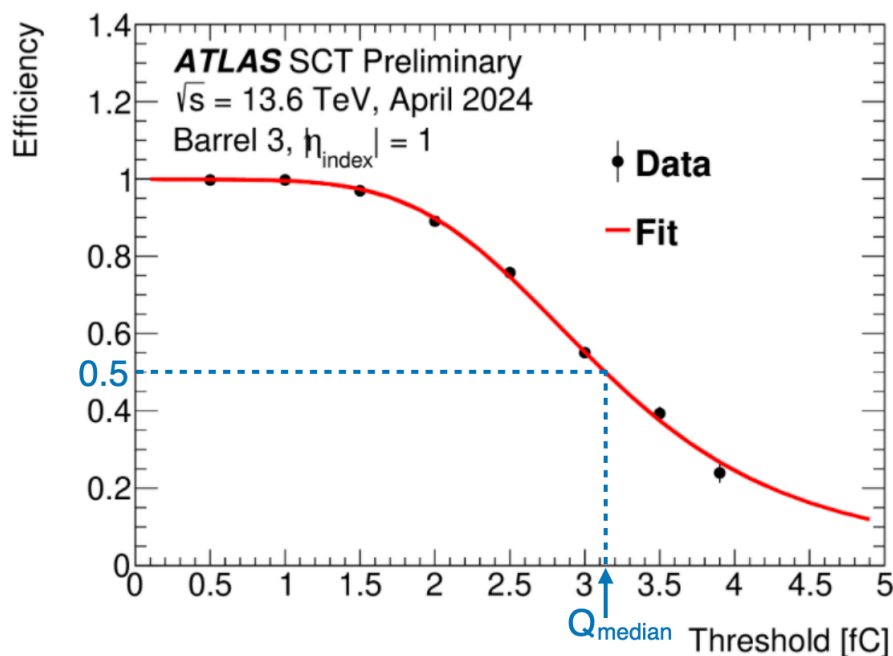


図 2.11 2024 年に行われた、バレル 3 の threshold scan の結果 [22]。検出効率が 50% となる閾値を Q_{median} とする。

荷電粒子がつくる電荷や正孔を格子欠陥が捕獲することにより、電荷収集効率が低下する。図 2.12 に示すように、SCT 検出器でも実際に、2024 年 4 月から 2024 年 10 月にかけて、電荷収集効率の低下が見られた。

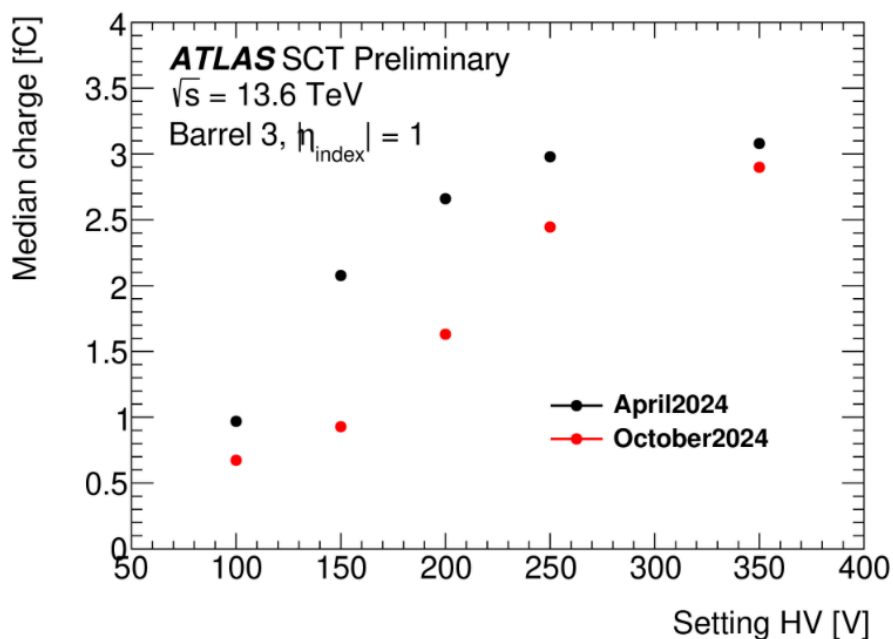


図 2.12 2024 年 4 月と 2024 年 10 月における、バレル 3 の収集電荷量の比較 [23]。放射線損傷の蓄積による、収集電荷量の低下が見られる。

2.4.4 バルクの型変換

格子欠陥は電子を捕獲し、アクセプタのように振る舞う。これにより実質的にアクセプタ濃度 N_A が増加し、ドナー濃度を N_D 、実効的な不純物濃度を $N_{\text{eff}} = N_D - N_A$ とすると、n 型半導体ははじめは $N_{\text{eff}} > 0$ だが、放射線損傷によりやがて $N_{\text{eff}} < 0$ となり、p 型半導体のように振る舞う。これを型変換 (type inversion) と呼ぶ。図 2.13 に、放射線照射量の増加に伴う全空乏化電圧の変化を示す。型変換後は放射線照射量が増加するほど、全空乏化するために高い電圧が必要となる。SCT 検出器でも実際に、図 2.14 に示すように、Run 2 から Run 3 にかけて全空乏化電圧の増加が確認された。

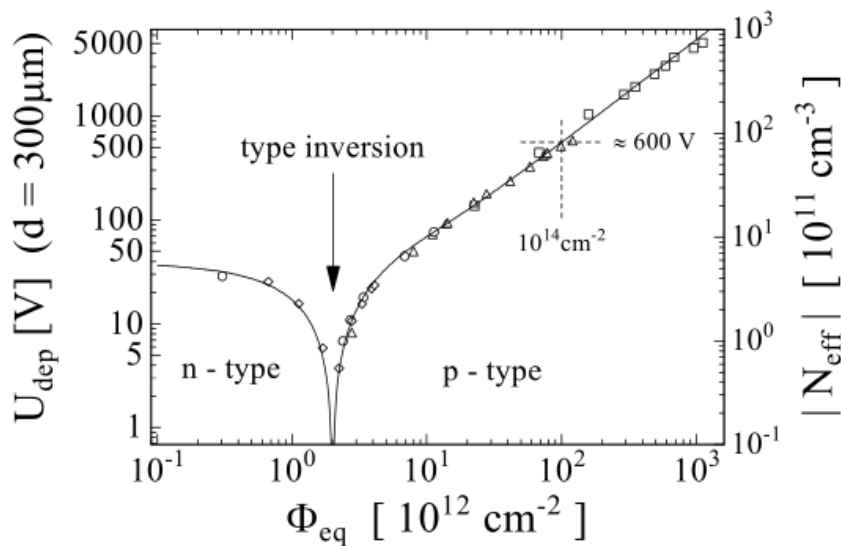


図 2.13 300 μm 厚の n バルクシリコンセンサーの全空乏化電圧と、1MeV 中性子に換算した放射線照射量との関係 [24]

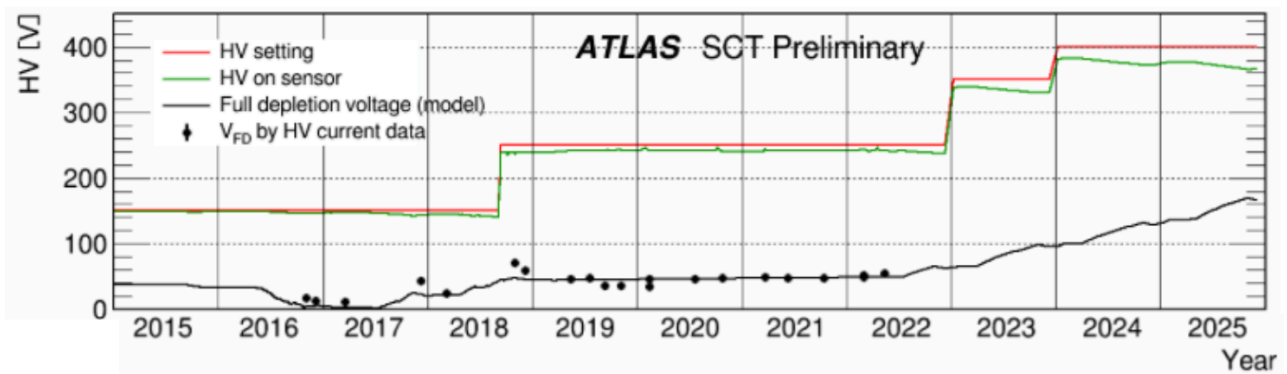


図 2.14 Run 2 から Run 3 にかけての、SCT 検出器の全空乏化電圧の推移 [25]

2.5 Performance Analysis Tool (PAT)

2.3.2 節で述べたように、SCT 検出器は 4088 個のモジュールからなる。これらすべてのモジュールの運転状況を監視するため、ATLAS-SCT グループは Performance Analysis Tool (PAT) というウェブベースのツールを開発した。複数のデータベースに散在している情報が、PAT 専用のデータベースにまとめられ、ユーザーは対話型のウェブディスプレイを通してモジュールの運転状況を閲覧できる。例えば、検出効率下がっているモジュールへの対応など、問題がある場合は迅速に対応できる。図 2.15 に PAT の構造を示す。

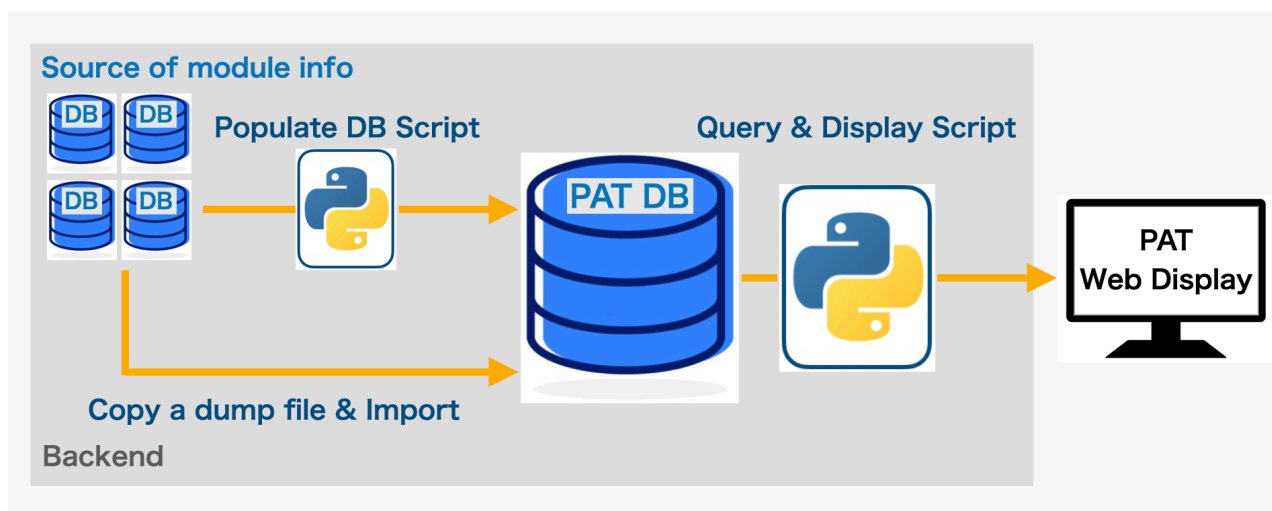


図 2.15 モジュールの運転状況に関する情報を、PAT 専用のデータベース (PAT DB) に集約する。PAT DB にアクセスし、一つのプラットフォーム内でユーザーに情報を提供する。

より効率的に検出器を監視するため、自身が開発し PAT に加えた機能について述べる。

Detector Control Systems (DCS) Plotter

Detector Control Systems (DCS) とは、ATLAS 検出器全体の運転状況をリアルタイムで監視し、制御するためのシステムである。PAT は、モジュールの温度やセンサーに印加する高電圧など、表 2 に示す 12 個のパラメータの情報を DCS から取得し、図 2.16 のような DCS Table というツールでユーザーへ提供していた。ここで VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) は、検出器が取得したデータを光信号に変換する。これにより、データの高速転送が実現する。VCSEL からの光信号を、PIN ダイオードで電気信号に変化する。

表2 モジュールの運転状況に関するパラメータ

名称	意味	単位
HVch V	センサーに印加する高電圧	[V]
HVch I	センサーに高電圧を印加した際に流れる電流	[μ A]
LVch V _{cc}	モジュールのアナログ回路に供給する電圧	[V]
LVch I _{cc}	モジュールのアナログ回路に流れる電流	[μ A]
LVch V _{dd}	モジュールのデジタル回路に供給する電圧	[V]
LVch I _{dd}	モジュールのデジタル回路に流れる電流	[μ A]
LVch VCSL V	VCSEL に供給する電圧	[V]
LVch VCSL I	VCSEL に流れる電流	[μ A]
LV PIN V	PIN ダイオードに供給する電圧	[V]
LV PIN I	PIN ダイオードに流れる電流	[μ A]
MOch Temp 0, 1	モジュールの裏面と表面の温度	[$^{\circ}$ C]



図2.16 DCS Table のディスプレイ。モジュールの運転状況に関するパラメータを、各 Run、各モジュールごとに表示する。これにより、ユーザーは各モジュールの運転状況や各 Run ごとの傾向を見ることができる。

LHC の長期的な運転期間を Run1、Run2、Run3 と呼ぶ。ATLAS 実験においてデータ収集が開始されてから終了するまでの一連の期間も同様に Run と呼ぶが、こちらは 6 桁の番号で表される。ここからは後者の意味で Run という言葉を使う。一つの Run 内では、センサーに印加する高電圧や、内部飛跡検出器にける磁場等の条件を一定にしてデータを収集する。

DCS Table では各 Run における平均値のみが表示され、時間単位での細かい変化や傾向が読み取れない。そこで、図 2.17 のように時系列グラフでも表示できるようにした。これにより、DCS Table で問題のあるモジュールを発見し、その詳細を DCS Plotter で確認できるようになった。

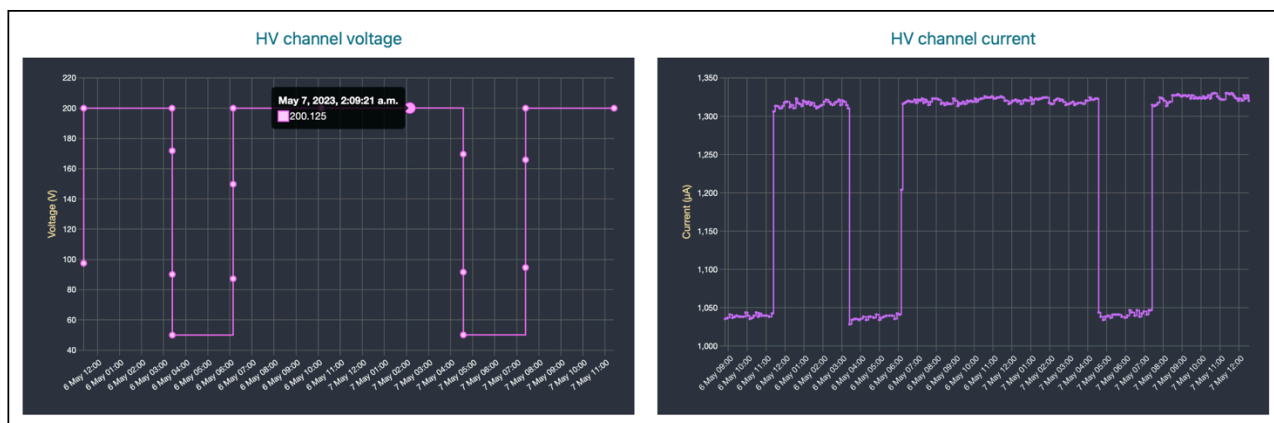


図 2.17 DCS Plotter のディスプレイ。上の図はあるモジュールにおける HVch V と HVch I (表 2 参照) の例であり、横軸に日付と時刻、パラメータの値をとる。モジュールに高電圧を印加すると HVch V が上昇し、それに伴い電流も上昇している様子が見られる。

Daily Checker

前述した DCS Plotter は特定のモジュールに関して、任意の時間範囲の情報を得られるのに対し、このツールは全 4088 個のモジュールを一日単位で監視するためのものである。

2.4.2 節で説明した漏れ電流の増加などにより、電流値が各モジュールごとに設定している上限値を超えると、モジュールにかける高電圧の供給が停止されることがある。これを High Voltage (HV) trip と呼ぶ。HV trip が起きると、その間モジュールはデータを取得できない。HV trip が起きると、電流の上限値が引き上げられる。電流の上限値には 4000 μA までと上限があり、すでに上限値に達しているモジュールは設定電圧が下げられる。

