

修士論文

LHC-ATLAS 実験 Run3 における  
放射線損傷を考慮した  
シリコンストリップ検出器の運用と  
飛跡再構成への影響

早稲田大学 先進理工学研究科  
物理及び応用物理学専攻 寄田研究室  
伊藤 紘貴

2021年2月6日

## 概要

スイス・ジュネーブ郊外に位置する欧州原子核研究機構 (CERN) では世界最大の陽子・陽子衝突型円形加速器 Large Hadron Collider (LHC) を用いて、新物理探索や標準模型の精査を行っている。LHC は 2018 年まで Run2 として稼働をし、現在は 2022 年からの 3 年間の運転が予定されている Run3 に向けたシャットダウン中である。LHC の 4 つの衝突点の 1 つには ATLAS 検出器が設置されており、その最内層に挿入されている内部飛跡検出器は Run3 終了までの運転となっている。内部飛跡検出器は大量の放射線に晒されるため、これまでの放射線の影響を評価した上で、Run3 終了までの放射線量も考慮した運用方法を構築することが重要となる。内部飛跡検出器の 1 つであり、シリコンストリップ検出器である SCT の放射線損傷は良い精度でモデル化されており、Run3 終了まで運転が可能であると予想されている。一方、様々な理由により SCT の最内層と最外層の運転が Run3 終盤において難しくなる可能性がある。よって本研究では、SCT の最内層、最外層のセンサーが全て動作しないという保守的な状況を想定し、飛跡再構成に対する影響を評価した。また、これらの影響を最小化するための提案についても議論した。

影響を  $\mu$  粒子、 $\tau$  粒子、内部飛跡検出器のみで再構成される飛跡の 3 種類について評価した。その中でも最も影響の大きかったのは内部飛跡検出器のみで再構成される飛跡であり、最内層が動作しない場合に 16.2%、最外層が動作しない場合に 13.4% の飛跡再構成に対する影響が確認された。また、これらの影響は再構成の際に要求するシリコンのヒット数の要求を満たすことができない飛跡が増えたことによるものであるため、要求を緩和することで影響を抑えることができることを確認した。

## 目次

<b>1</b>	<b>序章</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>LHC-ATLAS 実験</b>	<b>2</b>
2.1	ATLAS 検出器	3
2.1.1	内部飛跡検出器	5
2.1.2	カロリメータ	7
2.1.3	ミューオン検出器	8
2.2	飛跡パラメーター	9
2.3	トリガーシステム	9
<b>3</b>	<b>SemiConductor Tracker (SCT)</b>	<b>11</b>
3.1	動作原理	11
3.1.1	半導体	11
3.1.2	バンド構造	11
3.1.3	pn 接合	13
3.1.4	p-in-n シリコンセンサー	14
3.2	放射線損傷	14
3.2.1	漏れ電流	14
3.2.2	バルク損傷	15
3.2.3	アニーリングと逆アニーリング	15
3.2.4	基礎特性の変化	16
3.3	現状と Run3 に向けた対策	16
3.4	本研究の主題	17
<b>4</b>	<b>飛跡再構成に対する影響</b>	<b>19</b>
4.1	$\mu$ 粒子に対する影響	19
4.1.1	再構成率に対する影響	19
4.1.2	分解能に対する影響	21
4.2	$\tau$ 粒子に対する影響	23
4.2.1	$\tau$ 粒子の再構成	23
4.2.2	$\tau$ 粒子に対する影響	24
4.2.3	$\tau$ 粒子への影響の精査	26
4.3	ジェット内の飛跡に対する影響	28
4.4	最内層及び最外層がどちらも動作しない場合	31
4.5	まとめ	37
<b>5</b>	<b>影響の最小化</b>	<b>39</b>
5.1	飛跡再構成の要求の緩和	39
5.1.1	全 $\eta$ 領域で要求を緩和	39
5.1.2	バレル領域のみで要求を緩和	42

---

5.2	まとめ . . . . .	45
<b>6</b>	<b>まとめと展望</b>	<b>46</b>
<b>A</b>	<b>付録</b>	<b>48</b>

図目次

1	LHCの概観図 [3]	2
2	LHCのアップデート計画 [4]	2
3	ATLAS検出器 [5]	3
4	ATLAS検出器内での粒子検出 [6]	3
5	内部飛跡検出器 [5]	5
6	Pixel[8]	6
7	SCT[9]	6
8	カロリメータの断面図 [5]	8
9	ミューオン検出器の概観 [5]	8
10	飛跡パラメーター	9
11	トリガーシステム [10]	10
12	n型半導体(左)とp型半導体(右)[11]	11
13	シリコン原子のバンド構造 [12]	12
14	金属、絶縁体、半導体のバンドギャップのイメージ	12
15	pn接合による拡散と空乏層	13
16	順バイアス電圧と逆バイアス電圧	13
17	p-in-n型センサー	14
18	フレンケル欠陥とショットキー欠陥 [13]	15
19	シリコンセンサーの型反転 [14]	16
20	放射線損傷の実測とモデル [15]	17
21	SCTの配置 [16]	18
22	データにおける $\mu$ 粒子の再構成に対する影響	20
23	シミュレーションにおける $\mu$ 粒子の再構成に対する影響	20
24	$\mu$ 粒子の飛跡のシリコンのヒット数	21
25	$\mu$ 粒子の分解能に対する影響	22
26	2本の $\mu$ 粒子の不変質量	23
27	$\tau$ の崩壊モードと崩壊分岐比 [1]	24
28	データにおける $\tau$ 粒子の再構成に対する影響	25
29	シミュレーションにおける $\tau$ 粒子の再構成に対する影響	26
30	シミュレーションにおける $\tau$ Trackの再構成に対する影響	27
30	シミュレーションにおける $\tau_{had}$ のprong数の比較	28
31	データにおける飛跡の再構成に対する影響	30
32	シミュレーションにおける飛跡の再構成に対する影響	30
33	飛跡のシリコンのヒット数	31
34	飛跡の $p_{Tvs}$ シリコンのヒット数	31
35	データにおける $\mu$ 粒子の再構成に対する影響 (w/o B3&6)	32
36	シミュレーションにおける $\mu$ 粒子の再構成に対する影響 (w/o B3&6)	33
37	$\mu$ 粒子の分解能に対する影響 (w/o B3&6)	34
38	2本の $\mu$ 粒子の不変質量	35
39	シミュレーションにおける $\tau_{had}$ に対する影響 (w/o B3&6)	36

---

40	データにおける飛跡の再構成に対する影響 (w/o B3&6) . . . . .	37
41	シミュレーションにおける飛跡の再構成に対する影響 (w/o B3&6) . . . . .	37
42	シリコンのヒット数の要求を7ヒットにした場合の飛跡の再構成に対する影響 . .	40
43	シリコンのヒット数の要求を6ヒットにした場合の飛跡の再構成に対する影響 . .	40
44	飛跡の再構成 (略図) . . . . .	41
45	CPU リソースの増加量 . . . . .	42
46	飛跡と CPU リソースの関係 . . . . .	42
47	バレル領域においてシリコンのヒット数の要求を7ヒットにした場合の飛跡の再構 成に対する影響 . . . . .	43
48	バレル領域においてシリコンのヒット数の要求を6ヒットにした場合の飛跡の再構 成に対する影響 . . . . .	44
49	シリコンのヒット数の要求を変えたときのヒット数分布 . . . . .	44
50	データにおける $\mu$ 粒子とジェット内の飛跡の $\Phi$ 分布 . . . . .	48
51	シミュレーションにおける $\mu$ 粒子とジェット内の飛跡の $\Phi$ 分布 . . . . .	49
52	内部飛跡検出器の $\Phi$ 方向の構造 . . . . .	49

## 表目次

1	標準模型におけるフェルミオン . . . . .	1
2	標準模型におけるボソン . . . . .	1
3	$\mu$ 粒子の分解能の標準偏差 . . . . .	22
4	不変質量の分解能の標準偏差 . . . . .	23
5	データにおける $\mu$ 粒子の飛跡のシリコンのヒットの使用率 . . . . .	33
6	シミュレーションにおける $\mu$ 粒子の飛跡のシリコンのヒットの使用率 . . . . .	33

## 1 序章

素粒子とは物質の最小単位であり、素粒子物理学とは素粒子とそれらの相互作用を研究する学問である。標準模型は約 100 年にわたって理論・実験の両面から発展していき、多くの物理事象を説明することができる。標準模型の素粒子は物質を構成するフェルミオンと相互作用を担うボソンからなる。フェルミオンはクォークとレプトンに分かれており、3 世代ずつ存在する。ボソンは 3 つの力 (電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用) を媒介する光子, Z・W ボソン, グルーオンと質量の起源であるヒッグス粒子がある。それぞれの詳細を表 1, 2 に示す [1]。

表 1: 標準模型におけるフェルミオン

	世代	表記	名称	スピン	電荷	質量 [GeV]
クォーク	第 1 世代	u	アップ	1/2	+2/3	$2.16^{+0.49}_{-0.26} \times 10^{-3}$
		d	ダウン	1/2	-1/3	$4.67^{+0.48}_{-0.17} \times 10^{-3}$
	第 2 世代	c	チャーム	1/2	+2/3	$1.27 \pm 0.02$
		s	ストレンジ	1/2	-1/3	$93^{+11}_{-5} \times 10^{-3}$
	第 3 世代	t	トップ	1/2	+2/3	$172.76 \pm 0.30$
		b	ボトム	1/2	-1/3	$4.18^{+0.03}_{-0.02}$
レプトン	第 1 世代	$\nu_e$	電子ニュートリノ	1/2	0	< 1.1eV
		e	電子	1/2	-1	$0.511 \times 10^{-3}$
	第 2 世代	$\nu_\mu$	ミューニュートリノ	1/2	0	< 1.1eV
		$\mu$	ミュー	1/2	-1	$105.6 \times 10^{-3}$
	第 2 世代	$\nu_\tau$	タウニュートリノ	1/2	0	< 1.1eV
		$\tau$	タウ	1/2	-1	$1776.86 \pm 0.12 \times 10^{-3}$

表 2: 標準模型におけるボソン

表記	名称	スピン	電荷	質量 [GeV]	相互作用
$\gamma$	光子	1	0	0	電磁相互作用
$W^\pm$	W ボソン	1	$\pm 1$	$80.379 \pm 0.012$	弱い相互作用
Z	Z ボソン	1	0	$91.1876 \pm 0.0021$	弱い相互作用
g	グルーオン	1	0	0	強い相互作用
H	ヒッグス	0	0	$125.10 \pm 0.14$	質量を与える

## 2 LHC-ATLAS 実験

スイスのジュネーブに位置する欧州原子核研究機構 (CERN) では、地下 100 m に設置された円周約 27 km の世界最大の陽子・陽子衝突型円形加速器である Large Hadron Collider (LHC) を使った標準理論の精査や新物理探索を行っている [2]。LHC には 4 つの衝突点が設けられており、それぞれに ATLAS, CMS, LHCb, ALICE という検出器が設置されている (図 1)。LHC は 2010 年に重心系エネルギー  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  運転を開始し、2012 年に  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  に上げて運転した (Run1)。その後、2 年間のシャットダウン期間 (LS1) を経て、2015 年から 2018 年まで  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  で運転をした (Run2)。現在は 2022 年までのシャットダウン中 (LS2) であり、その後 Run3 が開始される予定である。今後も含めた LHC の運転計画を図 2 に示す。

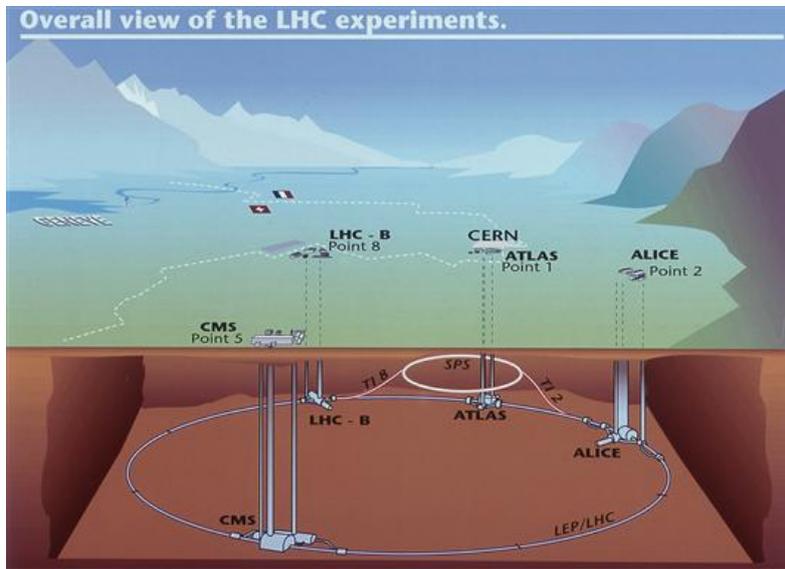


図 1: LHC の概観図 [3]



図 2: LHC のアップデート計画 [4]

## 2.1 ATLAS 検出器

A Toroidal LHC ApparatuS(ATLAS) 検出器 (全体像を図 4 に示す) は全長 44 m、高さ 25 m、総重量 7000 t の大型汎用検出器であり、内側から内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミューオン検出器によって構成されている。

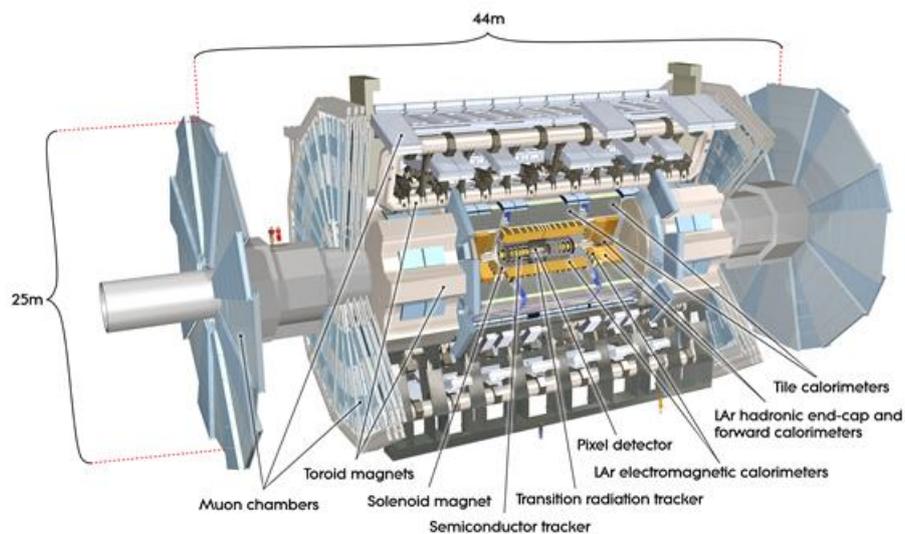


図 3: ATLAS 検出器 [5]