PAT 上で HV trip を監視することで、対応が必要なモジュールを特定でき、モジュールの設定を早期に変更できる。また、検出効率等に異変が見られた場合には、その原因の特定にも繋がる。以下の図 2.18 にディスプレイを示す。

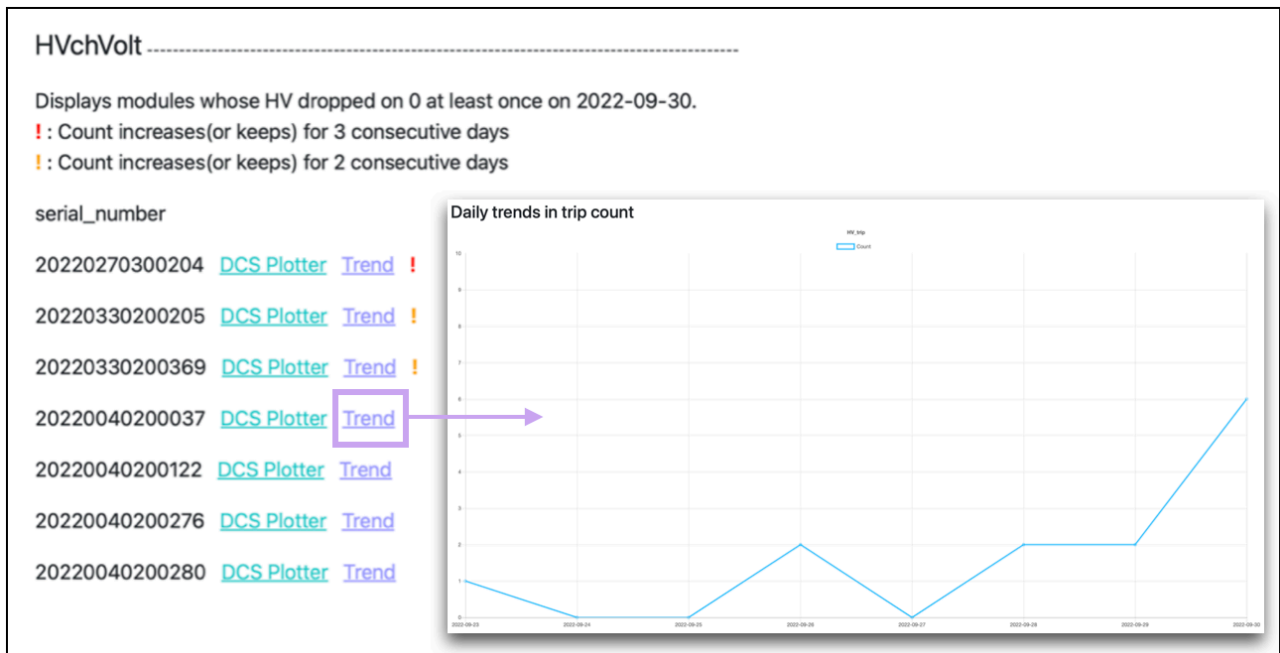


図 2.18 Daily Checker のディスプレイ。その日 HV trip が起きたモジュールを表示する。二日連続で trip が起きたものにはオレンジのマーカー、三日以上連続で起きたものには赤いマーカーがつけられる。また、あるモジュールにおいて HV trip が起きた回数の推移をプロットで見ることができ、横軸が日付、縦軸が回数を示す。

Operations DataBase (DB)

ATLAS 検出器が取得したデータの品質を評価するために使われる、Operations DataBase という既存のツールがある。ストリップからの信号は、読み出し装置 (ReadOut Driver, ROD) へ送られ、ATLAS 共通のフォーマットに変換される。データ転送レートが ROD の制限 (40 Mbps) を超えると、ROD は busy 信号を発する。busy 信号が出ている間は、データ取得が止められる。データ取得中にいつ busy 信号が出たかを確認するためなどに、Operations DataBase が使われる。このツールを PAT に統合することで、複数のツールを行き来することなく一箇所で情報を取得できる。また、ユーザーにとってより使いやすくなるようディスプレイを改善した。

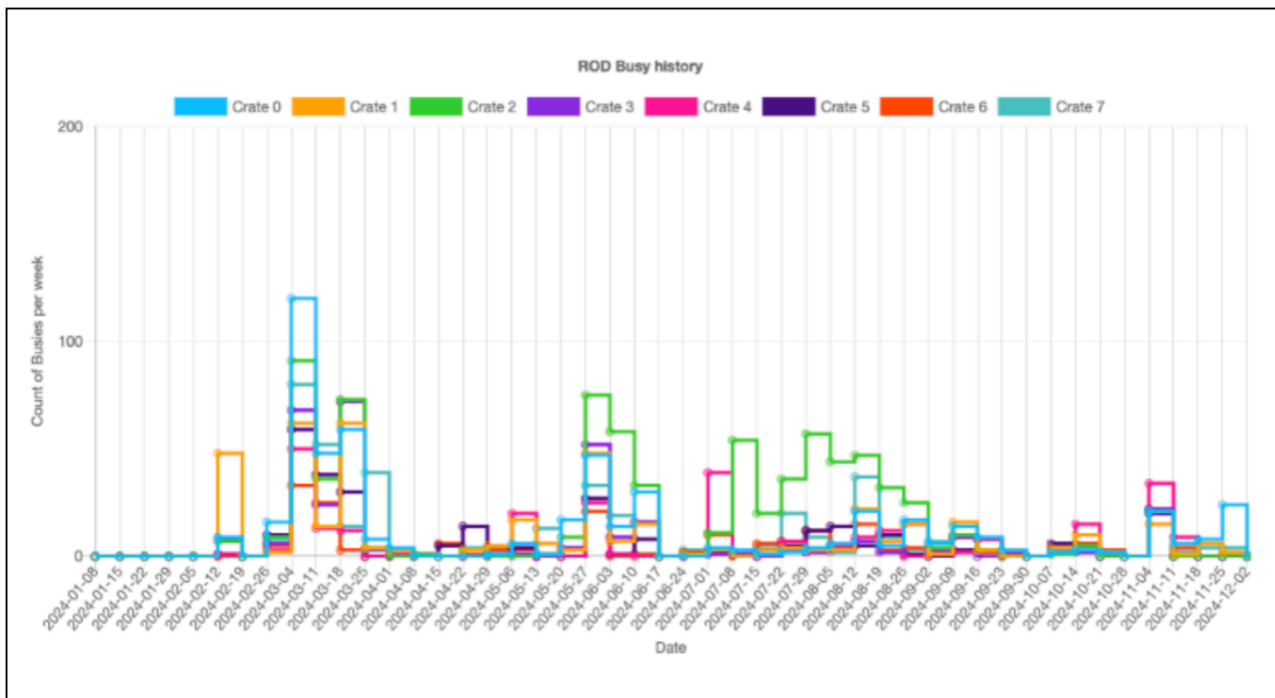


図 2.19 ROD は全 128 個あり、八つの各クレートに ROD が 16 個ずつまとめられている。一週間あたりに各クレートから busy 信号が出された回数の推移を見ることが可能。横軸が日付、縦軸が busy 信号が出された回数、色は各クレートに対応する。

3 位置分解能の評価方法

検出器の位置分解能とは、粒子が検出器を通過した位置の測定精度である。この章では、本研究で位置分解能の評価指標として用いた残差を説明した後、飛跡再構成の手順を説明する。

3.1 評価方法

本研究で位置分解能の評価指標として使った、残差 (residual) について説明する。残差とは以下の図 3.1 に示すように、再構成で得られる飛跡が、検出器を通過する位置と、検出器が信号をとらえた位置との差である。(飛跡の再構成については次の 3.2.2 節で説明する。)

本研究では残差分布の標準偏差 σ_{residual} を、位置分解能の評価に使った。SCT が信号を捉えた位置を τ_{SCT} 、飛跡の通過位置を τ_{Track} とすると、 $\text{residual} = |\tau_{\text{SCT}} - \tau_{\text{Track}}|$ と表される。そのため σ_{residual} は、SCT 検出器の位置分解能 σ_{SCT} と、飛跡再構成の不確かさ σ_{Track} を用いて、以下の式 2 で表される。

$$\sigma_{\text{residual}} = \sqrt{\sigma_{\text{SCT}}^2 + \sigma_{\text{Track}}^2} \quad (2)$$

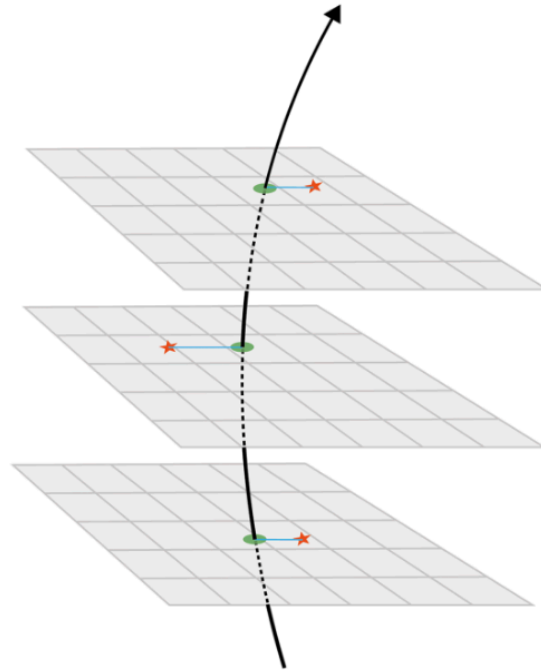


図 3.1 図の赤い点をヒット位置、黒い線を再構成で得られる飛跡、緑の点を飛跡の通過位置とした時、青い線が残差となる。[17]

次に、理論的な位置分解能を考える。 x_0 をあるストリップの位置、 p をストリップ間隔、 x を粒子の入射位置とする。粒子が均一に入射するとし、この一様分布の標準偏差 σ を位置分解能とすると、クラスターサイズが 1 の場合、位置分解能は以下の式 3 で表される。

$$\sigma_{\text{SCT}}^2 = \int_{x_0 - \frac{p}{2}}^{x_0 + \frac{p}{2}} \frac{(x - x_0)^2}{p} dx = \frac{p^2}{12} \quad (3)$$

式 3 を使うと、バレル部の場合、ストリップ間隔は $80 \mu\text{m}$ であり、位置分解能は $23 \mu\text{m}$ となる。

3.2 飛跡再構成

ここでは、荷電粒子の飛跡の再構成を説明する。

3.2.1 飛跡パラメータ

飛跡は、図 3.2 で定義される五つのパラメータ ($d_0, z_0, \phi_0, \theta, \frac{q}{p}$) を使って表現される。衝突点の再構成や粒子識別に用いられる。

- d_0, z_0 : 飛跡が z 軸に最も近づく点 (最近接点) の位置を円筒座標系 (R, ϕ, z) で表した時の R 座標と z 座標
- ϕ_0, θ : 最近接点における粒子の運動量ベクトル \mathbf{p} を球座標で表した時の ϕ 座標と θ 座標。
- $\frac{q}{p}$: 荷電粒子の電荷 q と運動量 p の比。飛跡の曲率に対応する。

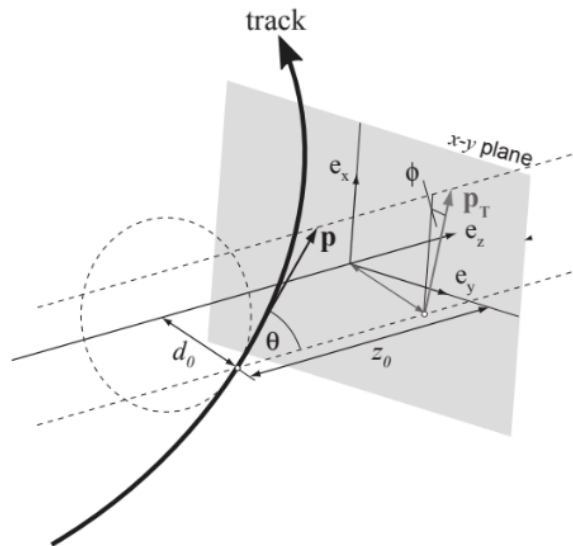


図 3.2 飛跡パラメータ [18]

3.2.2 再構成アルゴリズム

粒子のヒット位置から飛跡を再構成するため、いくつかの工程ごとにアルゴリズムがある。ここでは、Pixel 検出器と SCT 検出器をまとめてシリコン検出器と呼ぶ。シリコン検出器上のヒッ

トから飛跡を再構成し、TRT 検出器上のヒットまで延長する手法 (inside-out) と、反対に TRT 検出器のみで飛跡を再構成し、シリコン検出器まで延長する手法 (outside-in) がある。ここでは前者について説明する。

(1) Seed finding

Pixel 検出器上、もしくは SCT 検出器上の連続する三つのスペースポイントを選び、飛跡のようになる seed を作る。Run2 からは、四つ目のスペースポイントを要求することによって、粒子によるものではなく検出器のノイズによってできる偽の seed を除くことができる。これにより再構成アルゴリズムの高速化が実現する [19]。

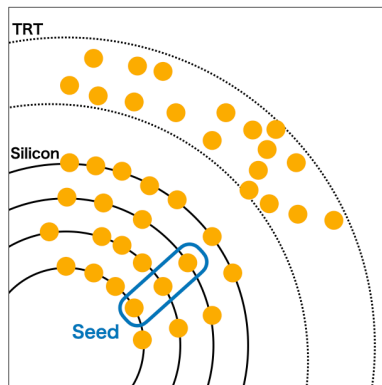


図 3.3 Seed finding

(2) Track finding

seed の延長上にあるスペースポイントを選び、seed を r 方向 (衝突点に近づく方向と遠ざかる方向の両方向) に拡張する。この際 Kalman filter[20] でスペースポイントをフィットし、飛跡を作る。

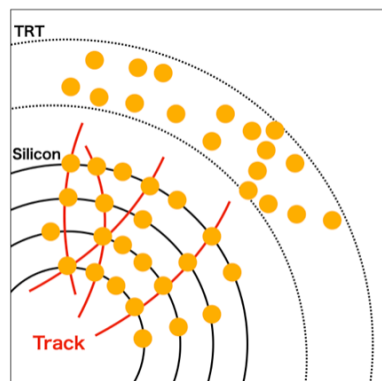


図 3.4 Track finding

(3) Ambiguity solving

この段階では、fake track が多く含まれている。これを取り除くため、飛跡に対してスコアリングを行う。飛跡中の途中で抜け落ちている点をホール、複数の飛跡で共有しているヒットを shared hit と呼ぶ。スコアリングは、例えば、ホールが多くヒットが少ない飛跡には低いスコアがつけられる。shared hit はスコアの低い飛跡に計上され、shared hit が多い飛跡は取り除かれる。また、式 4 で χ^2 が定義される。飛跡から大きく外れているヒット ($\chi^2 > 9$) は、outlier として扱い、 χ^2 の値に応じて低いスコアがつけられる。

$$\chi^2 = \sum_{\text{track}} \mathbf{r}^T(\mathbf{a}, \boldsymbol{\tau}) V^{-1} \mathbf{r}(\mathbf{a}, \boldsymbol{\tau}) \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{r}(\mathbf{a}, \boldsymbol{\tau})$ はトラックとヒットとの残差ベクトルであり、各成分は各ヒットに対応する残差を表す。 \mathbf{a} はアライメント定数、 $\boldsymbol{\tau}$ は 3.2.1 節で示した飛跡パラメータである。また、 V はヒット位置測定の共分散行列である。各ヒット位置の測定誤差の相関を表し、逆行列をとることで誤差の小さいデータに高い重みを与え、フィットの精度を上げる。

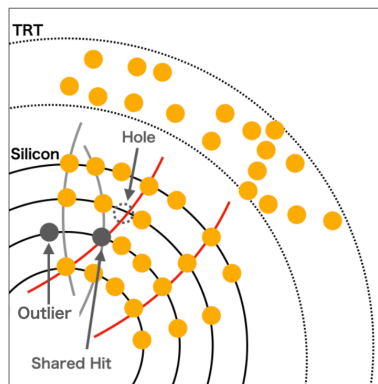


図 3.5 Ambiguity solving

(4) TRT extension

ここまでで作成された飛跡を延長し、TRT 検出器上のヒットと対応させる。フィットやスコアリングを行い、シリコン検出器で作成された飛跡よりもスコアが高い場合は、飛跡の延長として加える。反対にそれよりもスコアが低い場合は、outlier として処理される。