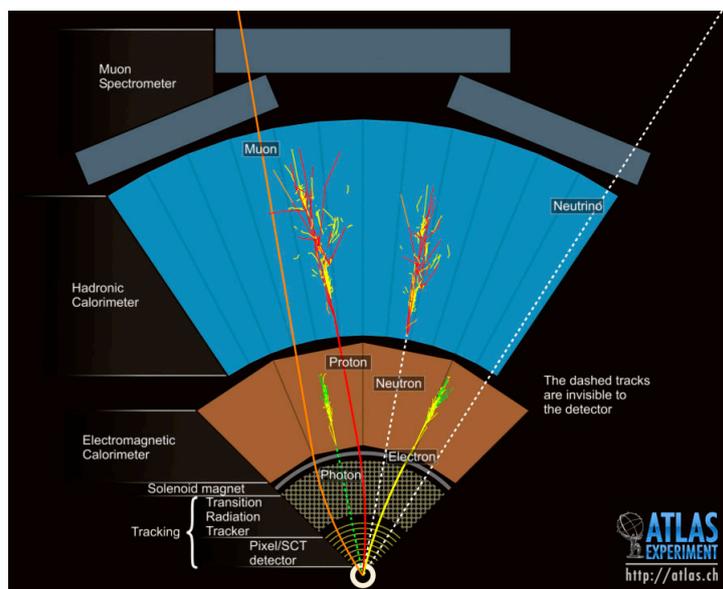


図 4: ATLAS 検出器内での粒子検出 [6]

粒子が ATLAS 検出器内を通過するときの反応を図 3 に示す。電子は内部飛跡検出器に飛跡を残し、電磁カロリメータで主にエネルギーを落とす。光子もまた電磁カロリメータでエネルギー

を落とすが、電荷を持ってい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っているハドロンは内部飛跡検出器に飛跡を残し、ハドソンカロリメータでエネルギーを落とすが、中性子などの電荷を持っていないハドロンは内部飛跡検出器で飛跡を残さない。 $\mu$  粒子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。ニュートリノは信号を残さない。

ATLAS 実験において、座標は衝突点を原点とした右手直交座標系で定義されており、ビーム軸方向に  $z$  軸を、衝突点から LHC の中心に向かって  $x$  軸を、地上方向に向かって  $y$  軸を取る。また、円柱座標系及び極座標系は 1~3 によって定義されている。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1)$$

$$\phi = \arctan \frac{y}{x} \quad (2)$$

$$\theta = \arctan \frac{r}{z} \quad (3)$$

また、擬ラピディティ  $\eta$  は粒子密度が  $\eta$  毎に同程度である点で有用である。そのため、検出器の検出領域の定義に使われており、式 4 で定義される。

$$\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

これらを用いた  $(\eta, \phi)$  空間における距離は式 5 で定義される。

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2} \quad (5)$$

### 2.1.1 内部飛跡検出器

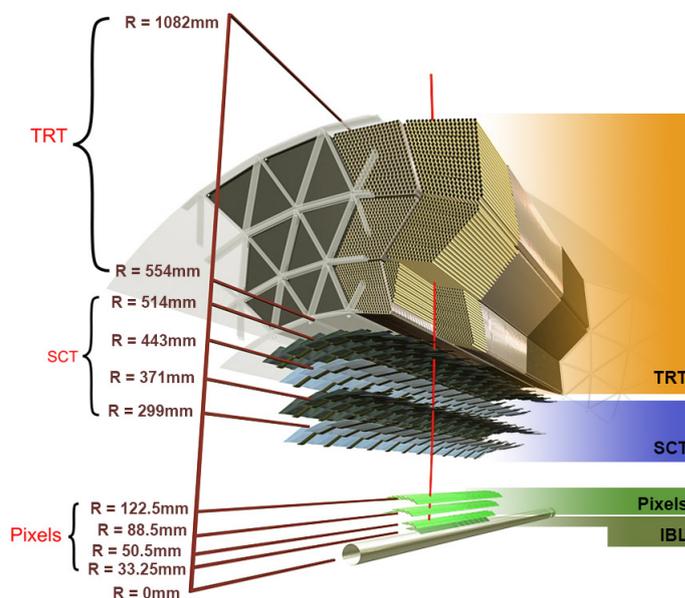


図 5: 内部飛跡検出器 [5]

内部飛跡検出器は内側から、Insertable B-Layer (IBL), Pixel, Semi-Conductor Tracker (SCT), Transition Radiation Tracker (TRT) によって構成されており、荷電粒子の位置や運動量の精密測定および衝突点の再構成に使われる。内部飛跡検出器にはソレノイド磁石による 2 T の磁場がかけている。この磁場によるローレンツ力によって荷電粒子が曲げられ、その曲率によって運動量が測定される。内部飛跡検出器の断面図を図 5 に示す。

#### Insetable B-Layer

Insertable B-Layer (IBL) は LS1 中の 2015 年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検出器であり、 $\phi$  方向と  $\eta$  方向の 2 次元の位置情報と収集電荷量を読み出す [7]。ビームパイプからの距離は 33.25mm で、 $|\eta| < 2.9$  の範囲をカバーしている。IBL はビームの中心点から遠い場所の 3D モジュールと近い場所の planar モジュールから構成されており、それぞれのモジュールは  $50 \times 250 \mu\text{m}^2$  の大きさのセンサーによって構成されている。

#### Pixel

Pixel は IBL の外側に設置されているピクセル型検出器であり、IBL と同様に 2 次元の位置情報と収集電荷量を読み出す。バベル部に 3 層、エンドキャップ部に 4 枚で構成されており、ビームパイプからの距離は 50.5mm ~ 122.5mm で、 $|\eta| < 2.5$  の範囲をカバーしている。図 6 に Pixel の概観を示す。Pixel は 1744 枚のモジュールから構成されており、モジュールは  $50 \times 400 \mu\text{m}^2$  の大きさのセンサーによって構成されている。

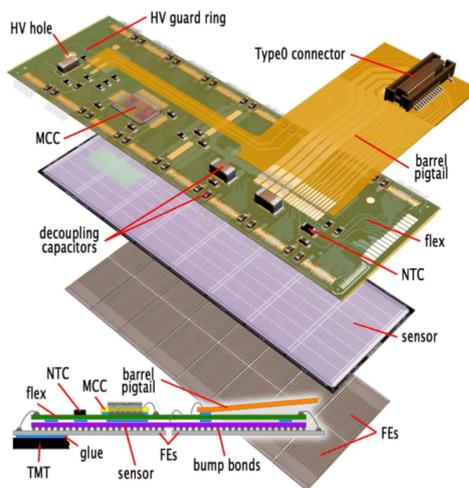


図 6: Pixel[8]

### SemiConductor Tracker

Semi-Conductor 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、1次元読み出しによる位置情報と収集電荷量を読み出す。バレル部に4層、エンドキャップ部に9層で構成されており、ビームパイプからの距離は299mm~514mmで、 $|\eta| < 2.5$ の範囲をカバーしている。図7にSCTの概観を示す。4088枚のモジュールから構成されている。SCTは1層につき表裏に2枚のモジュールを40mrad傾けて貼り付けることで2次元的な読み出しを可能としている。SCTについては3章にて詳しく述べる。

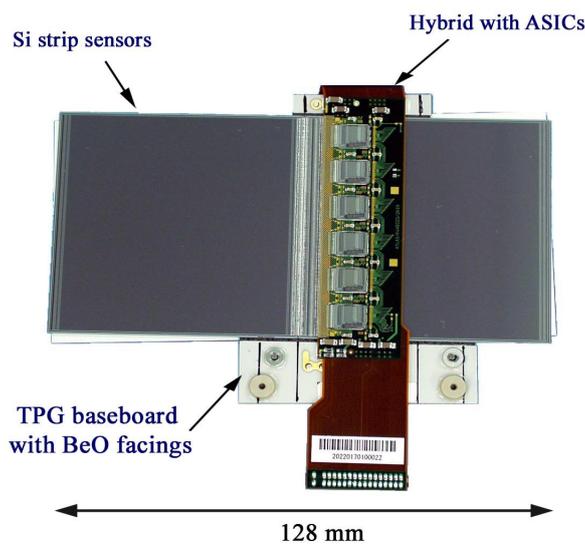


図 7: SCT[9]

## Transition Radiation Tracker

Transition Radiation Tracker (TRT) は SCT の外側に設置されており、荷電粒子が 2 つの誘電体を通過するとき発生する遷移放射を利用する検出器である。ビームと並行に並べられたチューブによって構成されており、このストローチューブは Xe/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> (70/27/3%) の混合ガスが通っている。ビームパイプからの距離は 554mm~1082mm で、 $|\eta| < 2.0$  の範囲をカバーしている。

### 2.1.2 カロリメータ

カロリメータは電磁カロリメータとハドロンカロリメータからなり、電磁シャワーやハドロンシャワーによって落とされたエネルギーを測定している。断面図を図 8 に示す。

#### 電磁カロリメータ

電磁カロリメータはバレル領域 ( $|\eta| < 1.475$ ) に 1 つ、エンドキャップ領域 ( $1.375 < |\eta| < 3.2$ ) に 2 つに分けられる。検出層を放射線耐性に優れている液体アルゴン、吸収層に鉛を用いている。この時、鉛は不感領域をなくするためにアコーディオン構造が採用されている。エネルギー分解能は式 6 で表される。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{10}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 0.7\% \quad (6)$$

#### 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設置されており、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。バレル部は検出層にタイル状のプラスチックシンチレータ、吸収層に鉄を用いている。また、エンドキャップ部は検出層に液体アルゴン、吸収層に銅を用いている。バレル部とエンドキャップ部 ( $|\eta| < 3.2$ ) におけるエネルギー分解能は式 7 で表される。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{50}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 3.0\% \quad (7)$$

フォワード部は検出層に液体アルゴン、吸収層にタングステンをを用いている。また、ここではアコーディオン構造ではなくストロー構造が採用されている。フォワード部のエネルギー分解能は式 8 で表される。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{100}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 10\% \quad (8)$$

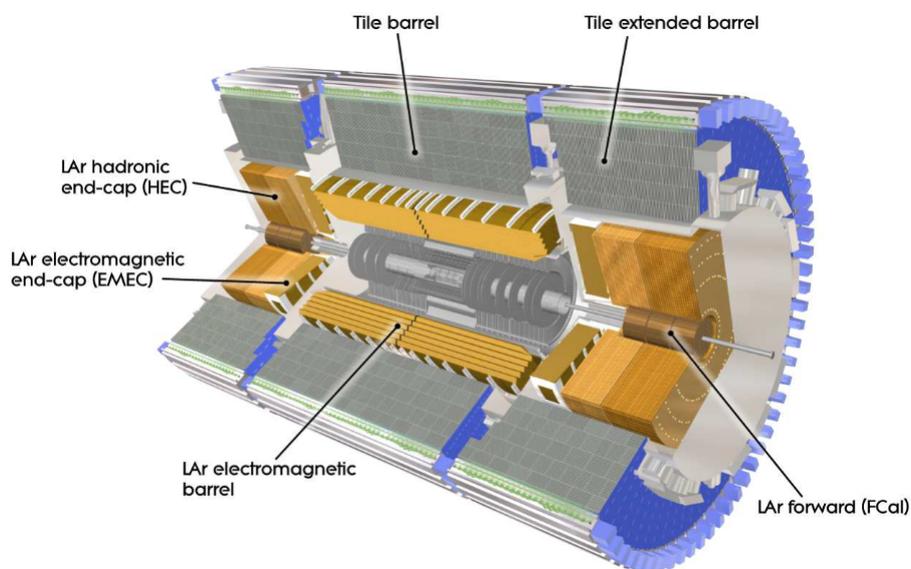


図 8: カロリメータの断面図 [5]

### 2.1.3 ミューオン検出器

ミューオン検出器は ATLAS 検出器の最外層に設置されている検出器である。2つの飛跡再構成に使われるチェンバーと2つのトリガーに使われるチェンバーからなり、 $\mu$  粒子の運動量を、トロイド磁石の磁場における  $\mu$  粒子軌道の偏向から測定する。ミューオン検出器の概観を図 9 に示す。

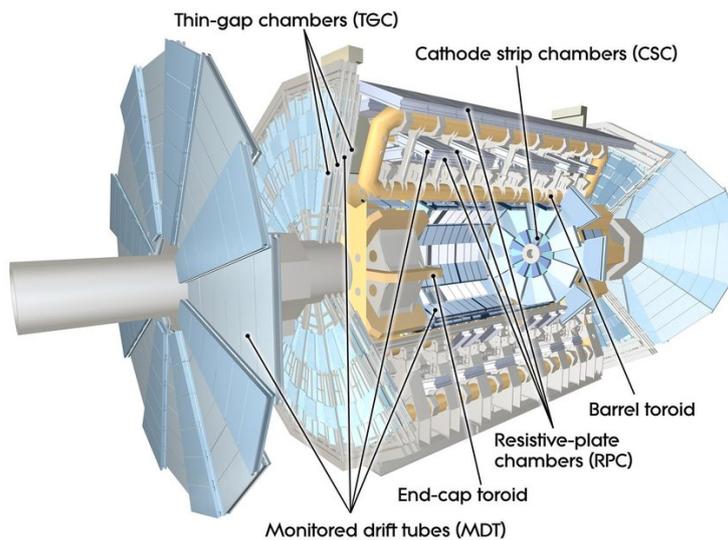


図 9: ミューオン検出器の概観 [5]

## 2.2 飛跡パラメーター

粒子の飛跡は前述の  $\eta$ ,  $\phi$  の他に以下が存在し、図 10 のように定義される。

- $p_T$  : 横運動量  $p_T = p \times \sin \theta$
- $d_0$  : XY 平面における飛跡とビームスポットの最近接距離
- $z_0$  : RZ 平面における飛跡に対応した 1 次衝突点からの距離

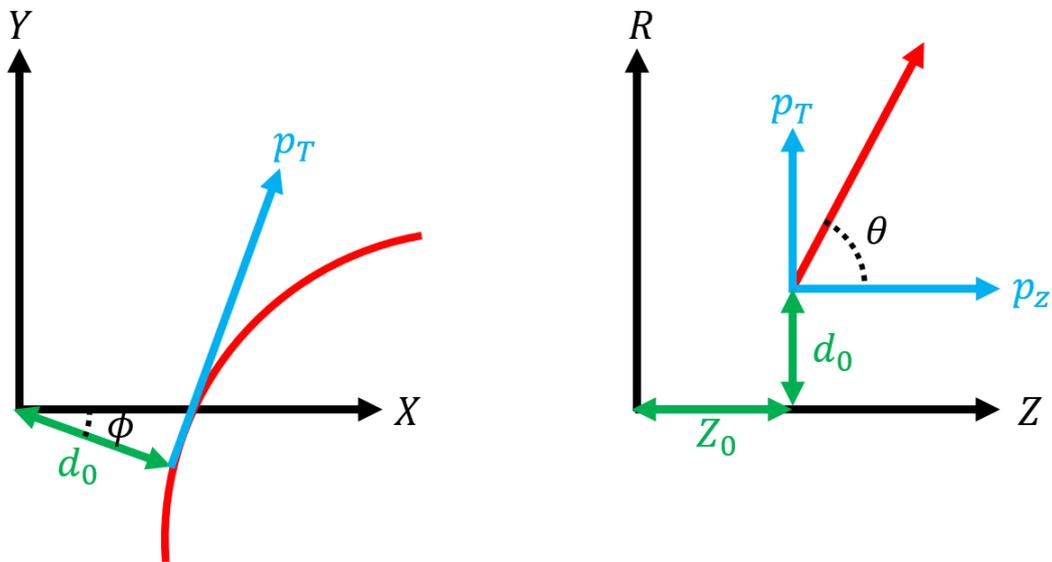


図 10: 飛跡パラメーター

## 2.3 トリガーシステム

ATLAS 実験では、毎秒 4 千万回で起こる全事象を保存することはできないため、保存する事象を選択するトリガーシステムを採用している。図 11 にその概要を示す。トリガーは Level-1 Trigger と High Level Trigger の 2 段階の事象選択を行っている。

Level-1 Trigger (L1) ではカロリメータとミュオン検出器の情報を使ったハードウェアベースでの高速な事象選択を行っており、カロリメータに高いエネルギーを落とした事象、高い横運動量のミュオン飛跡、高い消失横運動量の事象などを識別する。ここでは事象は 100kHz まで落とされ、興味のある事象 (RoI) が定義される。

High Level Trigger (HLT) ではカロリメータとミュオン検出器の情報に加えて、内部飛跡検出器の情報も用いてソフトウェアベースでの精密な事象選択を行っており、L1 からの情報と L1 で RoI と定義された領域の飛跡を再構成して識別する。ここで事象は 1kHz まで落とされ、保存される。

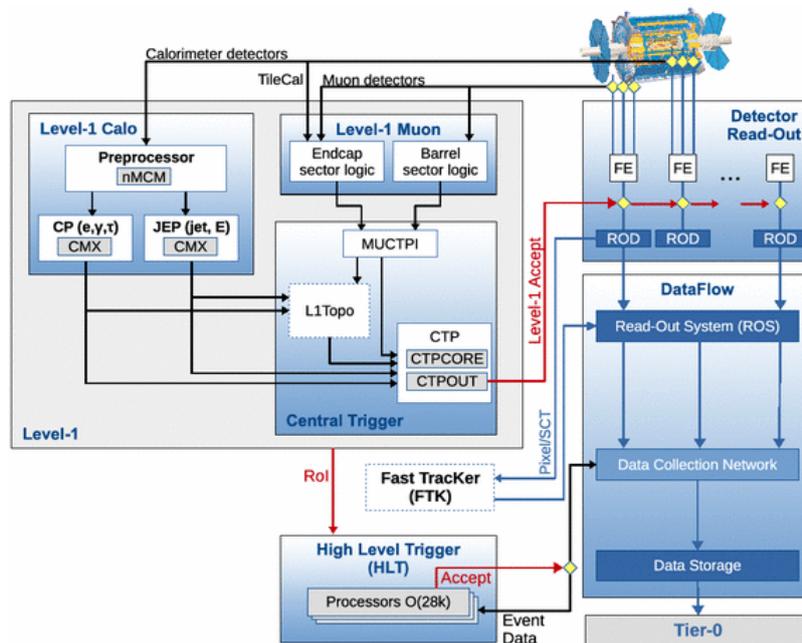


図 11: トリガーシステム [10]

### 3 SemiConductor Tracker (SCT)

前章において ATLAS 検出器および ATLAS 実験の全体について述べた。この章では本論文において特に重要となる SemiConductor Tracker(SCT) について詳しく述べる。また、SCT グループで行われている放射線損傷の対策及び本論文の主題についても述べる。

#### 3.1 動作原理

##### 3.1.1 半導体

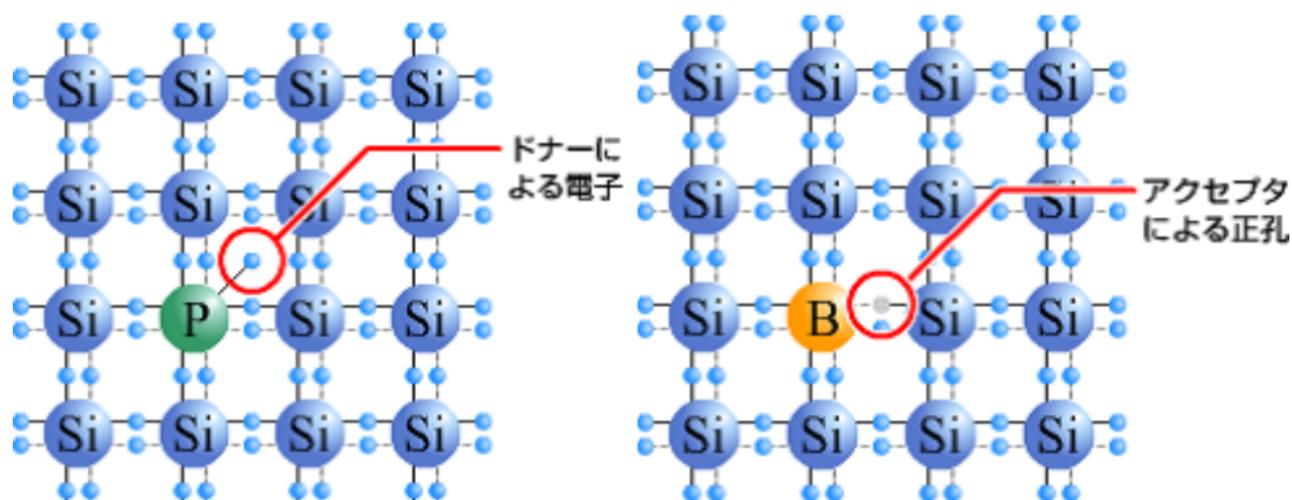


図 12: n 型半導体 (左) と p 型半導体 (右)[11]

半導体とは、電気を通しやすい導体と通しにくい絶縁体の中間の性質を持った物質であり、Si(シリコン)やGe(ゲルマニウム)からなる。半導体は不純物を含まない「真性半導体」と不純物を含む「不純物半導体」に分けられる。不純物半導体には「n 型半導体」と「p 型半導体」に分けられる。n 型半導体は Si を用いた半導体に 5 価の元素 (リンなど) をわずかに混ぜたものをいう。5 価の元素を加えると、Si の原子と結合する際に電子が 1 つ自由電子となり、電流を流しやすくなる。この時に不純物としてくわえた元素を「ドナー」と呼ぶ。p 型半導体は不純物として 3 価の元素 (ホウ素など) をわずかに混ぜたものをいう。3 価の元素を加えると、Si の原子と結合する際に電子が 1 つ不足し、正孔 (ホール) ができる。正孔はキャリアとして働くため、電流を流しやすくなる。この時に不純物として加えた元素を「アクセプタ」と呼ぶ。

##### 3.1.2 バンド構造

シリコン結晶は多数のエネルギー準位が混在していないためエネルギーバンドを形成する (図 13)。金属、絶縁体、半導体のバンド構造を比較すると図 14 のようになる。電子は高エネルギー準位では存在する確率が低く、低エネルギー準位では存在する確率が高い。この時、存在確率が 50% となるエネルギー準位をフェルミエネルギー  $E_f (= E_c - E_v)$  と呼ぶ。

金属は図 14(A) のようにフェルミエネルギーが価電子帯を含むバンド中にある。そのため、荷電子が自由電子となり電流が流れる。

一方、フェルミエネルギーが禁制帯中にある時はフェルミエネルギーよりも低いエネルギーのバンドは電子で満たされ、高いバンドは空となる。このような状態では電子は自由に動くことができないため絶縁体または半導体となる。この時、禁制帯のエネルギー幅をバンドギャップエネルギー  $E_g$  と呼ぶ。

絶縁体は図 14(B) のようにバンドギャップエネルギーが荷電子の運動エネルギーよりも圧倒的に大きいため電子は容易に伝導帯に移動することができず、電流は流れない。

半導体は図 14(C) のようにバンドギャップエネルギーが絶縁体よりも小さく、電子が伝導帯により小さいエネルギーでも移動することができ、ある程度の電流が流れる。

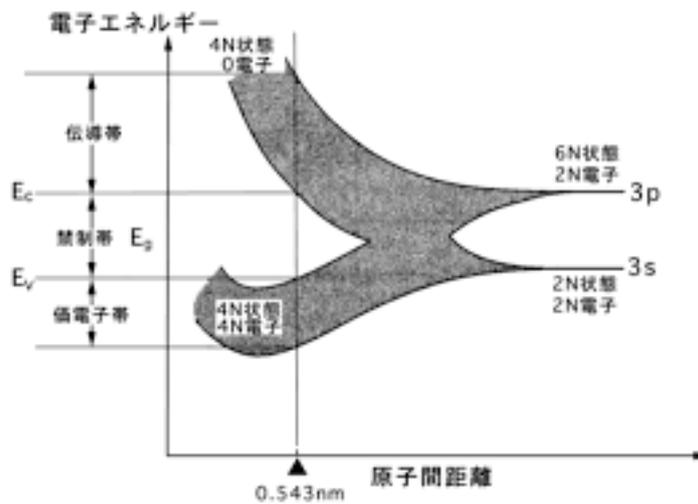


図 13: シリコン原子のバンド構造 [12]

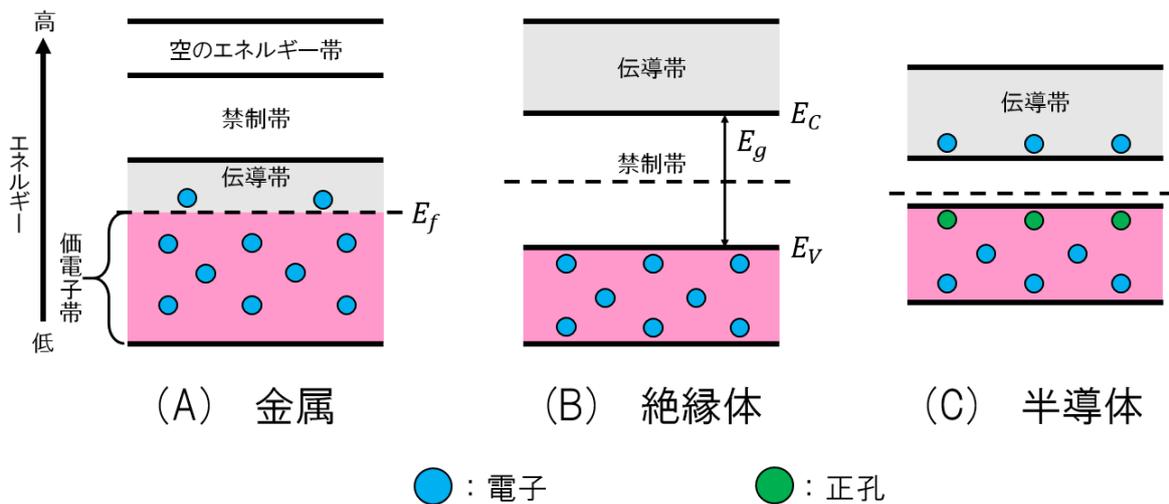


図 14: 金属、絶縁体、半導体のバンドギャップのイメージ

### 3.1.3 pn 接合

n 型半導体と p 型半導体を接合すると (pn 接合)、電子と正孔の濃度勾配が発生する。これにより、n 型半導体の自由電子は p 型半導体に向かって移動し、p 型半導体の正孔は n 型半導体に向かって移動する (図 15(1))。この時の自由電子と正孔の移動を拡散と呼ぶ。自由電子と正孔は互いに結びつき打ち消し合うため、接合部に自由電子も正孔も存在しない空乏層と呼ばれる領域が発生する。空乏層内において、n 型半導体のドナーは正の電荷を、p 型半導体のアクセプタは負の電荷を、それぞれイオン化することで帯電する。それにより、空乏層には内蔵電場と呼ばれる電場 (図 15(2))、及び内蔵電位と呼ばれる電位差 (図 15(3)) が発生する。