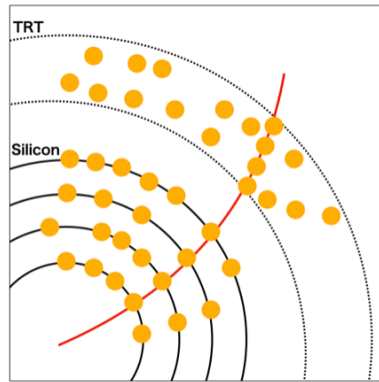


図 3.6 TRT extension

これらの過程を経て再構成された飛跡を使い、3.1 節で説明した残差が計算される。

3.2.3 バイアス

3.1 節で述べたように、ヒット位置と飛跡の距離から残差を計算する。その際に用いる飛跡には、評価する検出器上のヒットを使って再構成するものと、使わずに再構成する二種類がある。前者を使って得られる残差を *biased residual*、後者を使って得られる残差を *unbiased residual* と呼ぶ。本研究では、より客観的に位置分解能を評価するために、*unbiased residual* を評価に使った。

4 使用したデータ

ここでは、本研究で位置分解能の評価に使ったデータと、評価に使った飛跡の選別条件を説明する。

4.1 ルミノシティ

ある粒子の生成断面積を σ [fb]、ルミノシティを L [fb⁻¹] とすると、粒子の生成数 n は、以下の式 5 で表される。

$$n = \sigma \times L \quad (5)$$

ルミノシティが高いほど、より断面積の小さな稀な事象を観測しやすくなる。

4.2 使用したデータ

放射線損傷の SCT 検出器の位置分解能への影響を調べるため、2022 年から 2024 年のデータで各年の位置分解能を比較した。ここで、一つの Run を細かい時間単位で区切ったものをルミノシティブロック (LB) と呼ぶ。通常 60 秒程度を 1LB として区切る。また、LHC のビームは連続的でなく、陽子の束が一定間隔で並んでおり、その束をバンチと呼ぶ。バンチ交差あたりの平均陽子-陽子衝突数を μ と呼ぶ。

ATLAS 実験では、取得した全てのデータが解析に用いられるわけではない。データ取得中の検出器の運転状況が良好であったと判断された場合のみ、解析に用いられる。その基準を満たすデータの集まりは Good Run List (GRL) と呼ばれる。本研究では、GRL に含まれる Run、LB を使った。また、放射線損傷による位置分解能の変化を明確に調べるため、積分ルミノシティができるだけ大きくなるよう、2022 年、2023 年、2024 年の序盤の Run、2024 年の終盤の Run を使った。表 3 に、本研究で使った Run の情報を示す。

表 3 本研究で使った Run

Run 番号	日付	積分ルミノシティ [fb ⁻¹]	LB	Average μ	Peak μ
436169	2022 年 10 月 5 日	-	150 - 349	49.7	54.4
451595	2023 年 5 月 6 日	27.5 fb ⁻¹	500 - 699	52.1	61.2
473255	2024 年 4 月 13 日	58.5 fb ⁻¹	500 - 699	52.4	62.8
484799	2024 年 9 月 19 日	165.5 fb ⁻¹	200 - 399	62.6	65.2

4.3 飛跡の選択

ここでは、位置分解能評価に用いた飛跡の条件を説明する。

・ヒット数

3.1 節で述べたように、本研究で位置分解能の評価指標として使った残差分布の標準偏差 σ_{residual} は、以下の式 6 で表される。

$$\sigma_{\text{residual}} = \sqrt{\sigma_{\text{SCT}}^2 + \sigma_{\text{Track}}^2} \quad (6)$$

σ_{residual} を評価指標とし、SCT 検出器の位置分解能評価を行う上で、 σ_{Track} を小さくする必要がある。そこで、飛跡が SCT、Pixel それぞれに残したヒット数に条件をかけた。本研究では SCT に 8 個以上、Pixel に 4 個以上のヒットを残した飛跡を用いた。

粒子が検出器を各層に対して垂直に通過すると考えると、飛跡再構成の不確かさは式 7 で表される。

$$\sigma_{\text{Track}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{SCT}}}{\sqrt{N_{\text{SCT}}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{Pixel}}}{\sqrt{N_{\text{Pixel}}}}\right)^2} \quad (7)$$

ここで、 N_{SCT} 、 N_{Pixel} はそれぞれ、飛跡が SCT 検出器、Pixel 検出器に残したヒット数。

$N_{\text{SCT}} = 8$ 、 $N_{\text{Pixel}} = 4$ の時、 $\sigma_{\text{SCT}} = 23 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_{\text{Pixel}} = 10 \mu\text{m}$ [26] とすると、 $\sigma_{\text{Track}} \approx 9 \mu\text{m}$ となる。 σ_{residual} に対して σ_{Track} の寄与を 8% 以下に抑えられる。以下の図 4.1 に各 Run の飛跡が SCT、Pixel に残したヒット数の分布を示す。

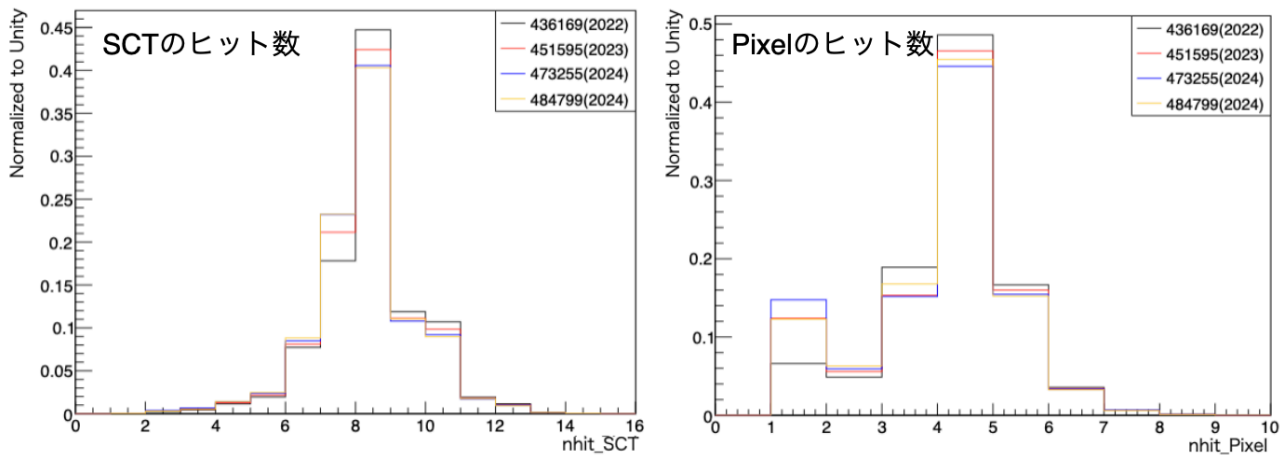


図 4.1 各 Run の飛跡が SCT (左図)、Pixel (右図) に残したヒット数の分布 (縦軸は割合)

・運動量

運動量の大きい粒子の飛跡は、磁場内での曲率が小さく直線的である。また、検出器を通過する際に多重散乱の影響を受けにくい。そのため、ヒット位置の不確かさが小さくなる。図 4.2 に、入射粒子の運動量と残差の大きさの関係を示す。また、散乱角の標準偏差 θ_0 は以下の式 8 で表される。

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \frac{x z^2}{X_0 \beta^2} \right] \quad (8)$$

ここで、 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 は散乱物質の厚み、 X_0 は散乱物質の放射長。

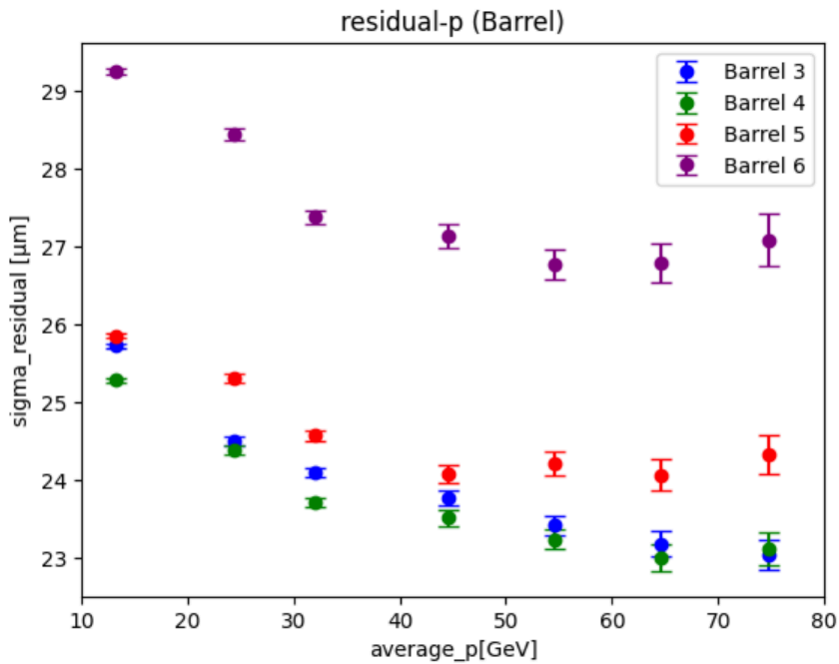


図 4.2 バレル部における、入射粒子の運動量と残差の関係

運動量が大きいくほど多重散乱の影響が小さく、残差が小さくなっている。また、 $p > 50 \text{ GeV}$ で、残差の変化が緩やかになっている。そのため本研究では、 $p > 50 \text{ GeV}$ の運動量を持つ飛跡を用いた。図 4.3 に各 Run の運動量分布を示す。

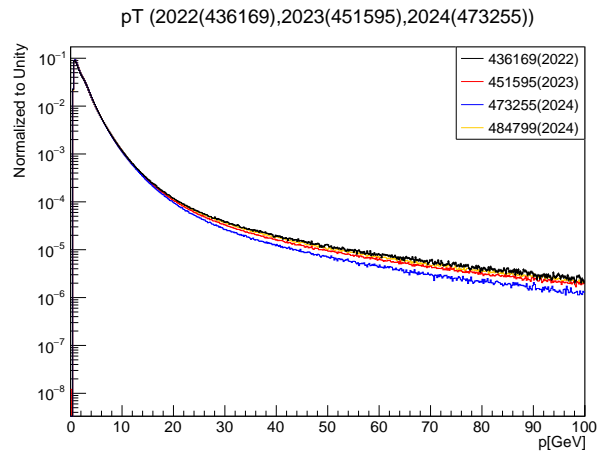


図 4.3 各 Run の運動量分布

・ クラスターサイズ

3.1 節で述べたように、位置分解能の理論値 $\sigma_{\text{SCT}}=23 \mu\text{m}$ は、クラスターサイズを 1 として計算して得られる。この値を目安として位置分解能を評価するため、クラスターサイズが 1 のヒット点を評価に用いた。以下の図 4.4 に各 Run のクラスターサイズ分布を示す。

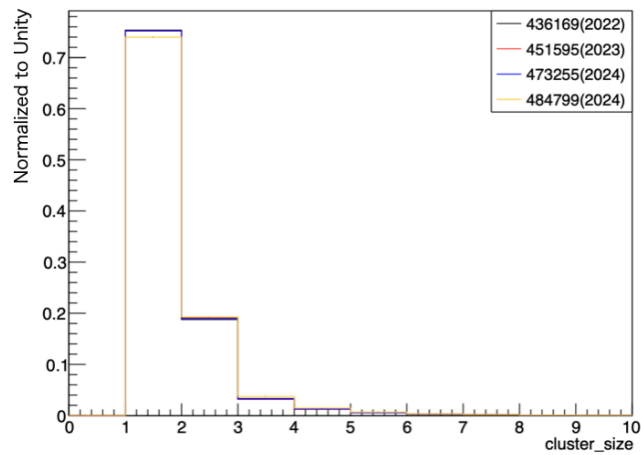


図 4.4 各 Run のクラスターサイズ分布 (縦軸は割合)

5 評価

この章では 4.2 節で示したデータを使って調べた、放射線損傷が位置分解能に与える影響を述べる。また、放射線損傷以外の効果を取り除くため、ビーム内の粒子衝突数、センサーに印加する高電圧、検出器の位置など、運転環境の違いが位置分解能に与える影響も調べた。

5.1 パイルアップ依存性

LHC の一回のビーム交差で同時に複数の粒子が衝突する現象をパイルアップと呼ぶ。図 5.1 に示すように、Run3 では 2022 年から 2024 年にかけてパイルアップが増加している。パイルアップが増加すると、センサー 1 チャンネルあたりのヒット数が増え、SCT 検出器の位置分解能に与える。また、異なる衝突点からの荷電粒子が残したヒットを、飛跡再構成に誤って使用することで再構成の精度が落ちることが考えられる。

各年の位置分解能を同じ条件で比較するために、パイルアップの増加に伴う位置分解能の変化を調べた。

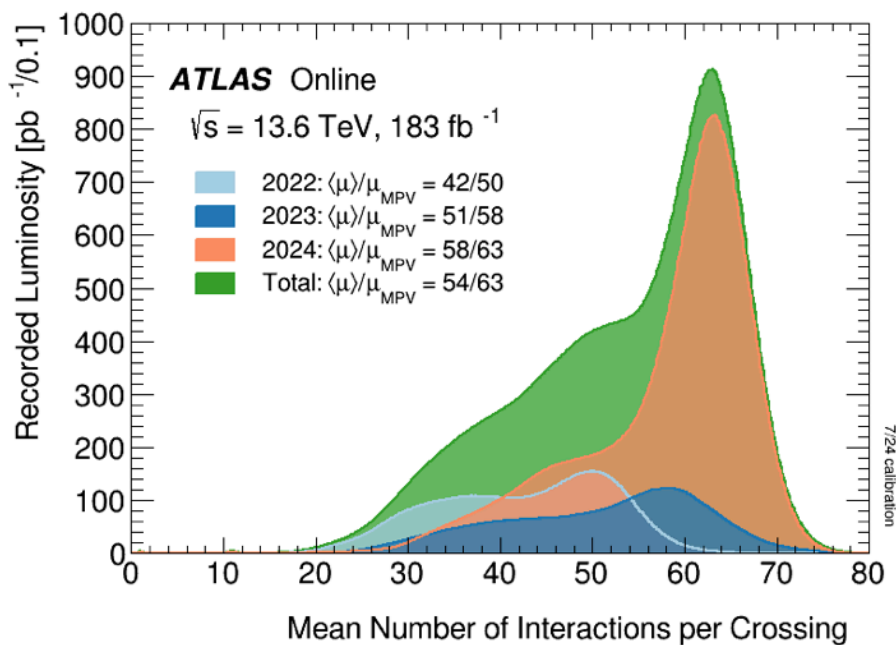


図 5.1 LHC のビームは連続的でなく、陽子の束が一定間隔で並んでおり、その束をバンチと呼ぶ。2022 年、2023 年、2024 年における、バンチ交差あたりの平均陽子-陽子衝突数の分布 [27]

5.1.1 方法

2023 年の Run 451611 のデータを用いて、パイルアップの増加が SCT 検出器の位置分解能に与える影響を調べた。図 5.2 (a) は Run 451611 における LB ごとのルミノシティを示す。

ここから三つの LB 区間 (LB400~499, 800~899, 1100~1199) を選択し、それぞれの μ 分布を図 5.2 (b) に示す。

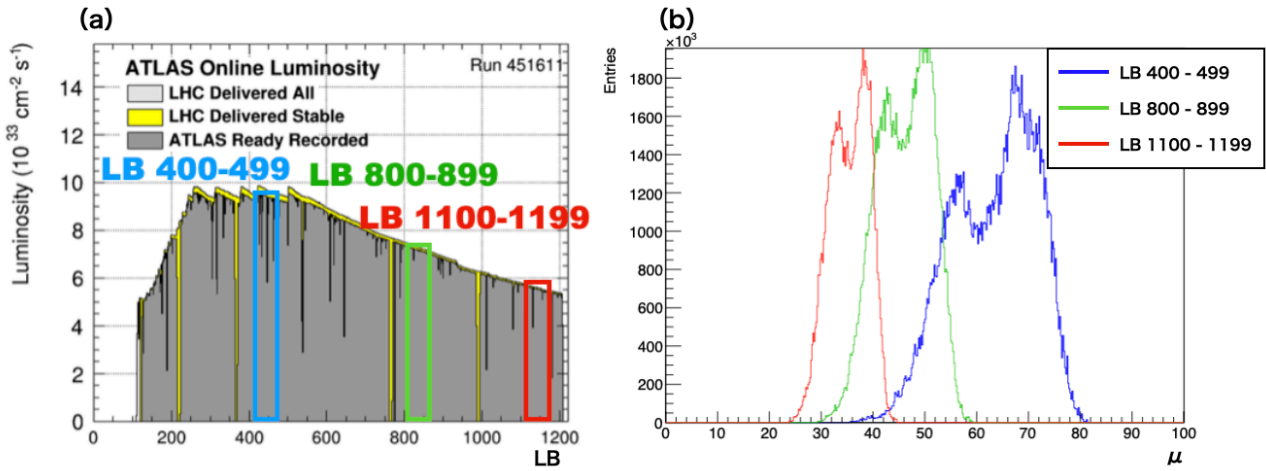


図 5.2 (a) Run451611 における、LB ごとのルミノシティ。図に示すように、ルミノシティの異なる三つの LB 区間を選択する。(b) 図 (a) に示す三つの LB 区間における μ 分布