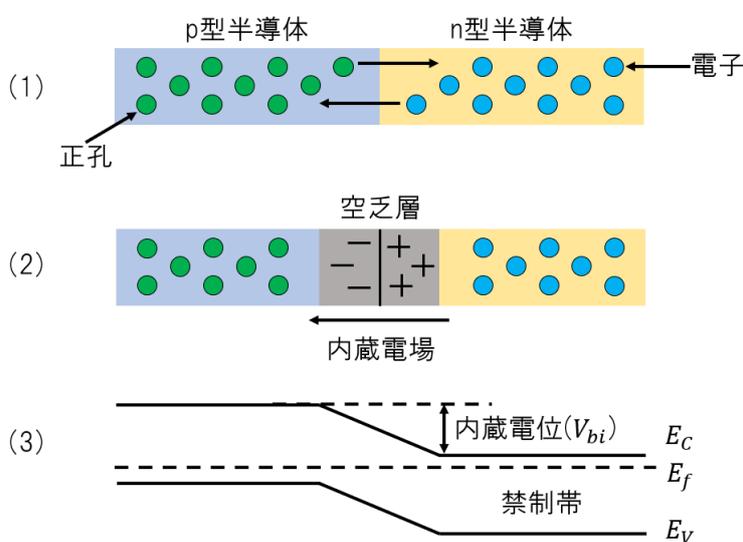


図 15: pn 接合による拡散と空乏層

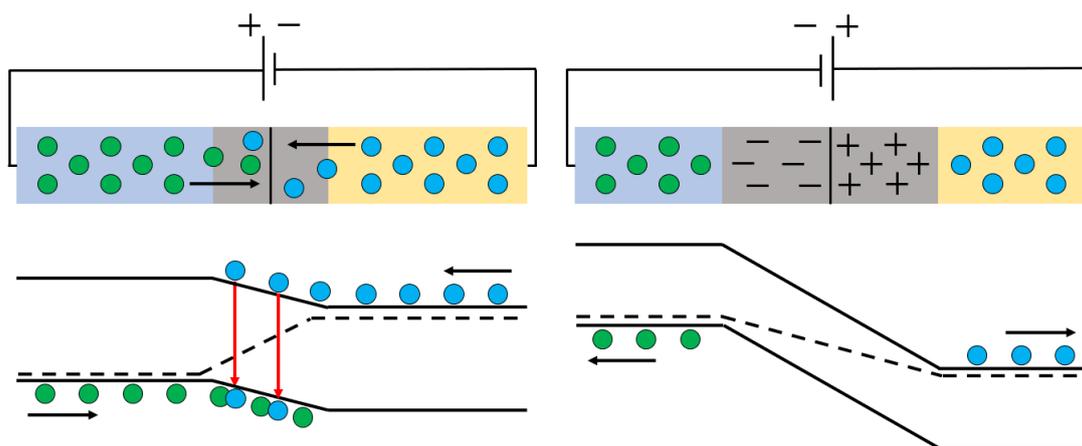


図 16: 順バイアス電圧と逆バイアス電圧

p 型に正、n 型に負の電圧 (順バイアス電圧) を印加すると、p 型から n 型に正孔が、n 型から p 型に電子がそれぞれ拡散するため、電流が流れる。一方、p 型に負、n 型に正の電圧 (逆バイアス

電圧) を印加すると、空乏層内の電界はより強められ正孔と電子の拡散はさらに阻止され電流は流れない。(図 16)

### 3.1.4 p-in-n シリコンセンサー

SCT は n 型半導体のバルク部に酸化膜を挟んで p 型半導体が埋め込まれている p-in-n 構造をしている。逆バイアス電圧を印加することでバルク部に空乏層が広がり、そこに荷電粒子が通過すると電子と正孔のペアが生成される。生成された電子と正孔のペアが逆バイアス電圧による電場に従ってドリフトし、インプラント電極に電荷を生じされる。これを信号として電極から読み出す。

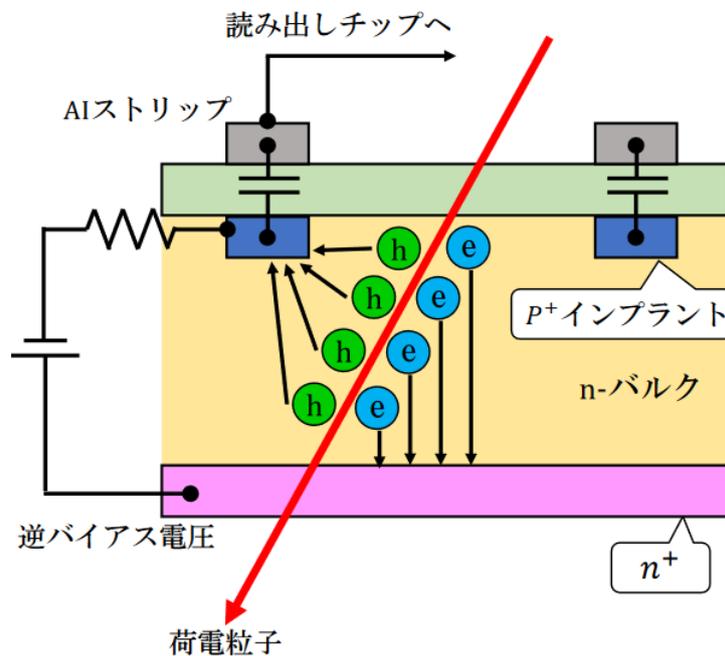


図 17: p-in-n 型センサー

## 3.2 放射線損傷

### 3.2.1 漏れ電流

理想的には、空乏層には電荷が存在しないため電流が流れない。しかし、実際には熱的揺らぎによって電子・正孔対が生成され、逆バイアス電圧を印加したとしても微小な電流が流れる。これを漏れ電流と呼ぶ。漏れ電流はセンサーのノイズの原因となるため、小さいことが望ましい。漏れ電流は式 9 によって表され、ある温度における漏れ電流を測定することによって任意の温度における漏れ電流を計算することができる。

$$I(T) = I(T_{sensor}) \left( \frac{T}{T_{sensor}} \right)^2 \exp\left( -\frac{E_{gen}}{2k_B} \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{sensor}} \right] \right) \quad (9)$$

この時、 $I$  は漏れ電流、 $T$  は任意のセンサーの温度、 $T_{sensor}$  は測定時のセンサーの温度、 $E_{gen}$  はエネルギーギャップ相当の係数、 $k_B$  はボルツマン定数となっている。漏れ電流は式 10 のように

温度に依存するため、決まった温度における漏れ電流を測定することで係数  $E_g$  を求めることができる。

$$I(T) = (T)^2 \exp\left(-\frac{E_{gen}}{2k_B T}\right) \quad (10)$$

### 3.2.2 バルク損傷

漏れ電流の主要な発生原因としてバルク損傷がある。シリコンセンサーに放射線が入射すると、電子を励起、反跳したり、シリコン原子と衝突を繰り返し、エネルギーを失っていく。その時、シリコン原子が弾かれることで生じた空孔と、弾かれた原子が他の結晶格子間に移動してできた格子間原子の対をフレンケル欠陥と呼ぶ。弾かれた原子が結晶表面に移動し、空孔のみが残った欠陥をショットキー欠陥と呼ぶ。これら2つの欠陥の概略図を図18に示す。これらの格子欠陥やそれらが集合して3次元的に連続して配置されたボイドと呼ばれる空隙が放射線による主要なバルク損傷となる。格子欠陥やボイドは、周辺に対して相対的に正の電荷を帯びているため、シリコンバルク中でp型不純物として振る舞う。

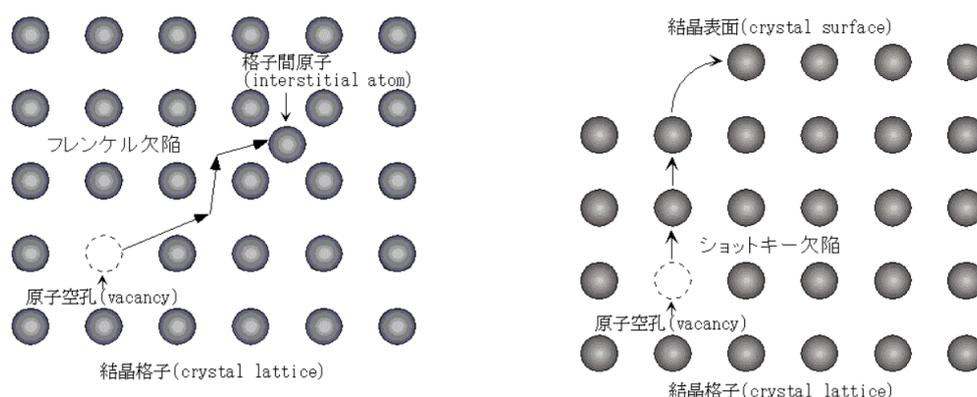


図 18: フレンケル欠陥とショットキー欠陥 [13]

### 3.2.3 アニーリングと逆アニーリング

放射線損傷による格子欠陥は熱振動によって移動する。この時、格子欠陥は消滅する場合もあるが、格子欠陥同士が結合し、さらに大きな格子欠陥を生み出す場合もある。熱振動によりある時点まで有効不純物濃度が減少する現象をアニーリング、そこから有効不純物濃度が上昇する現象を逆アニーリングと呼ぶ。逆アニーリングが起こるまでの時間は温度に依存しており、アレニウスの式 (式 11) で求めることができる。

$$k = A \exp\left(-\frac{E_\alpha}{k_B T}\right) \quad (11)$$

ここで、 $k$  は反応速度の係数、 $A$  は衝突回数に起因する頻度因子、 $E_\alpha$  は活性化エネルギーで反応を起こすために必要なエネルギー、 $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  は絶対温度。ATLAS 実験では、運転中に検出器を冷却することでアニーリングが進むことを抑制している。

### 3.2.4 基礎特性の変化

p-in-n 構造のセンサーが放射線損傷を受けると、n 型のバルク部に p 型不純物としてふるまう格子欠陥が生じる。これが蓄積し p 型不純物が増加するとバルク部が p 型になる型反転が起こる。n 型センサーの典型的な型反転の様子を図 19 に示す。型反転を起こしたセンサーは p-n 接合面がインプラント電極とバルク部境界面からバルク部と裏面電極境界面に変化する。すると、空乏層がインプラント電極にまで広がっていないと信号の読み出しができないこと、及び p-n 接合面から広がっていくことから、全空乏化しなければセンサーとして機能しなくなる。SCT の逆バイアス電圧の上限は 500V で設計されているため、全空乏電圧が 500V を超えた場合センサーとして機能しなくなる。

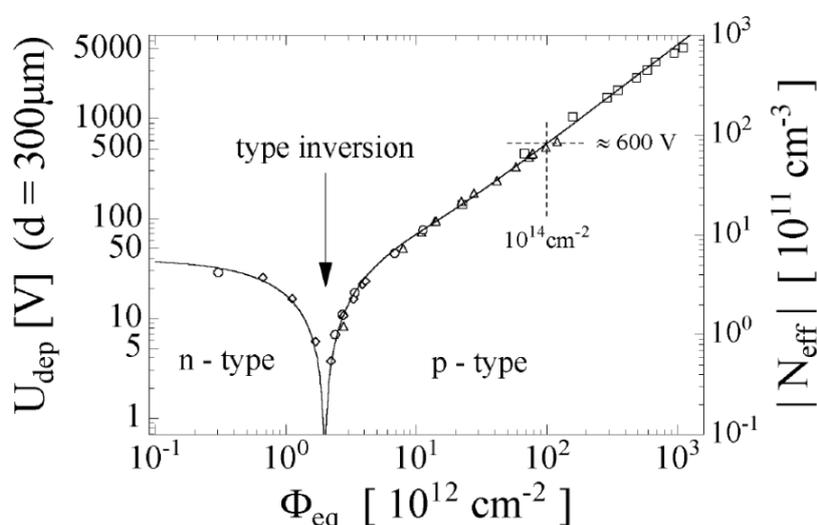


図 19: シリコンセンサーの型反転 [14]

### 3.3 現状と Run3 に向けた対策

Run2 において SCT は安定した運転を実現し、ヒット検出効率は 99% 以上を維持した。しかし、放射線損傷の影響は徐々に大きくなり、空乏化電圧を 150V から 250V に上げたセンサーもあった。SCT も含め、現在の内部飛跡検出器は Run3 終了までの運転となっており、そのように設計されている。よって、Run2 における放射線損傷による影響は僅かだったが、Run3 の運用においてはより重要となる可能性がある。SCT グループでは対策として放射線損傷のモデル化と予想を行っている。その結果を図 20 に示す。上から、 $\eta = 1$  に位置する SCT バレル部最内層 (Barrel3) における、センサー温度、全空乏化電圧、漏れ電流の実測とモデルとなっている。ただし、ここにおける 2021-2023 の Run3 における予想は現在予定されている Run3 の運転状況とは大きく違っている (輝度など)。現在予定されている Run3 の運転状況におけるこのモデルの予想は全空乏化電圧、漏れ電流共に Run2 と同様の運転を行えば、上限を超えないことが分かっている。

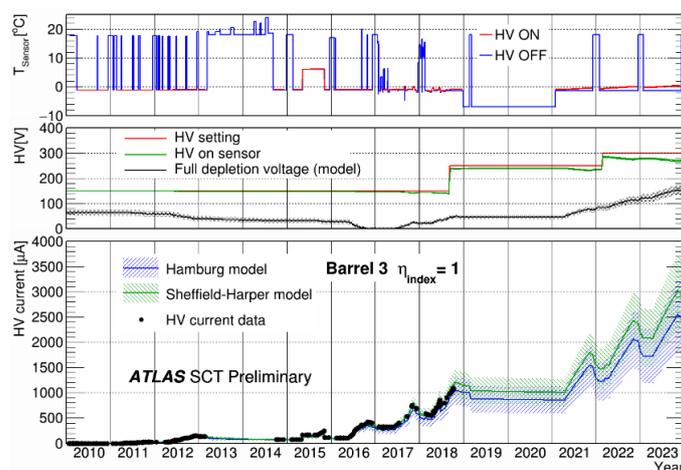


図 20: 放射線損傷の実測とモデル [15]