図 5.2 (b) に示す μ の範囲 ($30 < \mu < 70$) を 10 ごとに区切り、 μ の増加に伴う位置分解能の変化を調べた。

5.1.2 結果

図 5.3、はバレル部、エンドキャップ部の各層に関して、 μ と位置分解能の関係を示したものである。

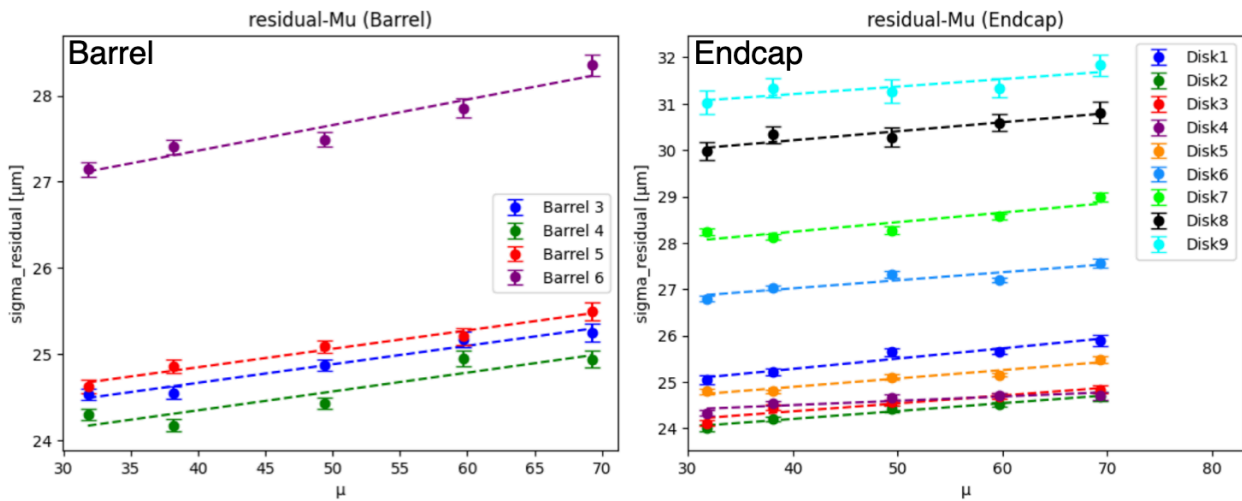


図 5.3 位置分解能の μ 依存性。左図がバレル部、右図がエンドキャップ部。点線は最小二乗法で求めた近似直線。

バレル部、エンドキャップ部共に、パイラアップの増加に伴って残差が大きくなる様子が見られた。そのため各年の比較の際には、 μ の範囲を揃える必要がある。

5.2 飛跡再構成に用いるヒット数依存性

4.3 節で述べたように、飛跡再構成の不確かさ σ_{Track} は、飛跡が検出器に残したヒット数に依存する。図 5.4 に、Run 484799 のデータを使って調べた、各バレル層におけるヒット数と位置分解能の関係を示す。

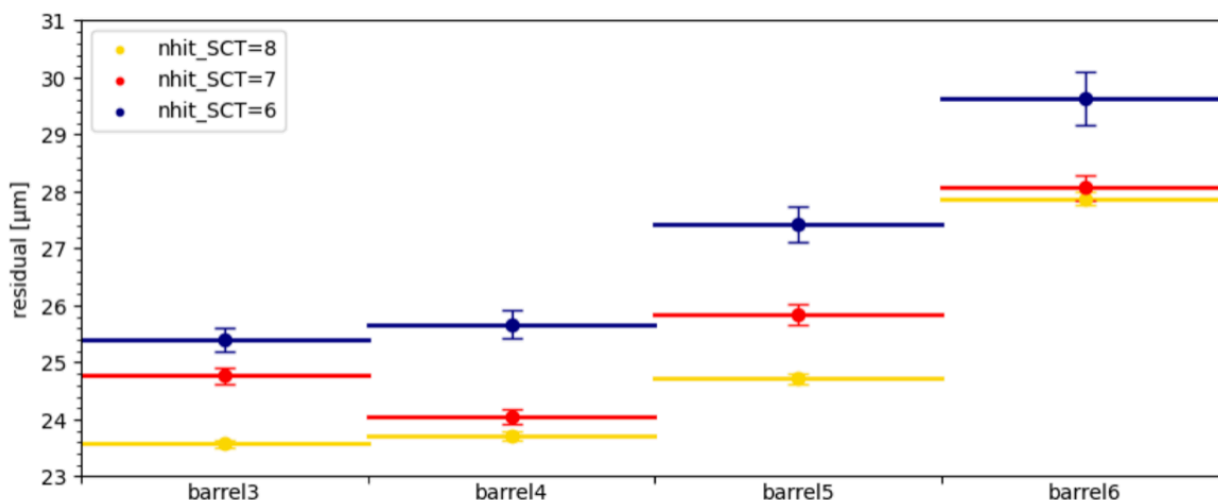


図 5.4 飛跡が SCT 検出器上に残すヒット数と、位置分解能の関係。それぞれヒット数 6、7、8 で比較した。

ヒット数が多くなるほど、 σ_{Track} が小さくなり、残差が小さくなることがわかる。

5.3 高電圧依存性

2.4.2 節で述べたように、シリコンセンサーが放射線損傷を受けると、シリコンバルク中に格子欠陥ができる。それにより、漏れ電流によるノイズの増加や、電荷収集効率の低下が起きる。それを補償するため、シリコンセンサーに印加する高電圧値を引き上げることがある。高電圧値の変化が位置分解能に与える影響について調べた。

バレル部、エンドキャップ部共に、2023 年 2 月 27 日に高電圧値が上げられた。この直前 (Run 440447, Run 440499) と直後 (Run 451595, Run 451611) のバレル部のデータを使って、位置分解能の変化を調べた。表 4 に、各 Run におけるバレル部の高電圧値を示す。

表 4 各 Run における、バレル部の高電圧値

Run 番号 (日付)	バレル 3	バレル 4	バレル 5	バレル 6
Run 440447 (2022 年 11 月 24 日)	250 V	150 V	150 V	150 V
Run 440499 (2022 年 11 月 25 日)	250 V	150 V	150 V	150 V
Run 451595 (2023 年 5 月 6 日)	350 V	250 V	250 V	200 V
Run 451611 (2023 年 5 月 7 日)	350 V	250 V	250 V	200 V

5.3.1 高電圧とヒット検出効率

SCT 検出器のヒット検出効率 ϵ は、式 9 で表される。ここで N_{hit} 、 N_{hole} はそれぞれ、すべての飛跡が各バレル層に残したヒット、ホール (2.4.3 節参照) の数である。

5.2 節で述べたように、ヒット数が多いほど、 σ_{Track} が小さくなる。つまり、ヒット検出効率が高いほど、 σ_{Track} が小さくなると言える。この節では、高電圧の変化が検出効率に与える影響を調べた。

$$\epsilon = \frac{N_{\text{hit}}}{N_{\text{hit}} + N_{\text{hole}}} \quad (9)$$

2.4.3 節で説明した電荷収集効率が高いほど、飛跡上のヒットの数は多く、ホールの数が少なくなり、ヒット検出効率は高くなる。図 5.5 (a) に、SCT 検出器におけるセンサーに印加する高電圧と収集電荷量の関係を示す。高電圧値が高いほど、収集電荷量が増加することが分かる。また、図 5.5 (b) に、センサーに印加する高電圧とヒット検出効率との関係を示す。高電圧値が高いほど、ヒット検出効率が高くなることが分かる。

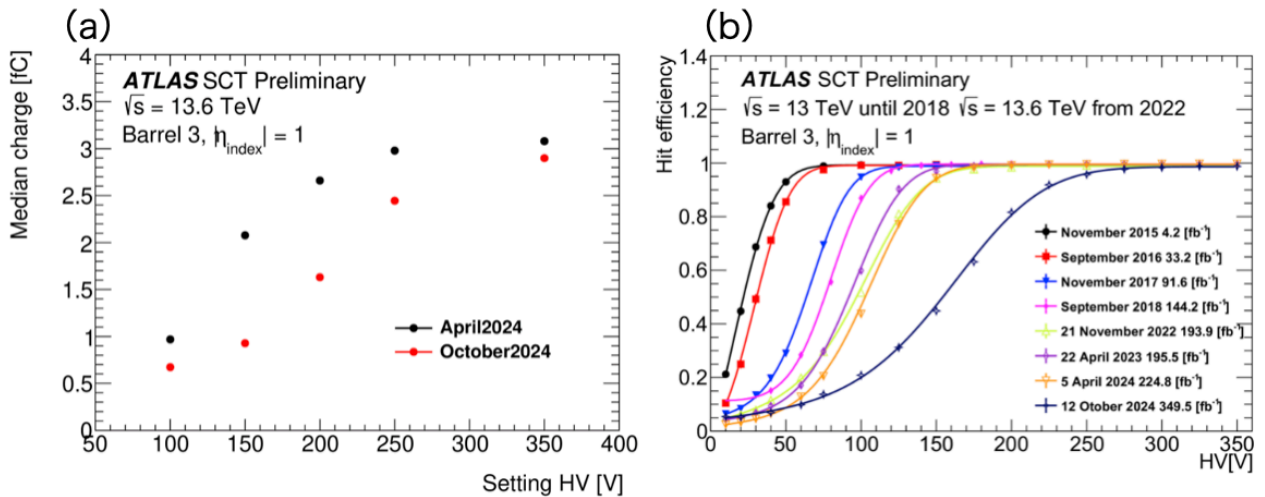


図 5.5 (a) 2024 年のバレル 3 における、高電圧と収集電荷量の関係 (b) Run2、Run3 の各年における、バレル 3 を使って調べた高電圧とヒット検出効率の関係 [24]

表 4 に示した Run 440499 と Run 451595 における、各バレル層の検出効率を調べた。ここでは、すべての飛跡が検出器上に残したヒット数、ホール数を用いて検出効率を計算した。検出効率の比較を図 5.6 に示す。高電圧値を上げると、検出効率が良くなったことが分かる。

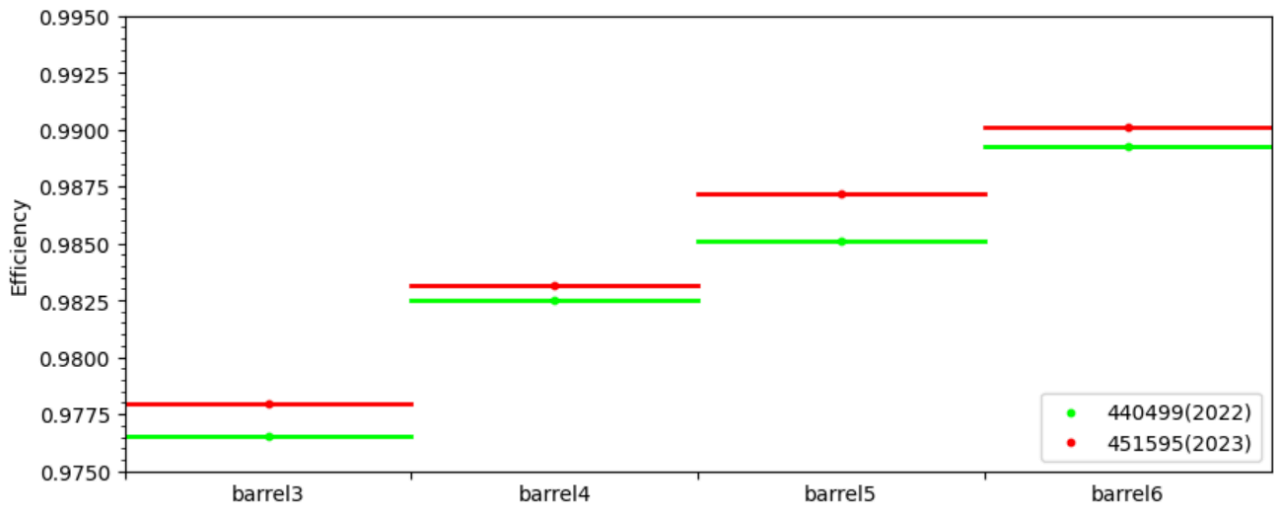


図 5.6 Run 440499 と Run 451595 の各バレル層におけるヒット検出効率の比較

5.3.2 高電圧と位置分解能

表 4 に示した四つの Run における、各バレル層の位置分解能の比較を図 5.7 に示す。2022 年から 2023 年にかけて位置分解能が良くなっている。高電圧値を上げたため収集電荷量が増加し、ヒット検出効率が良くなったためと考えられる。

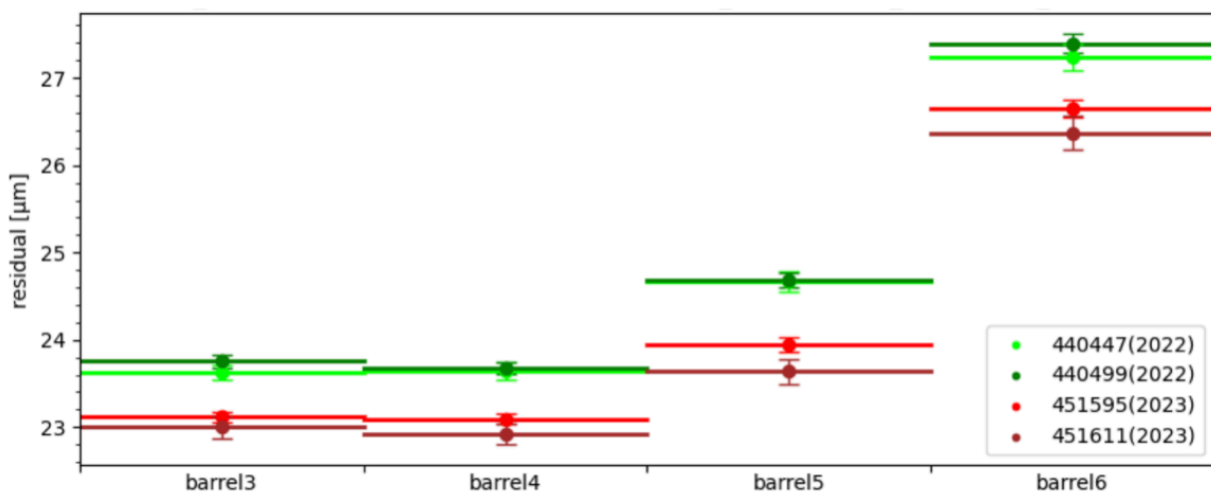


図 5.7 高電圧値の引き上げによる位置分解能の変化

5.4 各 Run の比較

この節では、4.2 節で述べた 2022 年、2023 年、2024 年の Run のデータを使った位置分解能の比較について述べる。

5.4.1 位置分解能の比較

5.1 節で述べたように、それぞれの Run では加速器のコンディションにより、 μ 分布が異なる。 μ 依存性の効果を低減するために、 μ の範囲を揃えて比較する必要がある。

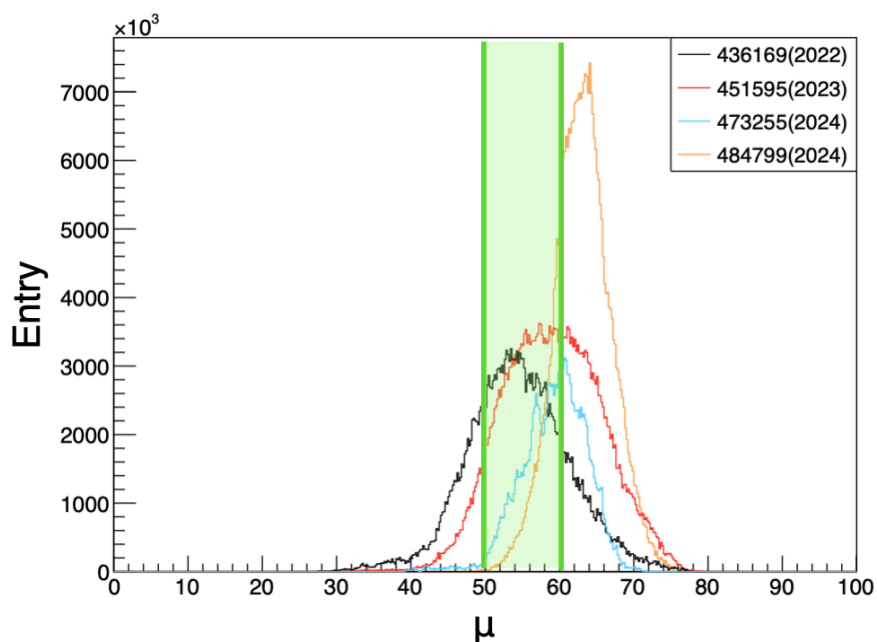
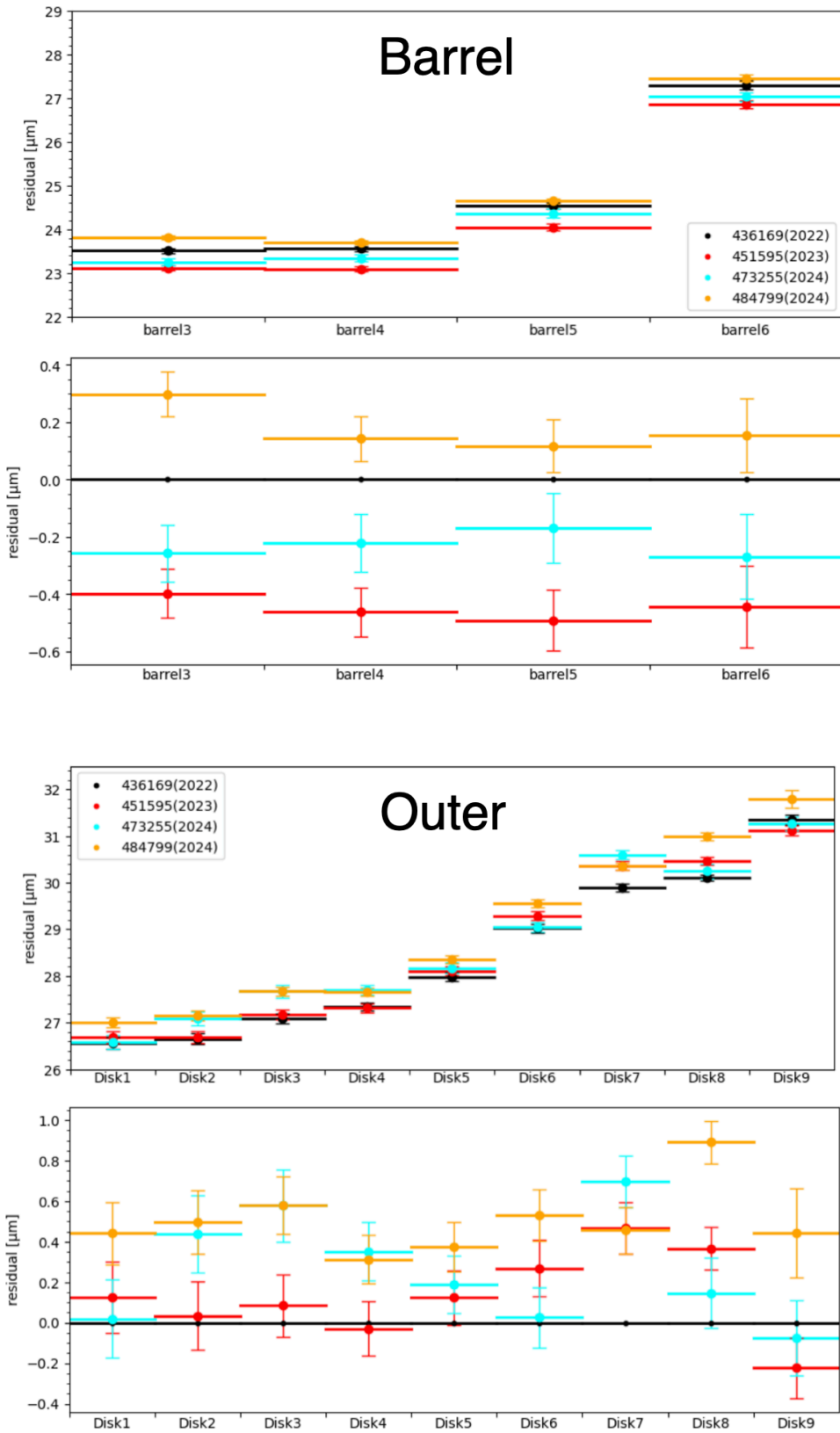


図 5.8 各 Run の μ 分布

本研究では、図に示した $50 < \mu < 60$ の範囲で、各年の位置分解能を比較した。

図 5.9 に、各年のバレル部、エンドキャップ部 (Inner、Middle、Outer) の位置分解能の比較を示す。



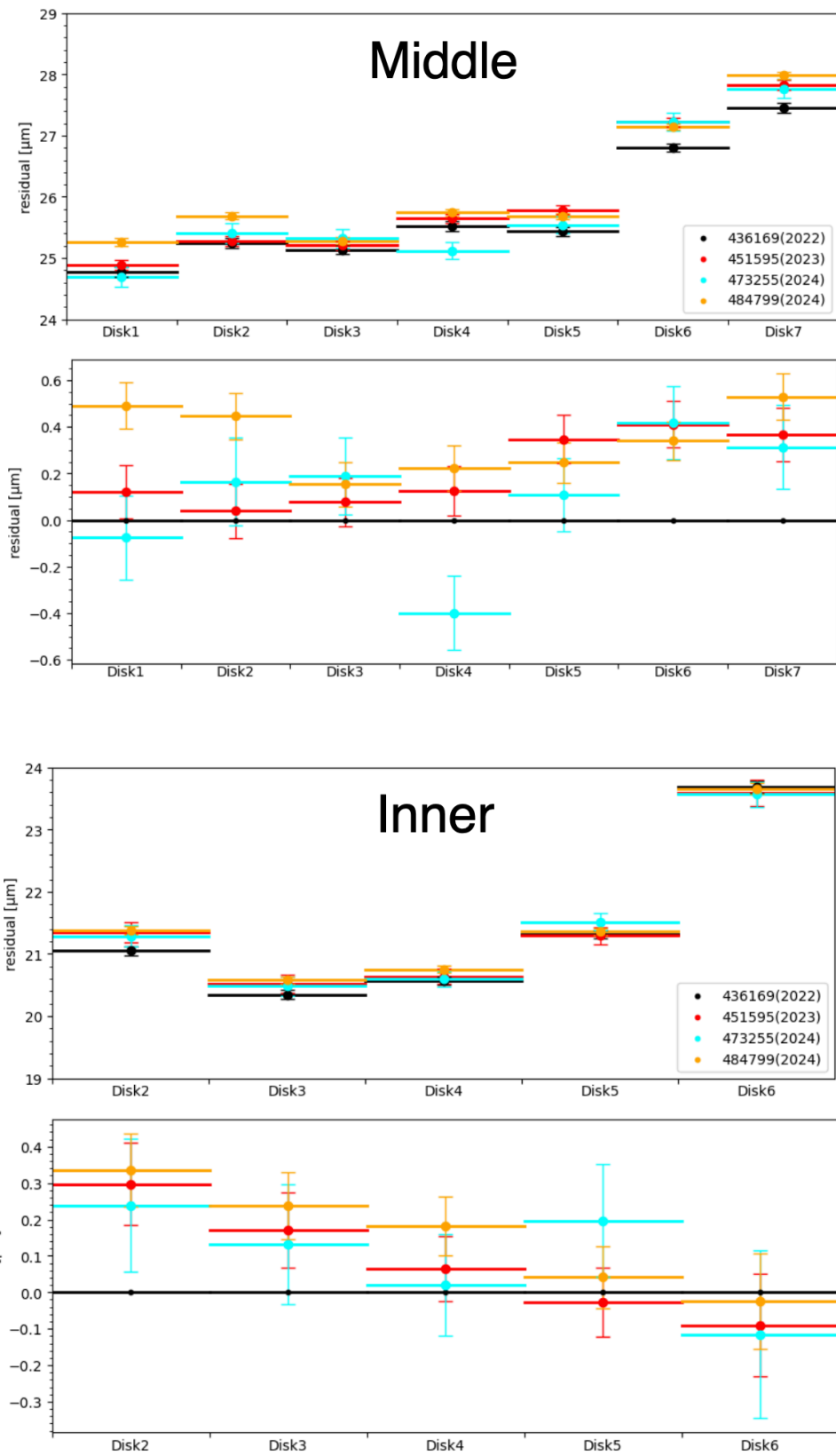


図 5.9 各年のバレル部、エンドキャップ部の位置分解能の比較。それぞれ各層、各ディスクごとの位置分解能と、2022 年からの変化を示す。

エンドキャップ部は統計誤差が大きく、各年で有意な差があるかは判別できなかった。今後使用するデータ量を増やすことで、エンドキャップ部の調査も可能である。バレル部に関して、2022年から2023年にかけて分解能が良くなっている。これは5.3節で述べたように、センサーに印加する高電圧値を上げたためと考えられる。2023年から2024年にかけての変化については次の5.4.2節で、検出器が浴びた放射線量と位置分解能の変化との関係について述べる。また、各バレル層の位置分解能の違いに関しては、5.4.3節で検出効率との関係について述べる。

5.4.2 放射線損傷と位置分解能

ここでは、検出器が浴びた放射線量と位置分解能の関係について述べる。図5.10に、FLUKAシミュレーション [28] で予測される、ビームの重心系エネルギー 14 TeV における放射線照射量を示す。

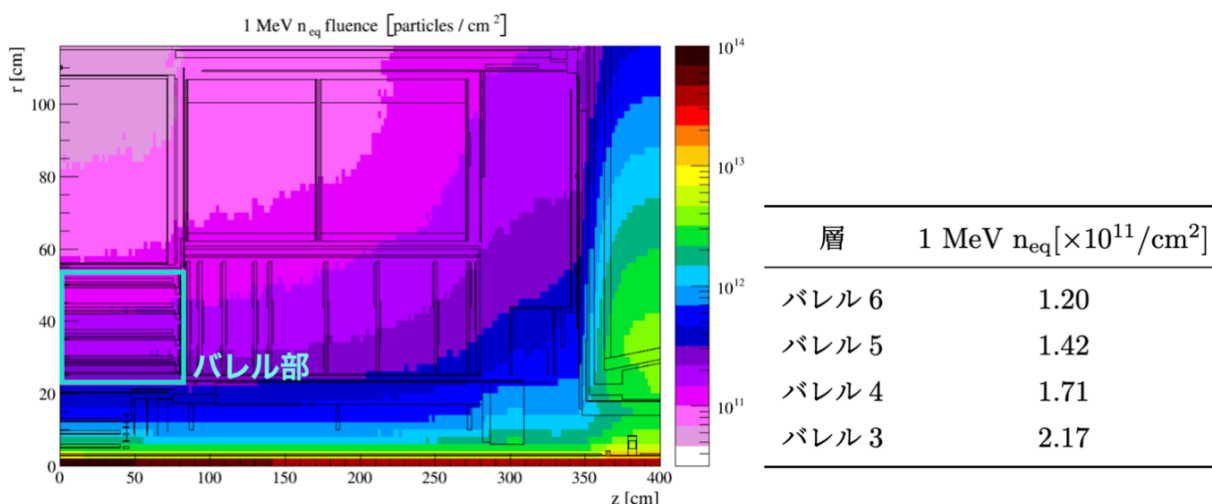


図 5.10 ビームの重心系エネルギー 14 TeV における、1 MeV 中性子に換算した放射線照射量 [29]

この放射線照射量と、4.2節の表3に示したビーム衝突量を使って調べた、放射線照射量の蓄積に伴う位置分解能の変化を図5.11に示す。

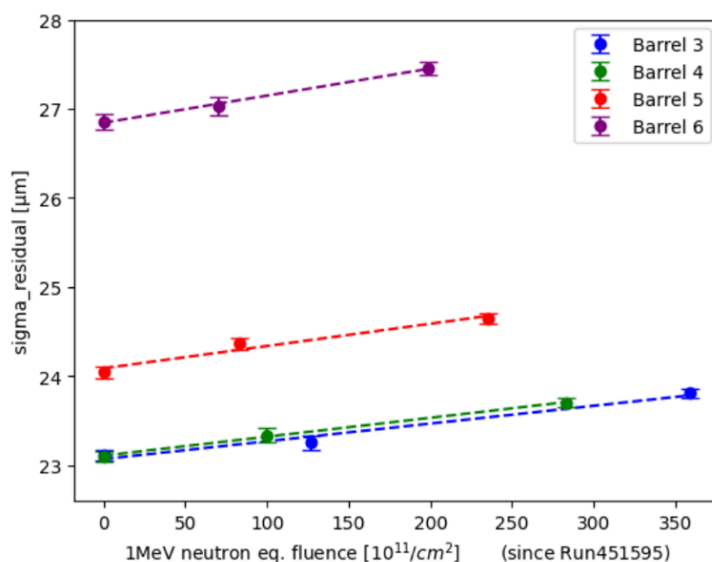


図 5.11 Run 451595 (2023) からの放射線照射量に対する位置分解能の変化を示す。点線は最小二乗法で求めた近似直線。

5.4.1 節で述べたように、各 Run は同じ μ の範囲で比較している。また、各 Run でセンサーに印加している高電圧値は同じである。そのため、図 5.9 で見られたバレル部の 2023 年から 2024 年にかけての悪化の原因の一つとして、放射線損傷が考えられる。

5.4.3 放射線損傷とヒット検出効率

図 5.11 に見られた、放射線照射量の蓄積に伴う残差の変化の考察として、放射線損傷によるヒット検出効率の変化について述べる。図 5.12 に、各 Run、各バレル層の検出効率を示す。

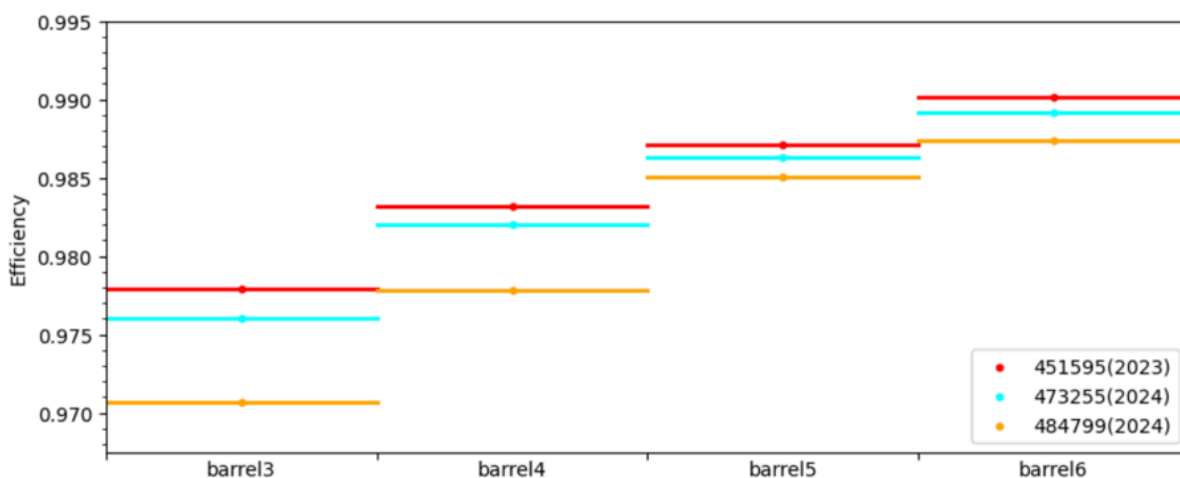


図 5.12 各 Run、各バレル層におけるヒット検出効率の比較

時間の経過と共に、検出効率の低下が見られる。この原因として、2.4.3 節で述べた、荷電粒子により生成された電荷が格子欠陥に捕まることによる、電荷収集効率の低下が考えられる。また、

内側の層ほど、検出効率が低いことが見られる。これは、図 5.10 に示したように、衝突点に近いほど放射線照射量が大きいためと考えられる。

検出効率の低下は、飛跡が検出器に残したヒット数の減少を意味する。5.2 節で述べたように、ヒット数が少ないと σ_{Track} が大きくなり、残差は大きくなる。そこで、ヒット数減少の効果を取り除くため、SCT 検出器に 8 個、Pixel 検出器に 4 個のヒットを残した飛跡のみを使い、ヒット数を各年で揃えて残差の変化を調べた。その結果を図 5.13 に示す。