### 3.4 本研究の主題

前述のように SCT は Run3 の終了まで正常な運転が可能であると予想されている。しかし、Run3 終盤において SCT の 1 部の運用が難しくなる可能性がある。

1 つ目はバレル部最内層 (Barrel3) である (図 21)。Run3 終盤において SCT の冷却器の 1 部が使えなくなる可能性があり、その場合、最も放射線の影響が大きい最内層がその影響を受けるからである。

2 つ目はバレル部最外層 (Barrel6) である。最外層は最も放射線の影響が小さくはあるが、すぐ外側にある TRT が低温に耐えることができず冷却温度を下げるできない。よって、TRT との兼ね合い次第では冷却が足らずに運転が難しくなる可能性がある。

そこで本研究では Run3 終盤において以下の 3 種類のセンサーが全て使えないという保守的な状況を想定し、飛跡再構成に対する影響を評価する。

- 最内層
- 最外層
- 最内層 & 最外層

ただし、簡単のためにまず 1 層が使えない場合を評価し、その後 2 層使えない場合について評価する。今回、データは 2018 年にとられたデータの 1 部を用いる。また、それらの影響を最小化するための提案についても議論する。

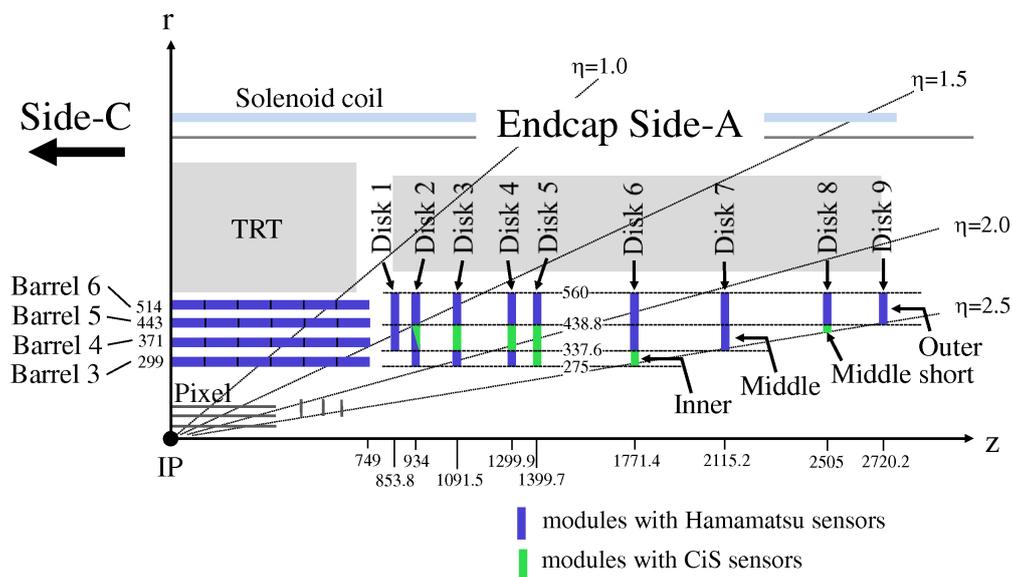


図 21: SCT の  $r$ - $Z$  平面 ( $\eta > 0$  方向) における配置 : バレルの名称は Pixel の 1 層目を Barrel0 とし、順番に SCT の最内層が Barrel3 となっている。[16]

## 4 飛跡再構成に対する影響

### 4.1 $\mu$ 粒子に対する影響

#### 4.1.1 再構成率に対する影響

$\mu$  粒子は内部飛跡検出器とミューオン検出器のそれぞれ独自に作られた飛跡を一致させて再構成している [17]。また、 $\mu$  粒子は事象選択によって高い純度にすることが可能なため、データとシミュレーションの比較が容易である。そのため、まずは  $\mu$  粒子を用いて SCT の 1 部が動作しない場合の影響を評価する。 $\mu$  粒子の再構成に対する影響を  $Z \rightarrow \mu\mu$  事象のデータとシミュレーションを使って評価する。 $\mu$  粒子の事象選択は以下を要求する。

- $p_T > 28\text{GeV}$
- $|\eta| < 2.5$
- トリガー : HLT\_mu26\_ivarmedium [18]

トリガーは L1 において  $p_T > 26\text{GeV}$  と isolation を要求する。また、 $\mu$  粒子の候補は likelihood を用いた ID を使って識別され、今回は Medium の ID を要求する [17]。データは  $Z \rightarrow \mu\mu$  事象であることを保証するためにトリガーの段階において  $\mu$  粒子が 2 本以上いること、2 本の  $\mu$  粒子から得られる不変質量  $m_{\mu\mu}$  が  $70\text{GeV} < m_{\mu\mu} < 110\text{GeV}$  であることを要求している。

$\mu$  粒子の再構成に対する影響を見るためにトラッキングパラメーター分布を通常の場合の場合と比較する。その結果を図 22-23 に示す。

SCT が 1 層が動作しない場合の影響はバレル領域 ( $|\eta| < 1.0$ ) において、データでは最内層が動作しない場合は 2.6%、最外層が動作しない場合は 2.8%、シミュレーションでは最内層が動作しない場合は 1.7%、最外層が動作しない場合も 1.7% であった。これらの影響はシリコンのヒット数との関係が大きいと考えられる。データとシミュレーションにおけるシリコンのヒット数の分布を図 24 に示す。Run3 において、飛跡の再構成はシリコンのヒット数が 8 ヒット以上を要求するため、通常の場合においてヒット数が 8 ヒットか 9 ヒットの  $\mu$  粒子は再構成されない可能性が高い。そういった  $\mu$  粒子の割合はデータでは 2.7%、シミュレーションでは 1.9% であり、これらの値は SCT1 層が動作しない場合の影響と同程度の値であるため、影響を説明していると言える。最内層が使えない場合において  $|\eta| = 1.2$  付近に再構成率分布において見られる構造は、最内層を通過してエンドキャップ領域に行くような飛跡の再構成率がより悪くなることによるものである。また、 $p_T$  に依存性がないことが確認できる。

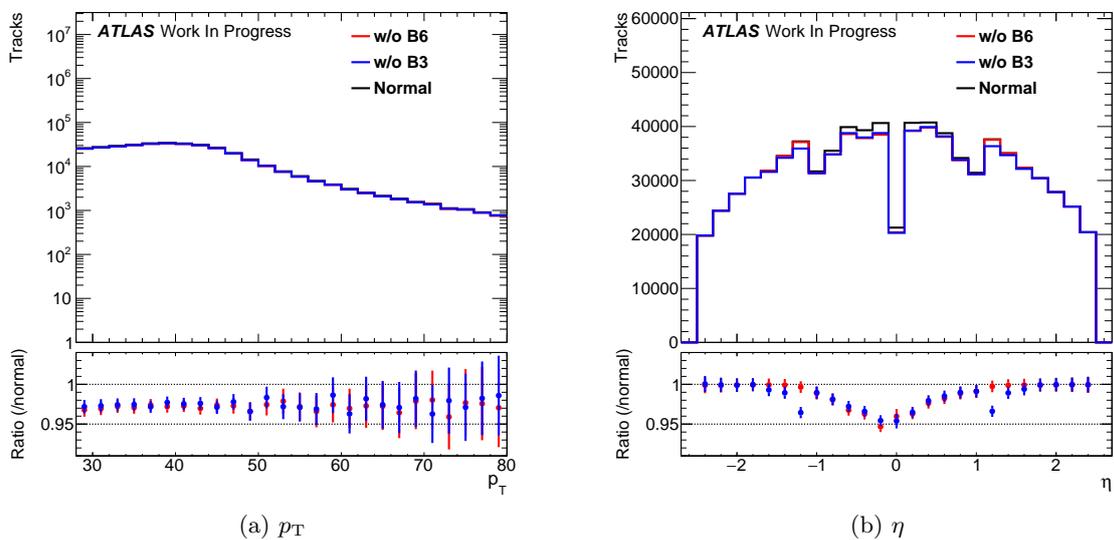


図 22: データにおける  $\mu$  粒子の再構成に対する影響 : 図 22a バレル領域の飛跡の  $p_T$  分布, 図 22b  $\eta$  分布 : 下図は通常の場合の飛跡に対する SCT が動作しない場合の再構成率

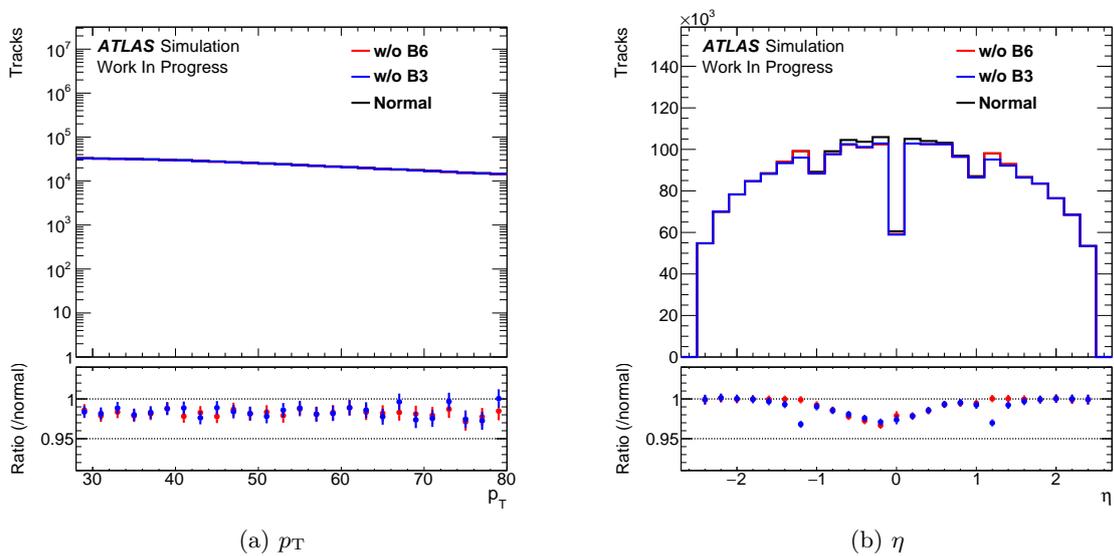


図 23: シミュレーションにおける  $\mu$  粒子の再構成に対する影響 : 図 23a  $p_T$ , 図 23b  $\eta$

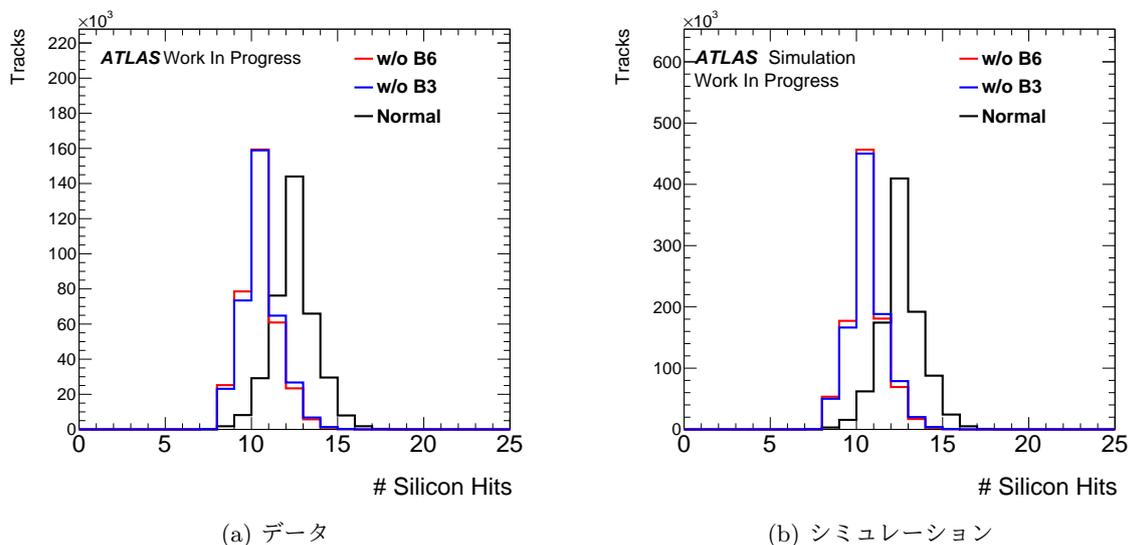


図 24:  $\mu$  粒子の飛跡のシリコンのヒット数：バレル領域の  $\mu$  粒子のみ

#### 4.1.2 分解能に対する影響

##### 飛跡パラメータに対する影響

$\mu$  粒子の分解能に対する影響を見るためにシミュレーションを用いて評価する。シミュレーションにおいて、乱数でふられた真のトラックを Truth トラック、再構成されたトラックをオフライントラックと呼ぶ。Truth トラックとオフライントラックのパラメータの差の分布を図 25 に示す。また、バルク領域をガウスフィットして得られた標準偏差を 3 にまとめる。

$p_T$  の分解能に対する影響は最内層が動作しない場合は 0.9%、最外層が動作しない場合は 0.7% であった。 $p_T$  の分解能はアーム長に大きく依存するため、ATLAS 検出器の最外層に位置するミュオン検出器の影響が大きい。また、 $\eta$ ,  $\phi$  に対する影響は最内層が動作しない場合は 1.7%, 1.9%、最外層が動作しない場合は 8.3%, 0.3% であった。