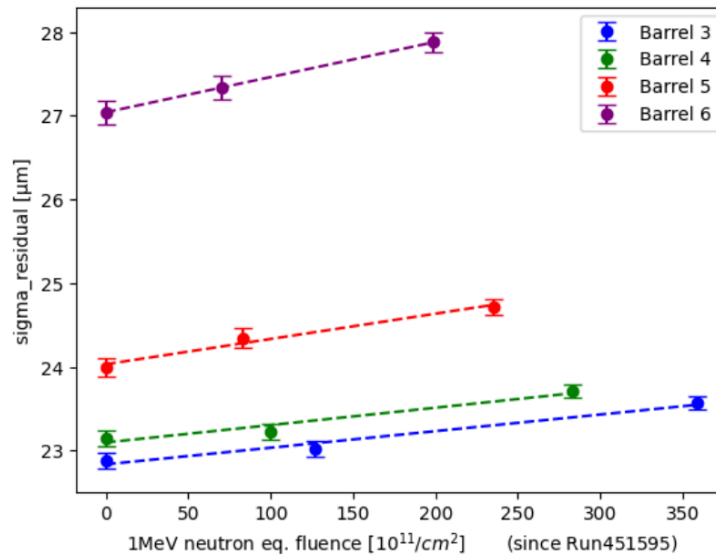


図 5.13 Run 451595 (2023) からの放射線照射量に対する残差の変化。SCT 検出器に 8 個、Pixel 検出器に 4 個のヒットを残した飛跡を使った。

ヒット数を揃えても、図 5.11 と同様の残差の変化が見られる。そのため、放射線照射量の蓄積に伴う残差の変化には、ヒット検出効率の低下とは別の原因があると考えられる。

6 議論

5.4.3 節で述べたように、放射線損傷の蓄積により、位置分解能は悪化すると考えられる。Run 484799 から Run3 終了まで、残り約 200 fb^{-1} のビーム衝突が計画されている。そこで、Run3 終了時点でのバレル部の位置分解能を見積もった。その結果を図 6.1 に示す。各バレル層において、Run 484799 から $1 \mu\text{m}$ 程度悪化することが予想される。5.3 節の結果から、高電圧値を上げることで、位置分解能の悪化を抑えられることが分かった。表 4 に示したように、現在は 200 V から 350 V の高電圧がセンサーに印加されている。高電圧の上限值は 500 V に設定されているため、さらに高電圧値を上げることが可能である。しかし、高電圧値を過度に上げると、漏れ電流が増加する。漏れ電流が増加すると、センサーが発熱する。漏れ電流は温度に依存するため、熱暴走を起こし、漏れ電流はさらに増加する。それを防ぐため、2.5 節で説明した PAT を使い、漏れ電流の増加や検出器の温度をモニターすることが可能である。

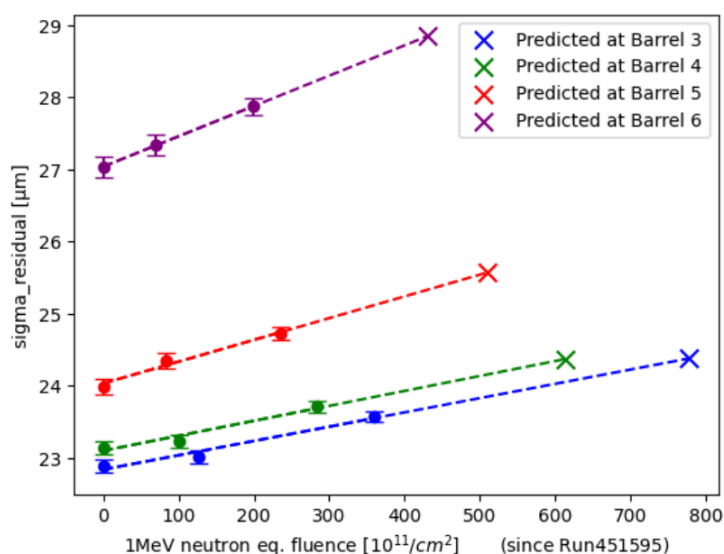


図 6.1 各バレル層の、Run3 終了時点での残差の予想

7 結論

本研究では LHC-ATLAS 実験における、SCT 検出器の位置分解能に対する放射線損傷の影響を、Run3 のデータを使って調べた。パイルアップの増加に伴い飛跡再構成の精度が落ちること、検出器に印加する高電圧値を上げると位置分解能が良くなることなど、運転環境との依存性があった。それらの依存性を取り除き、放射線損傷による位置分解能の変化を調べた。積分ルミノシティ約 220 fb^{-1} のビーム衝突に伴う、位置分解能の変化を調べた。バレル部では、残差が $1 \mu\text{m}$ 程度大きくなっていた。検出器への放射線照射量と残差に相関が見られ、これが残差が大きくなった原因の一つと考えられる。

付録 A ATLAS 検出器の座標系

ATLAS 検出器における座標系を図付録 A.1 に示す。衝突点を原点とし、ビーム軸方向に z 軸 (LHC リングの反時計回りの方向が正)、衝突点から LHC の中心に向かって x 軸 (LHC の中心方向が正)、鉛直上向きに y 軸 (地上方向が正) を取る。また、円柱座標系および極座標系は以下のように定義される。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (10)$$

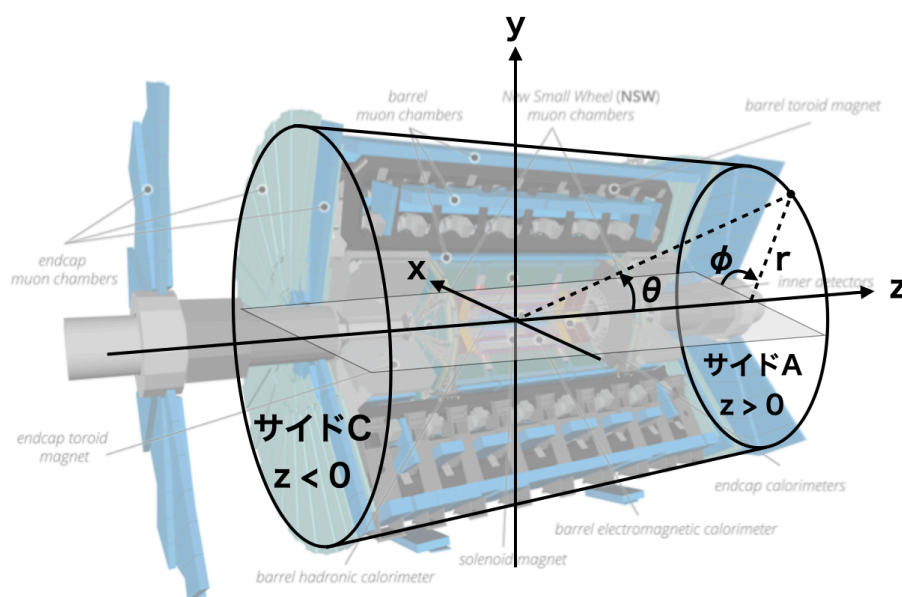
$$\phi = \arctan \frac{y}{x} \quad (11)$$

$$\theta = \arctan \frac{r}{z} \quad (12)$$

擬ラピディティ η は以下のように定義され、衝突点からの粒子の放出方向を表す。粒子密度が η ごとに同程度となる。

$$\eta = -\ln \left[\tan \frac{\theta}{2} \right] \quad (13)$$

また、ATLAS 検出器は z 軸にそって二つの領域に分けられ、 $z > 0$ の領域をサイド A、 $z < 0$ の領域をサイド C と呼ぶ。

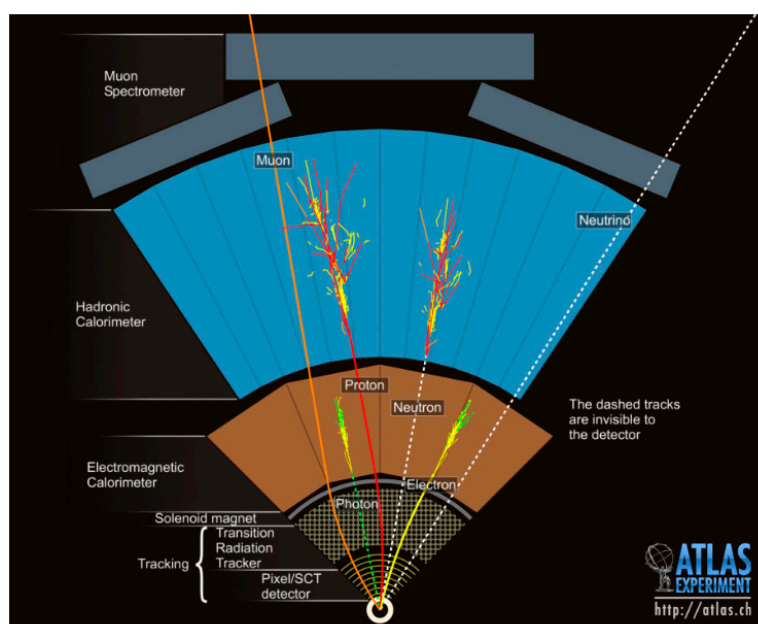


図付録 A.1 ATLAS 検出器における座標系

付録 B 各検出器

ATLAS 検出器は、最内層から内部飛跡検出器、超伝導ソレノイド磁石、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、超伝導トロイド磁石、ミューオン検出器がある。これらの検出器で取得した信号を用いて、生成された粒子を再構成し、運動量やエネルギーを測定し、粒子の種類を同定する。

図付録 B.1 に、ATLAS 検出器内での粒子検出の様子を示す。電子は内部飛跡検出器に飛跡を残し、電磁カロリメータにエネルギーを落とす。光子もまた電磁カロリメータにエネルギーを落とすが、電荷を持たないため内部飛跡検出器に飛跡を残さない。陽子などの電荷を持つハドロンは内部飛跡検出器に飛跡を残し、ハドロンカロリメータにエネルギーを落とす。中性子などの電荷を持たないハドロンもまたハドロンカロリメータにエネルギーを落とすが、内部飛跡検出器に飛跡は残さない。ミューオンは内部飛跡検出器に飛跡を残し、ミューオン検出器で検出される。



図付録 B.1 ATLAS 検出器内での粒子検出 [9]

B.0.1 超伝導磁石

ATLAS 検出器では磁場をかけることで荷電粒子の飛跡を曲げ、その曲率から運動量を測る。そのための磁石には、ソレノイド磁石とトロイド磁石の 2 種類がある。

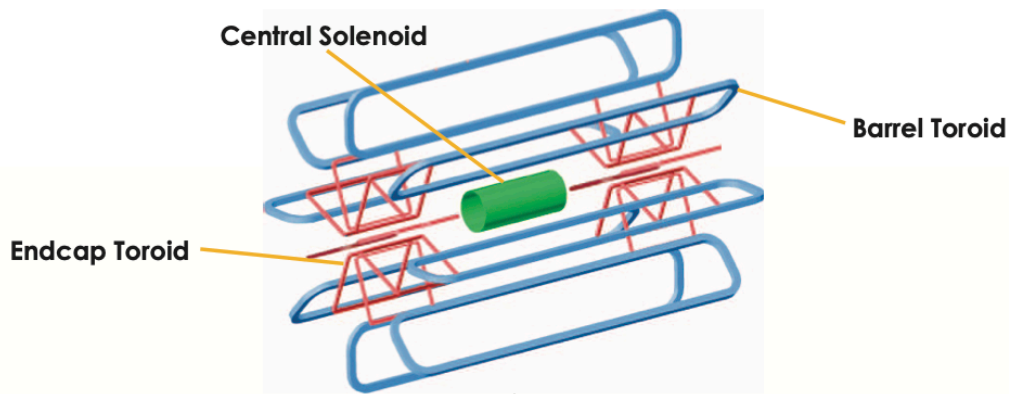
ソレノイド磁石

ソレノイド磁石は、内部飛跡検出器とカロリメータの間にあり、内径 2.46 m、外径 2.56 m、長

さ 5.8 m の円筒形である。2 T の磁場をビーム軸方向にかける。図付録 B.2 に構造を示す。

トロイド磁石

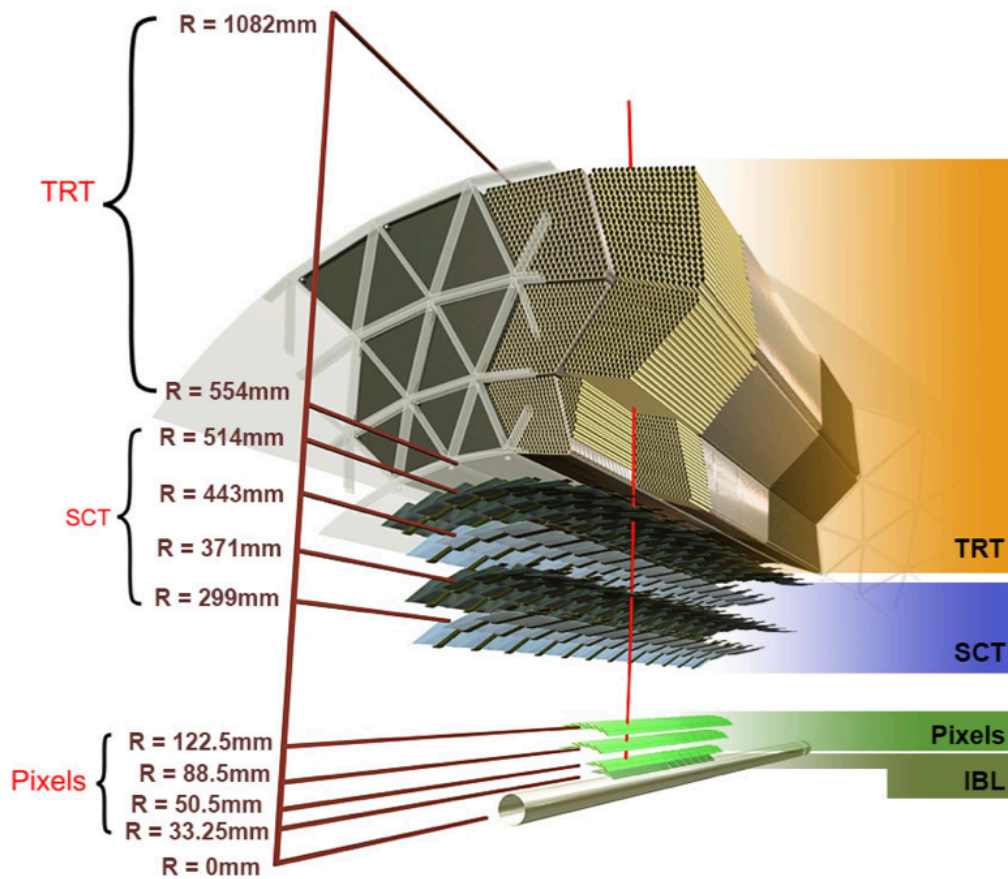
トロイド磁石は、カロリメータの外側に設置されており、バレルトロイドとエンドキャップトロイドからなる。大きさは、バレルトロイドが内径 9.4 m、外形 20.1 m、長さ 25.3 m、エンドキャップトロイドが内径 1.65 m、外径 10.7 m、長さ 5.0 m である。バレルトロイドは 0.5 T、エンドキャップトロイドは 1.0 T の磁場をビーム軸に垂直な方向にかける。



図付録 B.2 磁石システムの構造 [8]

B.0.2 内部飛跡検出器

ここでは、内部飛跡検出器を構成する各検出器を説明する。図付録 B.3 に断面図を示す。



図付録 B.3 内部飛跡検出器の断面図 [10]

Insertable B-Layer

Insertable B-Layer (IBL) は、2013 年～2015 年のシャットダウン期間に内部飛跡検出器の最内層に新たに挿入された。ピクセル型のセンサーを持つシリコン検出器であり、荷電粒子の通過位置情報を二次元で得る。ビームパイプからの距離は 33.25 mm で、 $|\eta| < 3.0$ の範囲を覆う。280 個のモジュールを持ち、モジュールには $50 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ の大きさのピクセルセンサーが 53760 個ある。位置分解能は、 r - ϕ 方向が $10 \mu\text{m}$ 、 z 方向が $75 \mu\text{m}$ である。

Pixel

Pixel は、後述する IBL の外側に設置されているシリコンピクセル型検出器であり、荷電粒子の位置情報を二次元で取得する。3 層のバレル部と両サイド 3 層ずつのエンドキャップ部からなる。ビームパイプからの距離は $50.5 \text{ mm} \sim 122.5 \text{ mm}$ で、 $|\eta| < 2.5$ の範囲をカバーする。 $50 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ を 1 ピクセルとし、74268 ピクセル集めたものを一つのモジュールと呼ぶ。1 ピクセルごとの読み出しが可能であり、1744 個のモジュールからなる。位置分解能は、バレル部は r - ϕ 方向が $12 \mu\text{m}$ 、 z 方向が $66 \mu\text{m}$ 、エンドキャップ部は r - ϕ 方向が $12 \mu\text{m}$ 、 z 方向が $77 \mu\text{m}$ である。

SemiConductor Tracker

SemiConductor Tracker (SCT) は Pixel の外側に設置されたストリップ型検出器であり、4層のバレル部、両サイド9層ずつのエンドキャップ部からなる。ビームパイプからの距離は299 mm～514 mm で、 $|\eta| < 2.5$ の範囲を覆う。4088 個のモジュールからなり、各モジュールは表裏に2枚のセンサーが40 mrad の角度を持って貼り合わされている。これにより、荷電粒子の通過位置情報を二次元で取得できる。SCT に関しては2章で詳しく説明する。

Transition Radiation Tracker

Transition Radiation Tracker (TRT) は SCT の外側に設置されており、 $|\eta| < 2.0$ の範囲をカバーする。直径4 mm のチューブに、金メッキされた直径30 μm のタングステンワイヤー（アノード）が張られており、チューブ壁とワイヤー間に1.5 kV の高電圧を印加する。荷電粒子が通過すると、チューブ内に封入されたガスの分子を電離する。電離電子がアノード近傍で雪崩を起こした信号を読み取る。チューブ間には、ポリプロピレン繊維をシート状にした素材が挟まっており、荷電粒子がその表面を通過すると遷移輻射を起こし、発生した X 線で電子とパイオンを識別できる。

B.0.3 カロリメータ

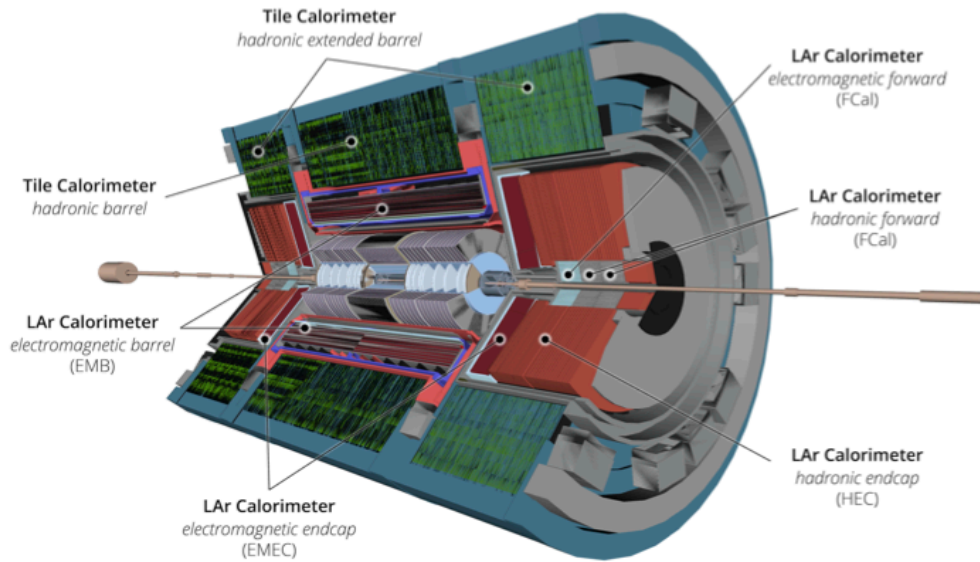
カロリメータは内部飛跡検出器の外側にあり、粒子が電磁シャワーやハドロンシャワーを起こして落としたエネルギーを測定する。電磁カロリメータとハドロンカロリメータからなる。図付録 B.4 にカロリメータの断面図を示す。

電磁カロリメータ

電磁カロリメータは、バレル領域 ($|\eta| < 1.475$) とエンドキャップ領域 ($1.375 < |\eta| < 3.2$) に分けられる。検出層には放射線耐性に優れている液体アルゴン、吸収層には鉛を用いている。バレル部ではアコーディオン構造をとることで、動径によらず ϕ 方向の不感領域を無くしている。

ハドロンカロリメータ

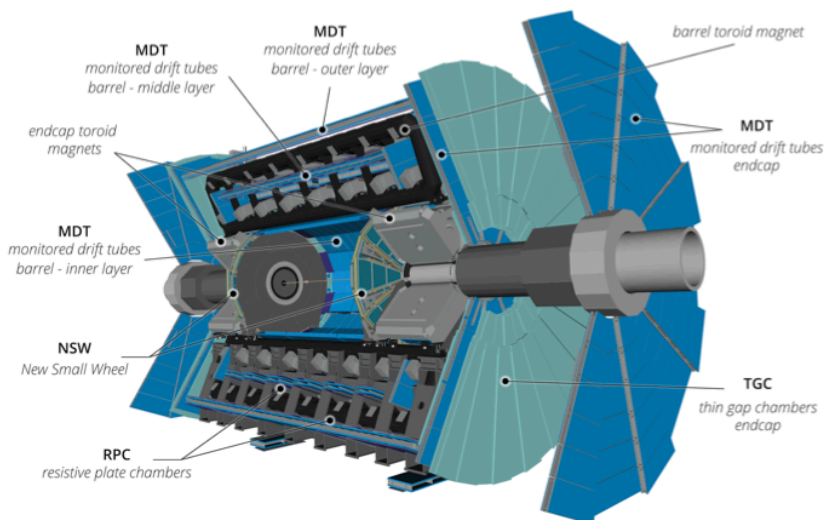
ハドロンカロリメータは電磁カロリメータの外側にある。バレル部 ($|\eta| < 1.7$)、エンドキャップ部 ($1.5 < |\eta| < 3.2$)、フォワード部 ($3.1 < |\eta| < 4.9$) に分けられる。バレル部では吸収層の鉄と検出層のタイル状プラスチックシンチレータが交互に重ねられている。エンドキャップ部とフォワード部では検出層に液体アルゴン、吸収層にはエンドキャップ部で銅、フォワード部でタングステンを用いている。



図付録 B.4 カロリメータの断面図 [3]

B.0.4 ミューオン検出器

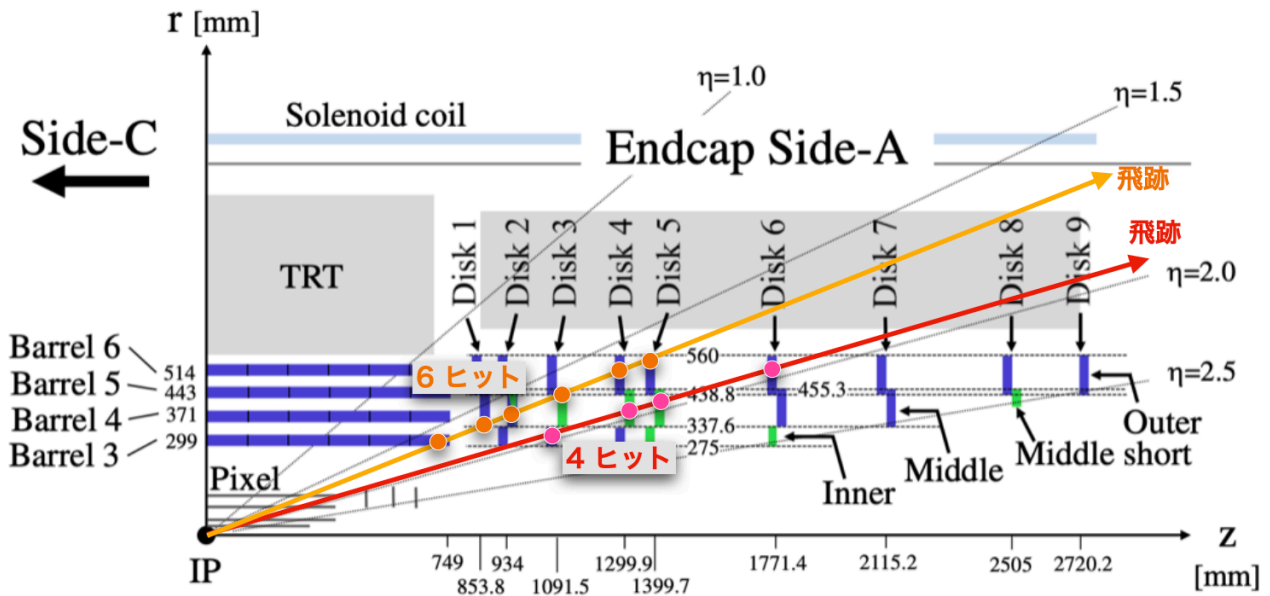
ミューオンは物質との相互作用が小さいため、ミューオン検出器は最も外側に設置されている。運動量測定のための MDT (Monitored Drift Tube) と NSW (New Small Wheel)、トリガーのための RPC (Resistive Plate Chamber) と TGC (Thin Gap Chamber) の 4 つの検出器からなる。図付録 B.5 にミューオン検出器の全体像を示す。



図付録 B.5 ミューオン検出器の全体像 [3]

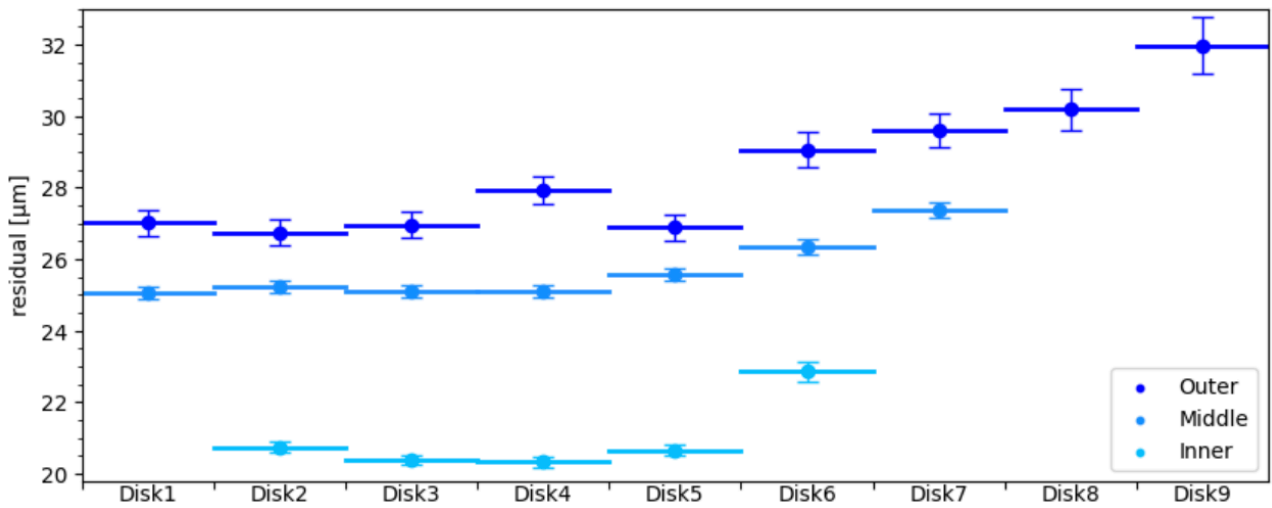
付録 C 検出器の位置依存性

4.3 節で述べたように、残差分布のばらつきは、SCT 検出器の位置分解能と、飛跡再構成の不確かさを含む。この節では、センサーの位置が飛跡再構成の不確かさに与える影響を調べた。例えば図付録 C.1 に示すように、センサーの位置によって、そのセンサーを通る飛跡が Pixel 検出器や SCT 検出器に残すヒット数に差が生まれる。そういった条件の違いによる影響を調べた。



図付録 C.1 飛跡が通る場所によって、検出器に残すヒットの数が異なる。

2.3.1 節で述べたように、エンドキャップ部の Inner、Middle、Outer モジュールのセンサーはそれぞれストリップ間隔が異なる。また、3.1 で述べたように、位置分解能はストリップ間隔に依存する。そのためエンドキャップ部は、各ディスクごとにそれら三つのモジュールを分けて評価した。2024 年の Run 473255 のデータを使って調べた、Inner、Middle、Outer それぞれの位置分解能を図付録 C.2 に示す。

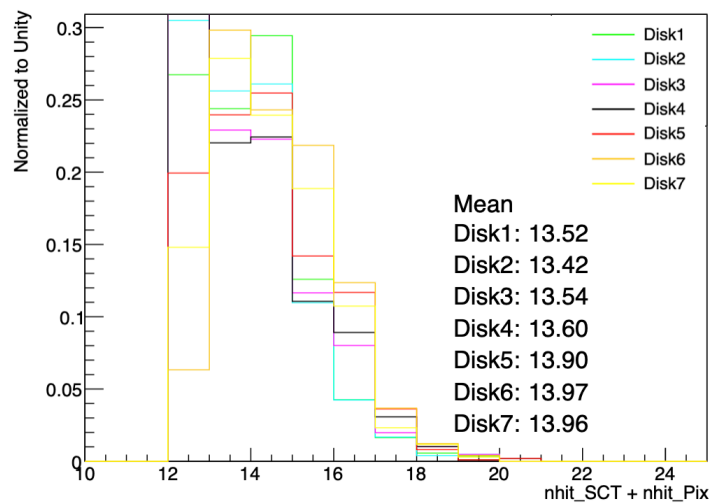


図付録 C.2 エンドキャップ部の Outer、Middle、Inner モジュールにおける、各ディスクの位置分解能の比較。(Run 473255 (2023 年))

Middle、Outer モジュールに関しては、外側のディスクほど位置分解能が悪くなる傾向が見られる。以下でこれに対する考察を述べる。

Middle モジュール

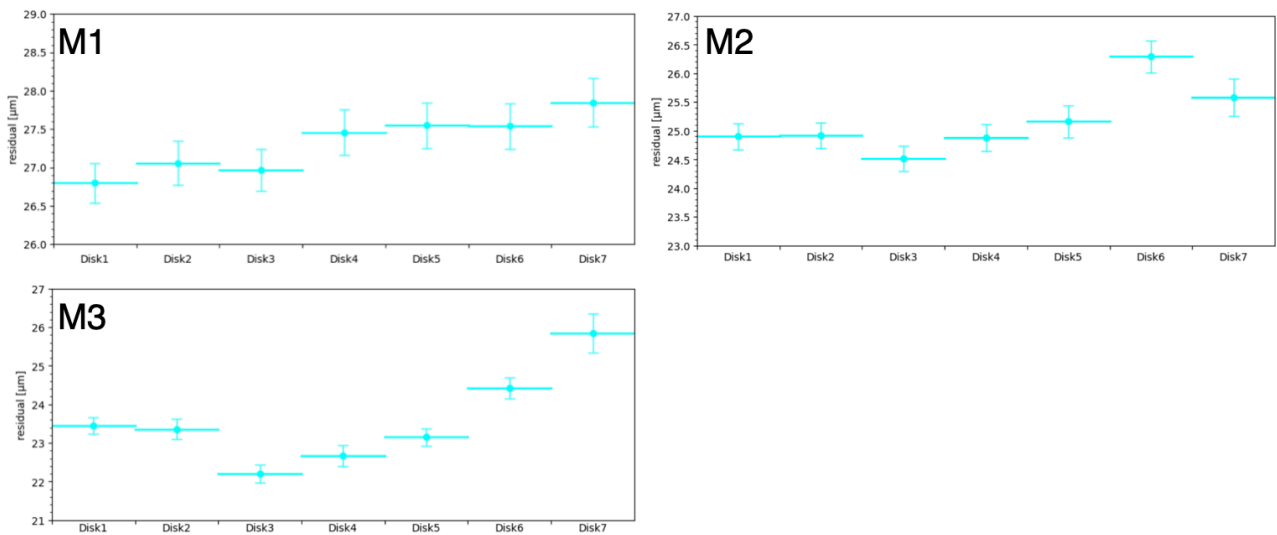
5.2 節で述べたように、飛跡上のヒット数によって σ_{Track} の大きさが変わる。図付録 C.3 に、各ディスクの Middle モジュールを通る飛跡が、Pixel 検出器と SCT 検出器上に残すヒット数の分布を示す。