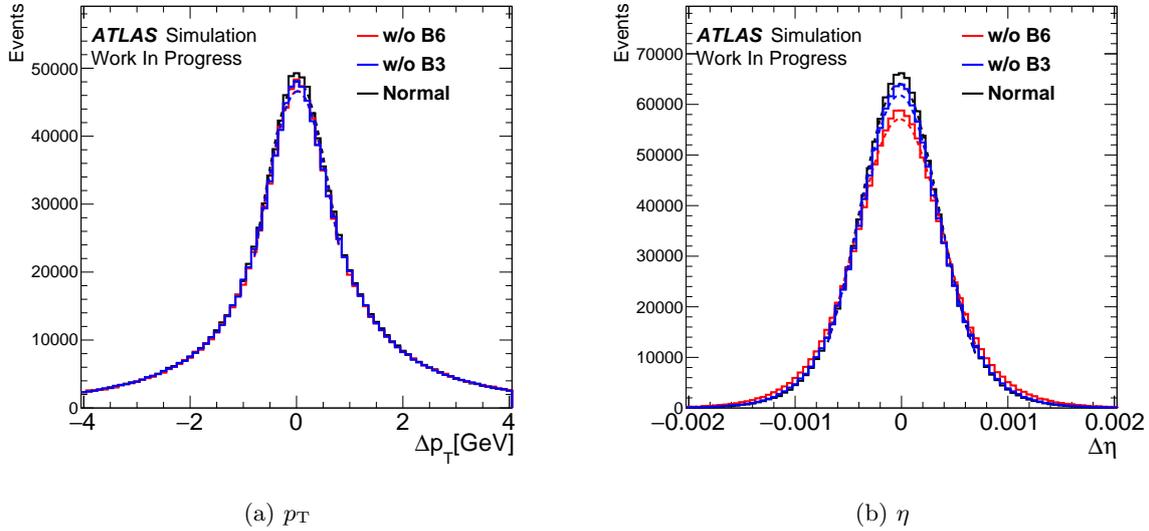


図 25:  $\mu$  粒子の分解能に対する影響。Truth トラック：バレル領域内の Z ボソンが崩壊した  $\mu$  粒子。オフライントラック：Truth トラックとの  $\Delta R$ (式 5) が  $\Delta R < 0.01$  となる  $\mu$  粒子

表 3:  $\mu$  粒子の分解能の標準偏差

Standard Deviation	w/o B3	w/o B6	Normal
$p_T$ [GeV]	$0.660 \pm 0.002$	$0.658 \pm 0.002$	$0.654 \pm 0.002$
$\eta[10^{-4}]$	$3.833 \pm 0.004$	$4.085 \pm 0.005$	$3.770 \pm 0.004$
$\phi [10^{-5}]$	$8.43 \pm 0.01$	$8.30 \pm 0.01$	$8.28 \pm 0.01$

### 不変質量に対する影響

2本の  $\mu$  粒子で組んだ不変質量を評価する。Z が崩壊する 2本の Truth トラックのどちらにもマッチするオフライントラックがあった場合に、その 2本から算出した不変質量の分布を図 26a に示す。また、Truth トラックから算出した不変質量とオフライントラックから算出した不変質量の差の分布を図 26b に示す。分解能の分布を  $|\Delta m_{\mu\mu}| < 2.2\text{GeV}$  のバルク領域でガウスフィットして得られた標準偏差を表 4 にまとめる。ここから分解能に対する影響は最内層が動作しない場合は  $1.2 \pm 0.5\%$ 、最外層が動作しない場合は  $1.3 \pm 0.5\%$  の悪化となる。

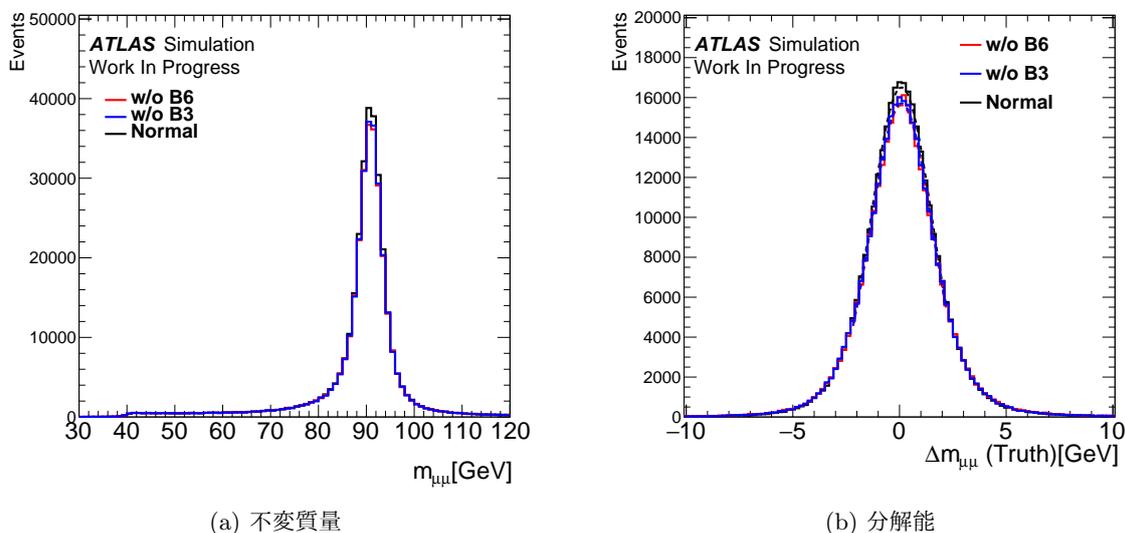


図 26: 2 本の  $\mu$  粒子の不変質量  $m_{\mu\mu}$  : 図 26a  $p_T > 20\text{GeV}$  かつ  $|\eta| < 1.0$  の  $\mu$  粒子 2 本から組んだ不変質量分布。91GeV にピークが立っているため Z 粒子を再構成できていることが確認できる。図 26b Truth とオフラインの不変質量の差

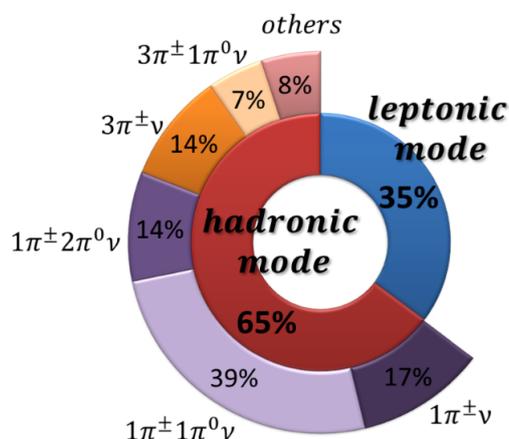
表 4: 不変質量の分解能の標準偏差

	w/o B3	w/o B6	Normal
Standard Deviation	$1.443 \pm 0.005$	$1.442 \pm 0.005$	$1.425 \pm 0.005$

## 4.2 $\tau$ 粒子に対する影響

### 4.2.1 $\tau$ 粒子の再構成

今節ではより複雑な事象への影響を確認するために  $\tau$  粒子の再構成に対する影響を評価する。 $\tau$  粒子は W ボソンを介してハドロンやレプトンに崩壊する。この時、 $\nu_\tau$  も付随する。 $\tau$  粒子の崩壊モードと崩壊分岐比を図 27 に示す。ハドロンの崩壊する  $\tau$  粒子 ( $\tau_{had}$ ) はハドロンの束として検出される。その特徴は QCD 由来のジェットと比べてコーンが細いこと、その領域内に荷電粒子が 1 本 (1prong) か 3 本 (3prong) 存在することである。この特徴を利用して  $\tau_{had}$  は同定される [19]。この時、QCD 由来のジェットが  $\tau_{had}$  として再構成されたフェイク事象と識別するために BDT (Boosted Decision Tree) という多変量解析手法が用いられている [20]。これらのことから  $\tau_{had}$  の再構成には飛跡の情報が重要となる。特に、3prong の  $\tau_{had}$  は 3 本の荷電粒子の内 1 本が再構成されないだけで  $\tau_{had}$  と見なされなくなってしまうため、SCT の 1 部が動作しないことによる影響は大きいと考えられる。

図 27:  $\tau$  の崩壊モードと崩壊分岐比 [1]

#### 4.2.2 $\tau$ 粒子に対する影響

$\tau_{had}$  の再構成に対する影響を確認するために、 $\tau$  粒子が含まれていると判断されたデータを用いる。まず、 $\tau$  粒子が含まれていると判断するためのトリガー段階での事象選択として以下を要求する。

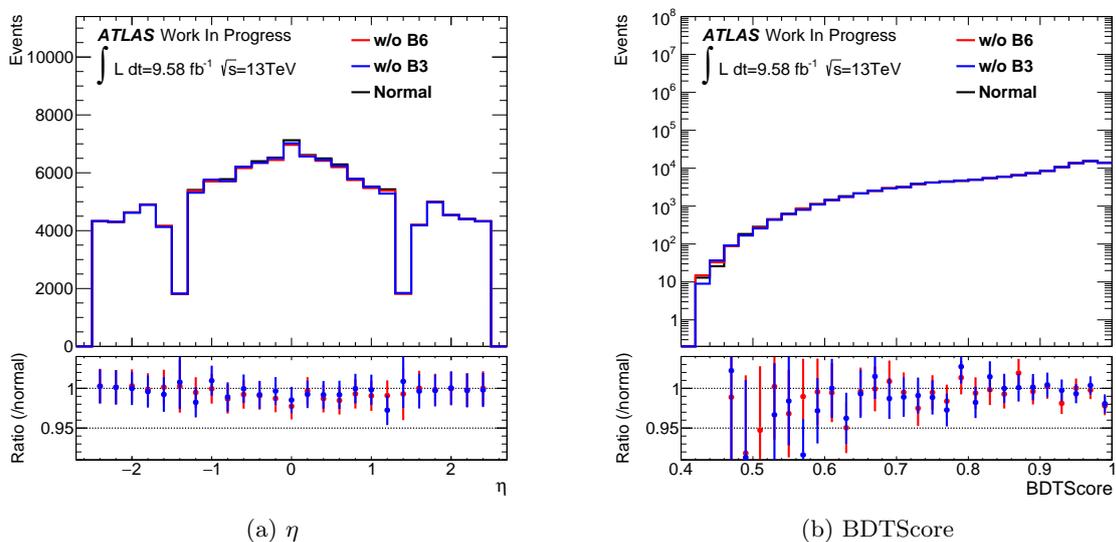
- $p_T > 27\text{GeV}$
- $1 \leq \text{prong 数} \leq 4$
- $\text{BDTScore} > 0.1$

そして、オフラインでの事象選択は以下を要求する。

- $p_T > 25\text{GeV}$
- $|\eta| < 2.5$  (ただし  $1.37 < |\eta| < 1.52$  は除く)
- 電荷 =  $\pm 1$
- prong 数 = 1 or 3

また、 $\tau_{had}$  の同定では前述の BDT においてカットが緩いほうから Loose, Medium, Tight の 3 つの点を設けており、今回は Medium のカットを要求する。これらの事象選択を行い、 $\tau$  粒子の純度を高めて SCT が 1 層動作しない場合の影響を確認したものを図 28 に示す。

通常の場合に対する再構成率は誤差の範囲内で 100% を示している。つまり、SCT が 1 層動作しない場合の影響はほとんどないことが確認できる。しかし、事象選択によって純度を高めたとしても QCD 由来のジェットなどが多く含まれていると考えられるため、 $\tau$  の再構成に影響がないと判断することはできない。

図 28: データにおける  $\tau$  粒子の再構成に対する影響

純粋な  $\tau_{had}$  への影響を見るためにシミュレーションを使い Truth とマッチングを取って評価する。ベクターボソン融合過程 (VBF) で生成されたヒッグス粒子が 2 つの  $\tau_{had}$  に崩壊する過程のシミュレーションを用いる。データと同じオフラインの事象選択をしたうえで、 $\tau$  粒子の純度を 100% に近づけるために Truth と  $\Delta R < 0.01$  でマッチングのとれた  $\tau_{had}$  を比較する。その結果を図 29 に示す。 $p_T, \eta$  分布は横軸をマッチした Truth の  $\tau$  のパラメータを表している。

SCT が 1 層動作しない場合の影響は最内層が動作しない場合、最外層が動作しない場合共に、 $|\eta| < 0.8$  において 2.1% であった。仮に、 $\tau_{had}$  が崩壊したハドロン再構成率がシミュレーションにおける  $\mu$  粒子と同じであるとすると、 $\tau_{had}$  の再構成率に対する影響は 2.5% であると計算できる。 $\tau_{had}$  の再構成には QCD ジェットの背景事象があるといったことから、 $\mu$  粒子に対する影響よりも小さい可能性は低いと考えられるため、これを精査していく必要がある。

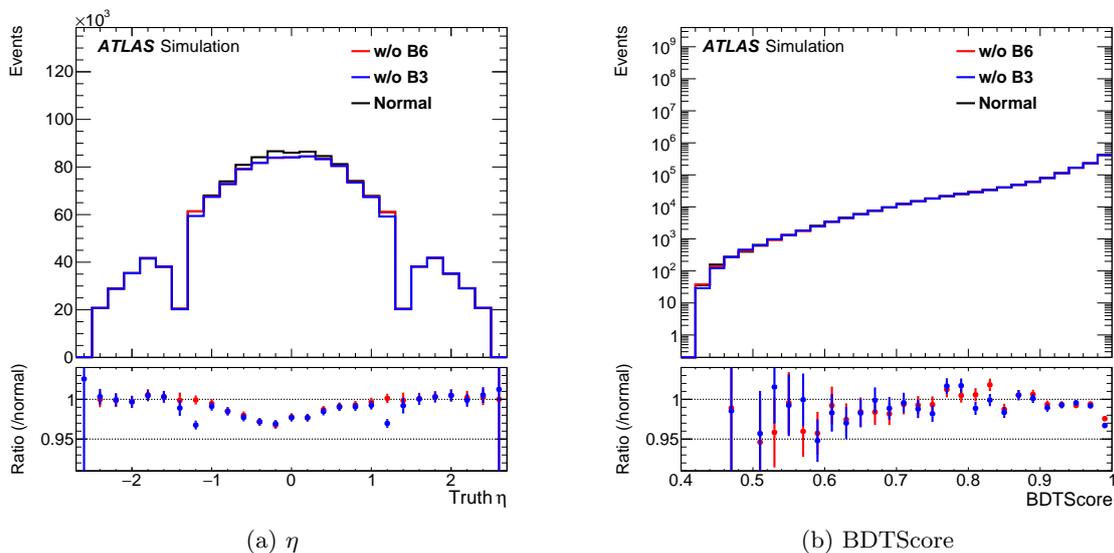


図 29: シミュレーションにおける  $\tau$  粒子の再構成に対する影響

#### 4.2.3 $\tau$ 粒子への影響の精査

SCT1 層が動作しない場合の影響が  $\tau$  粒子の再構成に対して大きな影響を与えない原因を理解するために、まず  $\tau_{had}$  の再構成に使った飛跡 ( $\tau$ Track) に対する影響を確認する。先ほどの図 29b の  $\tau_{had}$  の再構成に使った  $\tau$ Track の分布を図 30 に示す。

$\tau$ Track の再構成率は  $\tau_{had}$  の再構成率に対して明らかに悪いことが確認できる。つまり、3prong の  $\tau_{had}$  の再構成率が特に悪くなっていることが分かる。

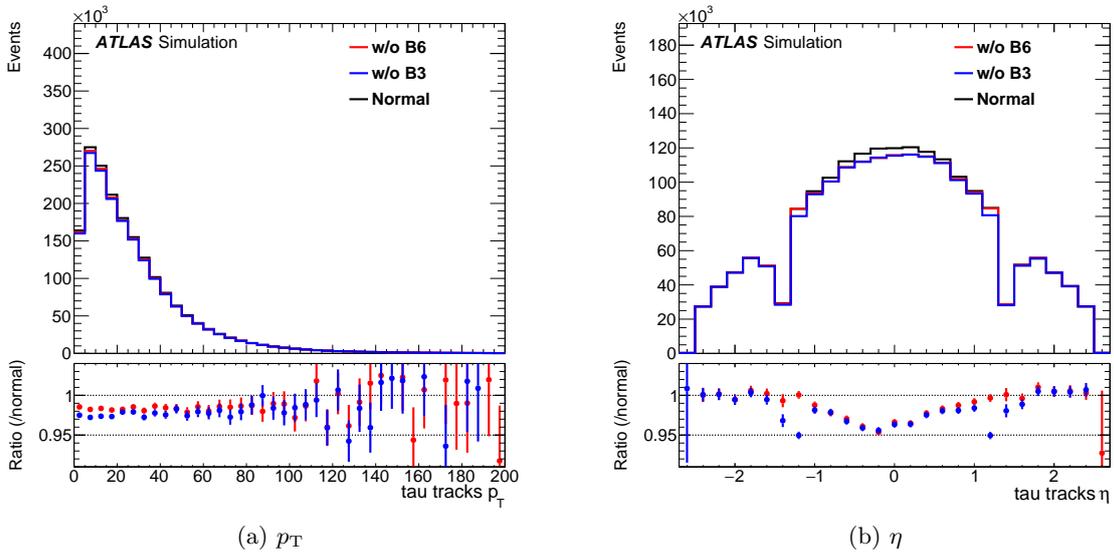


図 30: シミュレーションにおける  $\tau$ Track の再構成に対する影響：図 30a  $|\eta| < 1.0$  の飛跡の  $p_T$  分布, 図 30b  $\eta$  分布：下図は通常の状態の飛跡に対する再構成率

事象選択を  $p_T, \eta$  のみ要求し、Truth とマッチングを取って prong 数を比較する。Truth の prong 数を横軸、SCT1 層が動作しない場合と通常の場合におけるオフラインの prong 数を縦軸に示した図を図 30 に示す。

まず、Truth の prong 数が 1prong の  $\tau$  粒子に注目する。 $\tau$ Track の再構成率を計算するにあたって、1prong として再構成された  $\tau_{had}$  の再構成率は通常の場合で 2prong として再構成されていた  $\tau_{had}$  がその内の 1 本が再構成されなくなり 1prong として再構成された増加量も含んでいるため、 $\tau$ Track の再構成率からずれると考えられる。よって、0prong として再構成された  $\tau_{had}$  の増加量を再構成することができなかった 1prong の  $\tau_{had}$  の数であるとみなして  $\tau$ Track の再構成に対する影響を計算すると、最内層が動作しない場合は 1.7%、最外層が動作しない場合も 1.7%再構成率が下がる。次に、Truth の prong 数が 3prong に注目する。1prong の時と同じように 2prong 以下として再構成された  $\tau_{had}$  の増加量を再構成することができなかった 3prong の  $\tau_{had}$  の数であるとみなし、1 本当たりの  $\tau$ Track の再構成に対する影響を計算すると、最内層が動作しない場合 2.2%、最外層が動作しない場合 1.9%再構成率が下がる。1prong から計算した  $\tau_{had}$  の再構成に対する影響はシミュレーションにおける  $\mu$  粒子に対する影響と同程度の影響と言える。3prong から計算した影響は飛跡が密集している分再構成が複雑になるため、1prong の時に比べて影響が大きい。これらのことから  $\tau$ Track の再構成に対する影響は  $\mu$  粒子と同程度である。また、通常の場合において、2prong や 4prong といった形で再構成されていた  $\tau_{had}$  が 1prong や 3prong として再構成されることにより  $\tau_{had}$  と判断されるようになったことによる再構成率の回復もある。この効果はデータにおいて影響がなかったことを説明することができる。 $\tau$  に対する影響が小さかっただけでなく、背景事象数もまたこの効果で減少することがなかったからであると考えられる。

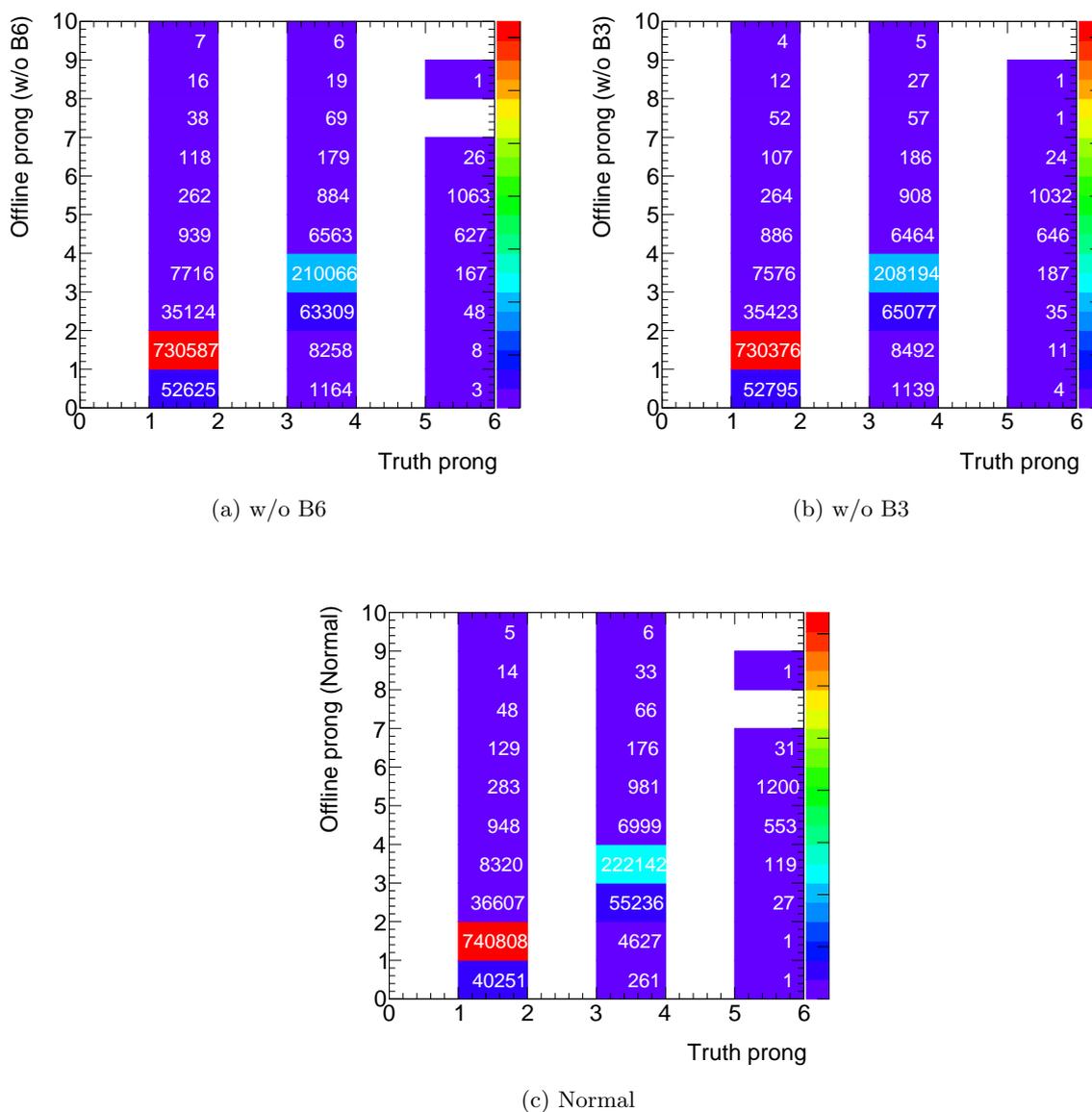


図 30: シミュレーションにおける  $\tau_{had}$  の prong 数の比較: 図 31a 最外層が動作しない場合, 図 31b 最内層が動作しない場合, 図 30c 通常の場合:  $\tau_{Track}$  が全てバレル領域 ( $|\eta| < 1.0$ ) である場合を見たいため、 $|\eta| < 0.8$  と再構成された  $\tau_{had}$  のみを用いている。(  $\tau_{had}$  のジェットのコーンの半径は  $\Delta R < 0.2$  )

### 4.3 ジェット内の飛跡に対する影響

飛跡への影響を見るためにジェット内の飛跡に対する影響を評価する。ここでは純粋な飛跡に対する影響を評価するために、カロリメータやミュオン検出器の情報を用いずに、内部飛跡検出器の情報のみを用いて再構成した飛跡を使用する。データ、シミュレーション共に事象選択は以下を要求する。

- $p_T > 0.5 \text{ GeV}$
- $|\eta| < 2.5$
- シリコン (IBL+Pixel+SCT) のヒット数  $\geq 8$
- shared module  $\leq 1$
- シリコンのホール数  $\leq 2$
- Pixel のホール数  $\leq 1$

shared module とは同じヒットを 2 本以上の飛跡再構成に使用されたヒットのあるモジュールである。ホールとは検出器が検出できなかったヒットであり、そこにヒットがあるとして飛跡再構成に使用した数をホール数という。

用いるサンプルはデータ、シミュレーション共に  $\mu$  粒子に対する影響を評価するために用いたサンプルを使用する。その結果を図 31, 32 に示す。

データにおいて、最内層 (Barrel3) が動作しない場合の影響はバレル領域 ( $|\eta| < 1.0$ ) では 16.2%、バレル領域とエンドキャップ領域の境目領域 ( $1.0 < |\eta| < 1.5$ ) では 24.6% であり、最外層 (Barrel6) の場合はバレル領域において 13.4% であった。シミュレーションにおいては、最内層の場合の影響はバレル領域では 8.7%、境目領域では 12.5% であり、最外層の場合はバレル領域において 6.9% であった。

これらのデータとシミュレーションの違いは  $\mu$  粒子の時と同様に、飛跡の再構成に使用したシリコンのヒット数の違いによるものだと考えられる。シミュレーションにおいて、シリコンのヒット数を正確にデータと同じふるまいを再現することは難しいからである。データとシミュレーションにおけるシリコンのヒット数の分布を図 33 に示す。これらの図の通常の場合におけるシリコンのヒット数が 8-10 の分布に注目する。この範囲における飛跡の割合がデータにおいてシミュレーションよりも明らかに大きいことが分かる。これらの飛跡は SCT1 層が動作しない場合に再構成されない可能性が高い飛跡であるためデータとシミュレーションで影響に違いが生じた。

$p_T$  における構造の違いも同様の理由である。図 34 に通常の運転における、バレル領域の飛跡の  $p_T$  とシリコンのヒット数の関係を示す。ここから  $p_T$  が高い領域においてシリコンのヒット数が少ない飛跡、特にヒット数=8, 9 の飛跡の割合が大きいことが分かる。これらの飛跡は SCT1 層が使えなくなった場合、ヒット数が 8 未満となり再構成されなくなるため、 $p_T$  が高い飛跡における影響は大きい。

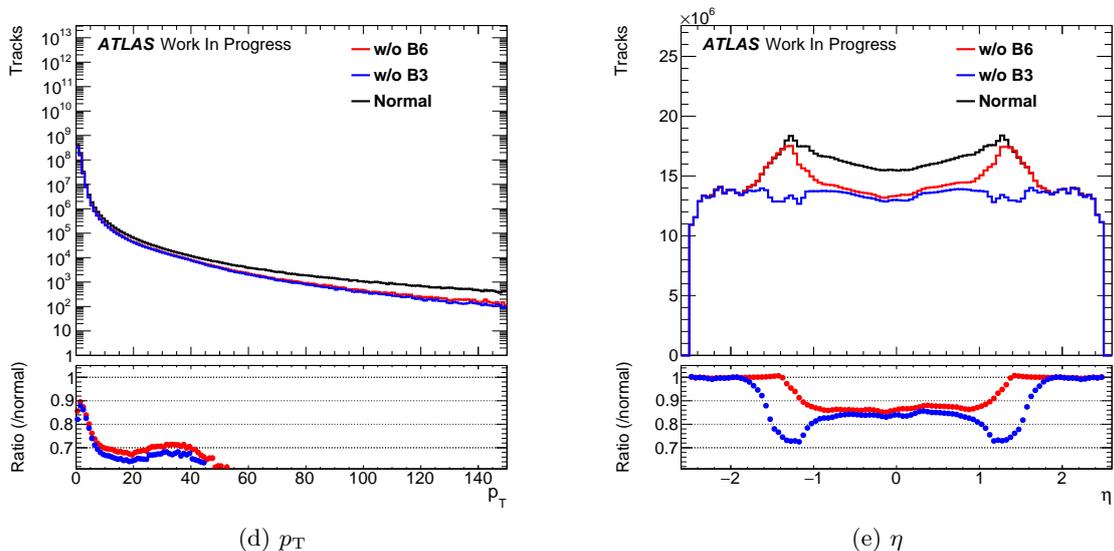


図 31: データにおける飛跡の再構成に対する影響 : 図 31d  $|\eta| < 1.0$  の飛跡の  $p_T$  分布, 図 31e  $\eta$  分布 : 下図は通常の場合の飛跡に対する SCT が動作しない場合の再構成率