図付録 C.3 各ディスクの Middle モジュールを通る飛跡が、Pixel 検出器、SCT 検出器に残すヒット数の分布

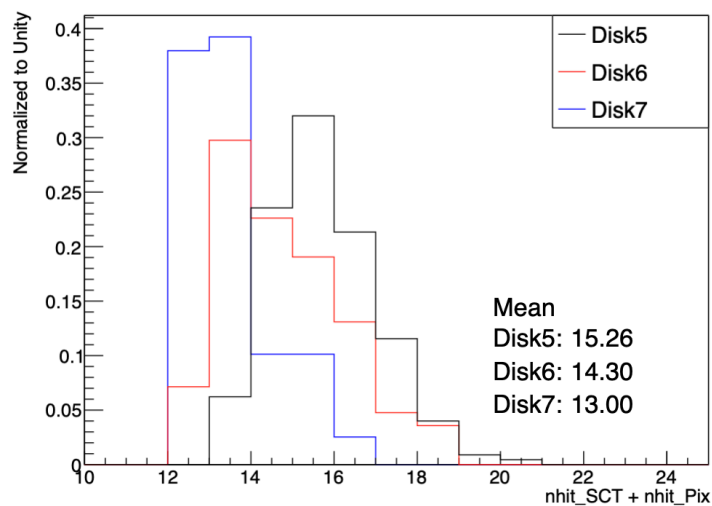
ヒット数の分布に差は見られない。そこで、より細かく調べるため、各ディスクの Middle モジュールを、 η 領域で三分割 (η の小さい領域から順に M1、M2、M3 とする) し、位置分解能を

比較した。図付録 C.4 にその比較を示す。



図付録 C.4 M1、M2、M3 の位置分解能比較

外側のディスクほど位置分解能が悪くなる傾向が、M3 領域で顕著に見られる。図付録 C.5 は、Disk5、Disk6、Disk7 の M3 領域を通る飛跡が Pixel 検出器と SCT 検出器に残す合計ヒット数の分布である。

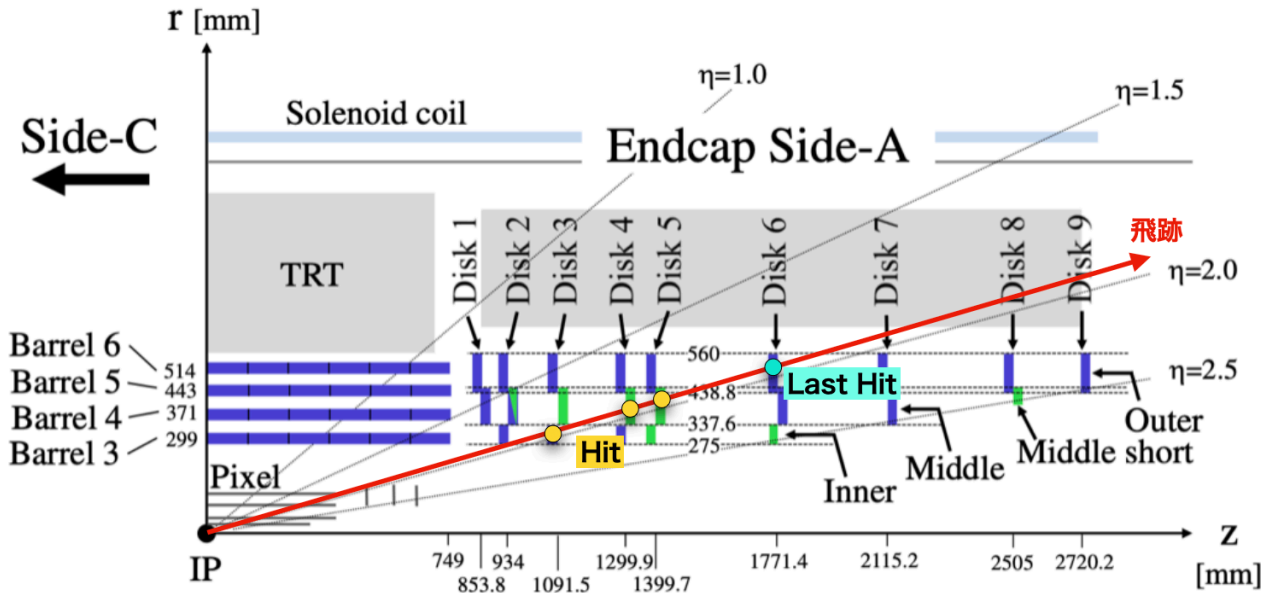


図付録 C.5 Disk5、6、7 の M3 領域を通る飛跡が、Pixel 検出器、SCT 検出器に残すヒット数の分布

外側のディスクほど、ヒット数が少ない割合が高く、ヒット数が多い割合が低いことが見られる。前述した M3 における傾向は、ヒット数の違いの影響が見えていると考えられる。そのため、各年の比較の際は、Middle モジュールは M3 領域を除いて評価する。

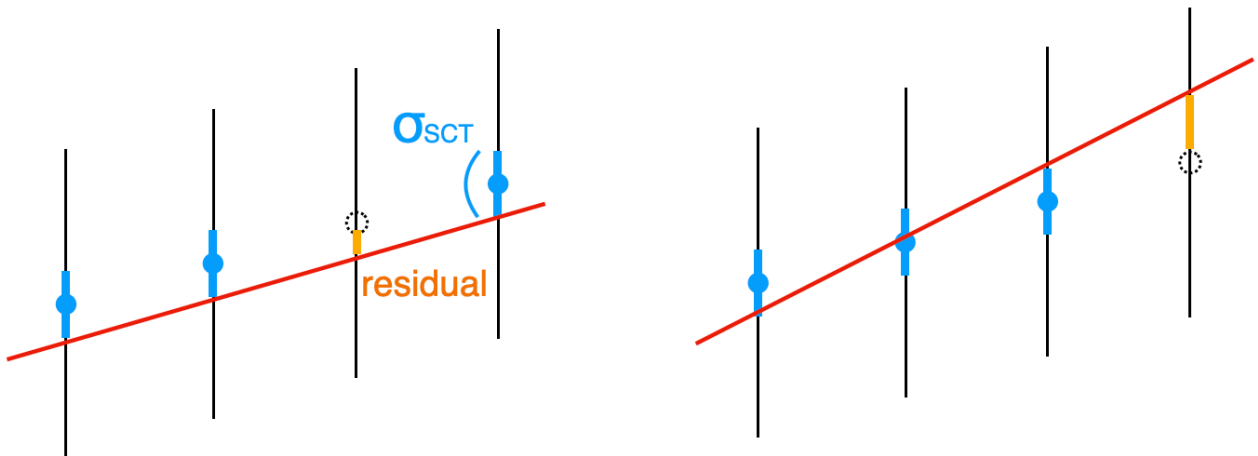
Outer モジュール

Outer モジュール上のヒットは、図付録 C.6 に示すように、飛跡が通る SCT 検出器上の最後のヒット (last hit と呼ぶ) になり得る。



図付録 C.6 上図の場合、青い点が飛跡が通る last hit となる。

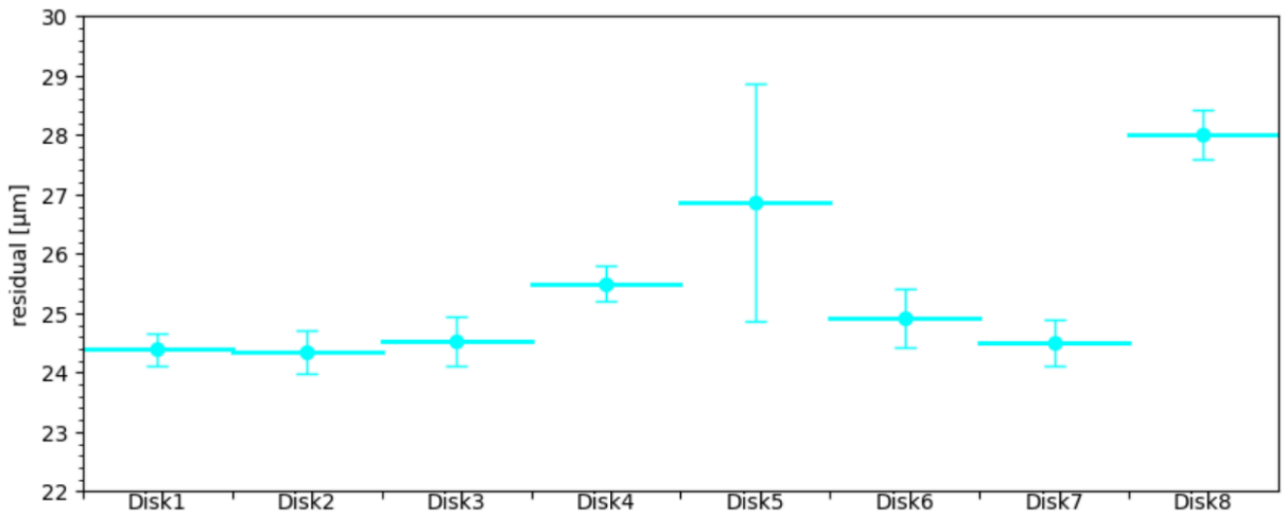
last hit になる影響を調べるため、単純な直線フィットを考える。unbiased track (3.2.3 節参照) を直線フィットで引く場合、図付録 C.7 に示すように、端の点は内側の点よりも残差が大きくなり得る。



図付録 C.7 左図が内側の点を、右図は端の点を使わずに直線を引く模式図。端の点は、残差が大きくなり得る。

そのため、last hit になることが、飛跡再構成に影響を与えられられる。図付録 C.8 に、last hit になる場合を除いた、各ディスクの分解能を比較を示す。ここで、ディスク 9 上のヒット

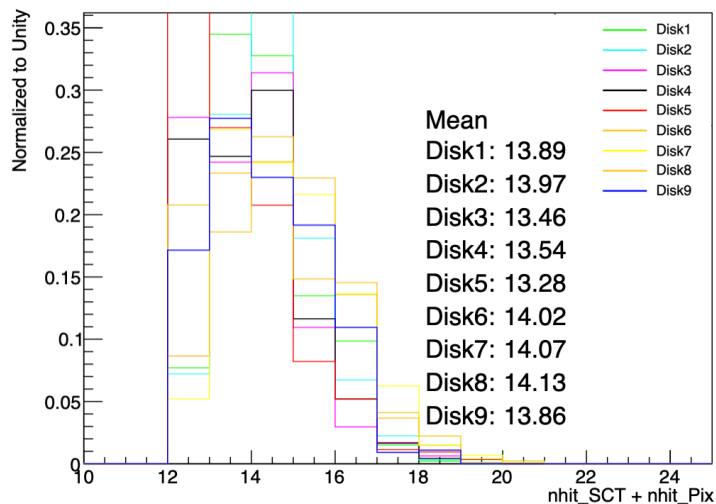
は必ず last hit となるため、除外した。



図付録 C.8 last hit となる場合を除いた、Outer モジュールの位置分解能比較

図付録 C.2 で見えていた、外側のディスクほど位置分解能が悪くなる傾向が無くなった。各年の比較の際は、last hit となるヒットを除いて評価する。そのため、ほとんどのヒットが last hit となるエンドキャップ部のディスク 9、バレル部のバレル 6 は、本研究の対象から外す。

また、図に、各ディスクの Outer モジュールを通る飛跡が、Pixel 検出器と SCT 検出器に残すヒット数の分布を示す。ヒット数の分布に、差は見られない。



図付録 C.9 各ディスクの Outer モジュールを通る飛跡が、Pixel 検出器、SCT 検出器に残すヒット数の分布

謝辞

本研究を進めるにあたり、沢山の方にお力添えいただきました。ここに謝辞として、感謝の意を表します。

南條創教授には研究へのご指導に加え、論理的な考え方や、聞き手や読み手への伝え方なども教えていただきました。また、研究の相談や議論をする中で、自分の意見を尊重しながら耳を傾けていただく姿が印象に残っています。増淵達也准教授には頻繁に時間を設けていただき、活発な議論を重ねることができました。時には夜遅くに及ぶこともありましたが、自分の疑問が解決するまで辛抱強く教えていただきました。また、様々な文献に目を通し、知見を共有していただきました。廣瀬穰助教には自分が M1 で何も分からなかった頃、一つ一つ丁寧に教えていただき、開発を手助けしていただきました。ATLAS 実験の概要や、PAT 開発の基礎的な知識など、幅広く教えていただきました。

筑波大学の廣瀬茂輝助教、早稲田大学の秋山大也さん、筑波大学の北彩友海さんには、自分が CERN に滞在している間、公私共に手厚くサポートしていただきました。廣瀬さんとは同じオフィスで作業し、日常的に相談に乗っていただきました。秋山さん、北さんには、いろいろな場所に連れて行っていただき、その度にお食事をご馳走になりました。3人でレマン湖へ出かけたことは、素敵な思い出の一つです。最初は心細く心配な CERN 滞在でしたが、皆様のおかげで楽しい時間を過ごすことができました。ATLAS 実験の最前線で活躍する皆様の姿は、とてもカッコよかったです。

阪大 ATLAS グループの先輩である Lakmin Wickremasinghe さん、荒木田陸斗さん、久郷莉奈さんは、基本的な質問にも丁寧に答えていただいたり、研究の進捗を気にかけていただくなど、とても心強い存在でした。特に Lakmin さんは廣瀬穰助教と共に、一から PAT 開発の手助けをしていただきました。

研究室の同期である片山舞さんは、神戸大学の学部生の頃から研究を共にしてきました。妥協なく熱心に研究に取り組む姿勢を見て、自分も頑張ろうという気持ちになりました。修論執筆の期間は相談や雑談をすることが、支えとなりました。

研究室の他の方々も、実験グループが異なることもありあまり話せませんでしたが、それぞれの分野で活躍する姿を拝見し、日々刺激を受けていました。

秘書である前田純子さん、清川聖子さんには、事務関連の手続きに加え、研究以外の話も気軽にさせていただきました。研究生活を多方面から支えていただきました。

最後に、学生生活を支えていただいたすべての方々に感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] CERN Accelerating science <https://cds.cern.ch/record/40525>
- [2] CERN Accelerating science <https://project-hl-lhc-industry.web.cern.ch/content/project-schedule>
- [3] The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider: A Description of the Detector Configuration for Run 3, The ATLAS Collaboration, JINST 19 (2024) P05063
- [4] Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker, The ATLAS collaboration, The ATLAS collaboration 2014 JINST 9 P08009
- [5] Recent results from the ATLAS SCT irradiation programme, C.M Buttar et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A 447 (2000) 126-32
- [6] ATLAS EXPERIMENT,
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/>
- [7] ATLAS Collaboration site,
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResultsRun3>
- [8] ATLAS Fact Sheet, <https://cds.cern.ch/record/1457044/files>
- [9] CERN Accelerating science, <https://atlas.cern/Resources/Schematics>
- [10] CERN Accelerating science, <https://atlas.cern/Resources/Schematics>
- [11] CERN Accelerating science, <https://cds.cern.ch/record/1698966/plots>
- [12] The silicon strip sensors of the ATLAS semiconductor tracker, Muhammad Aijaz Ahmad, Javi Alonso, Ladislav Andricek, Robert Apsimon et al., Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A 578(2007) 98-118
- [13] Track fitting in the ATLAS experiment, Thijs Gerrit Cornelissen, ISBN:9789064640513
- [14] Radiation Damage in Silicon Particle Detectors - microscopic defects and macroscopic

properties -, Michael Moll, 1999

- [15] The ATLAS SCT groudng and shielding concept and Implementation, R L Bates et al 2012, JINST 7 P03005

- [16] ATLAS Collaboration site,
<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/SCT-2022-002/>

- [17] CERN Accelerating science,
<https://atlas.cern/updates/experiment-briefing/inner-detector-alignment>

- [18] ATLAS Software Documentation,
<https://atlassoftwaredocs.web.cern.ch/internal-links/tracking-tutorial/idooverview/>

- [19] Development in the ATLAS Tracking Software ahead of LHC Run2, Nicholas Styles, 2015 Conf. Ser.608 012047

- [20] Application of Kalman filtering to track and vertex fitting, R.Fruhworth, 1987, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A262 (1987) 444-450

- [21] Beam study of irradiated ATLAS-SCT prototypes, T.Akimoto et al. 2002, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A485 (2002) 67-72

- [22] ATLAS Collaboration site,
<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/IDET-2024-001/>

- [23] ATLAS Collaboration site,
<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/SCT-2024-002/>

- [24] Pixel Detectors From Fundamental to Applications, Leonardo Rossi, Peter Fischer, Tilman Rohe, Norbert Wermes

- [25] ATLAS Collaboration site,
<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/SCT-2022-001/>

- [26] Measurement of Spatial Resolution of ATLAS Pixel Detectors, Lari Tommaso, Dec 2000 CERN-OPEN-2000-345

- [27] ATLAS EXPERIMENT - PUBLIC RESULTS,
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResultsRun3>
- [28] FLUKA: a multi-particle transport code,
A.Ferrari, P.R.Sala, A.Fasso and J.Ranfit, CERN-2005-10, INFN/TC05/11, SLAC-R-773
(2005)
- [29] ATLAS EXPERIMENT,
<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/>