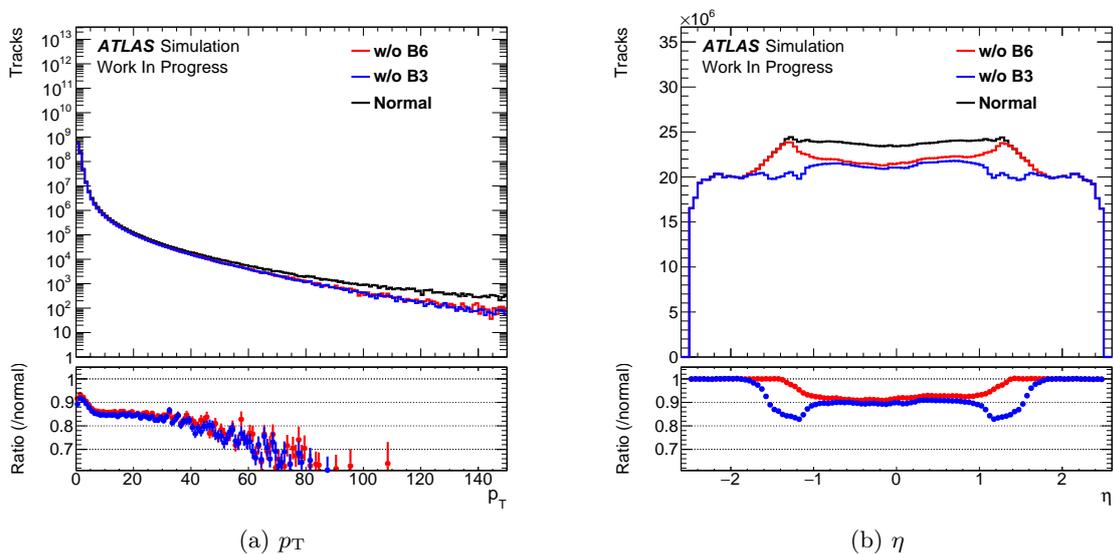


図 32: シミュレーションにおける飛跡の再構成に対する影響 : 図 32a  $|\eta| < 1.0$  の飛跡の  $p_T$  分布, 図 32b  $\eta$  分布 : 下図は通常の場合の飛跡に対する SCT が動作しない場合の再構成率

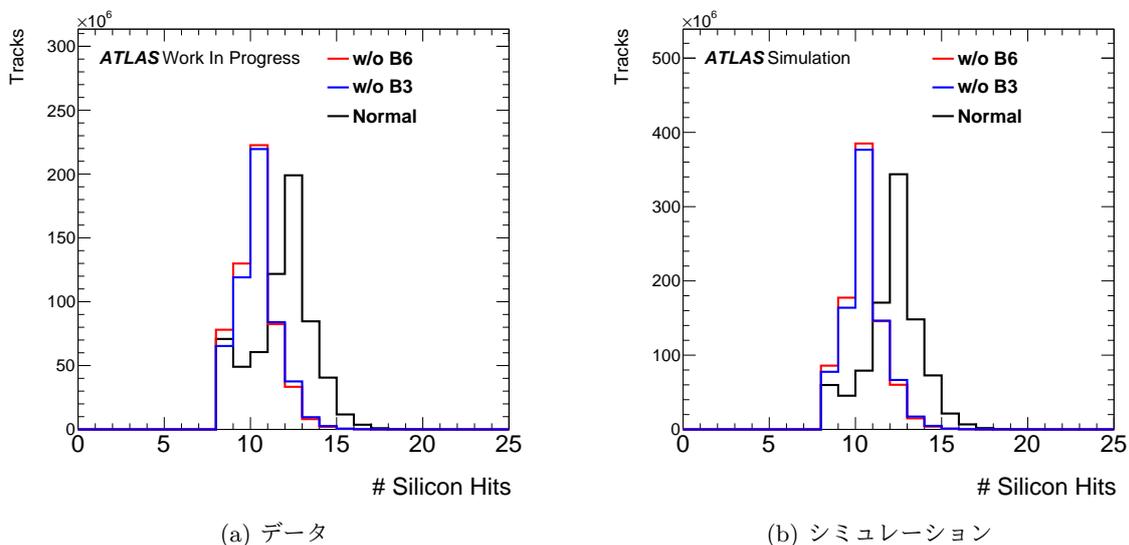


図 33: 飛跡のシリコンのヒット数：バレル領域の飛跡を使用

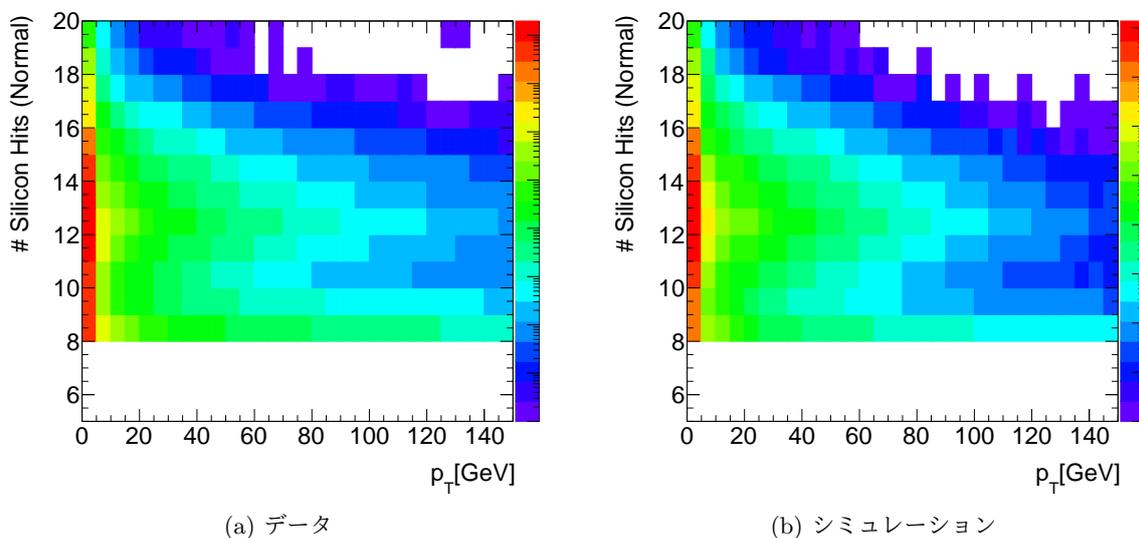


図 34: 飛跡の  $p_T$  とシリコンのヒット数の関係。通常の場合におけるバレル領域の飛跡を使用 (Z 軸は log スケール)。

#### 4.4 最内層及び最外層がどちらも動作しない場合

節 3.4 で述べたように、前節までは簡単のために 1 層が動作しない場合のみについて評価をする。今節では最内層と最外層の 2 層が動作しない場合を評価する。1 層が動作しない場合と評価対称が同じの場合、断りが無い限りはサンプルや事象選択は同じものを用いる。

$\mu$  粒子の再構成に対する影響

$\mu$  粒子の再構成に対する影響を図 35-36 に示す。図 35a, 36a から求められるバレル領域における影響は、データにおいて 29.0%、シミュレーションにおいて 22.6%であった。また、図 35b, 36b から求められる、SCT2 層が動作しないことでシリコンのヒット数が 8 ヒット未満になってしまう (通常の場合に 11 ヒット以下)  $\mu$  粒子の割合はデータにおいて 30.8%、シミュレーションにおいて 26.2%であった。これらの値は SCT1 層が動作しない場合と違い、実際の影響と無視できないずれが生じている。これを精査するために、IBL, Pixel, SCT の各バレルのヒットがバレル領域の飛跡の再構成に使用された割合を表 5-表 6 に示す。ここから SCT2 層が動作しない場合のヒットの使用率が通常の場合に対して高いことが分かる。これは通常の場合においてある層のヒットがないほうが質が良いと判断された飛跡が、SCT が動作しなくなったことでヒットを使用したほうが質が良いと判断されるようになるからである。この影響によってシリコンのヒット数から再構成されなくなると考えられる  $\mu$  粒子の割合と実際に再構成されない割合にずれが生じた。

また、これら表において内側の層に行くほどに使用率が下がるのは、飛跡の密度が高いためにヒットの密度も高くなり、より複雑になるからである。しかし、IBL は Run1 の後に挿入された新しい検出器であり、分解能や放射線損傷が Pixel よりも良い状態であるため使用率が高い値を示している。

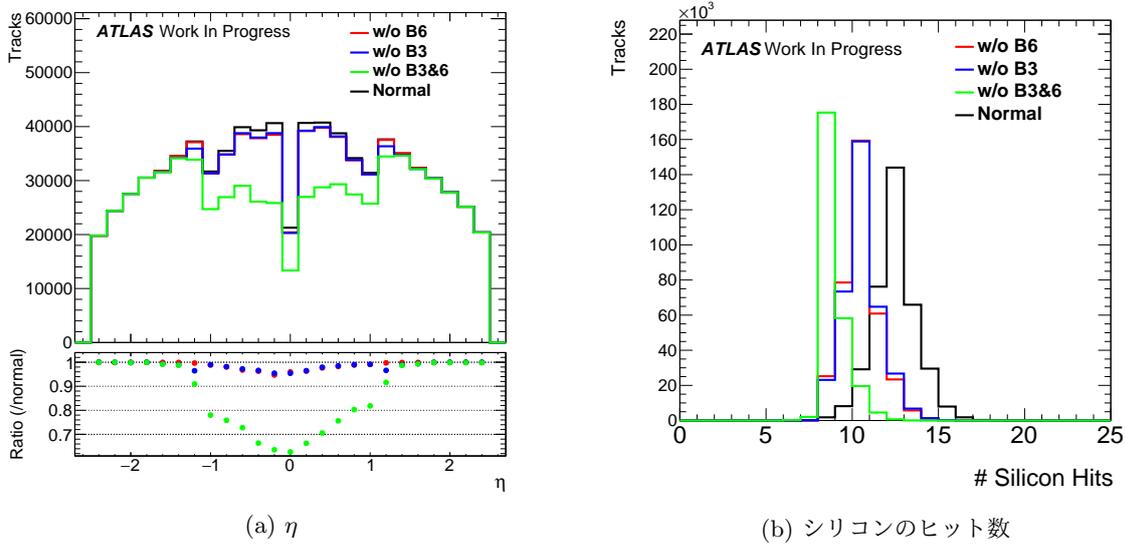


図 35: SCT2 層が動作しない場合を含めたデータにおける  $\mu$  粒子の再構成に対する影響 : 図 35a  $\eta$  分布, 図 35b バレル領域の飛跡のシリコンのヒット数分布

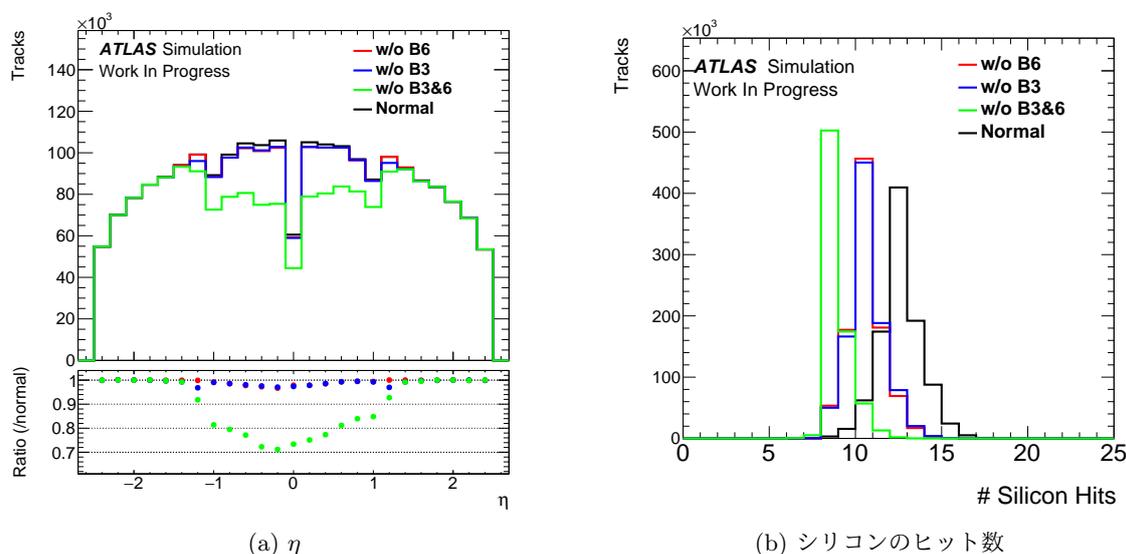


図 36: シミュレーションにおける  $\mu$  粒子の再構成に対する影響 (w/o B3&6) : 図 36a  $p_T$ , 図 36b  $\eta$

表 5: データにおける  $\mu$  粒子の飛跡のシリコンのヒットの使用率: バレル領域の  $\mu$  粒子の飛跡の数を 100%とし、IBL, Pixel, SCT のそれぞれのバレルの層のヒットを再構成のために使った飛跡の割合。ただし、SCT2 層が動作しない場合に Barrel3 と Barrel6 の割合は当然 0%になるため省いている。

	IBL	Barrel0	Barrel1	Barrel2	Barrel4	Barrel5
w/o B3&6	99.0%	96.2%	97.1%	98.4%	99.9%	99.9%
Normal	96.4%	87.0%	89.5%	94.6%	98.0%	98.5%

表 6: シミュレーションにおける  $\mu$  粒子の飛跡のシリコンのヒットの使用率

	IBL	Barrel0	Barrel1	Barrel2	Barrel4	Barrel5
w/o B3&6	99.3%	97.1%	97.9%	98.7%	99.8%	99.9%
Normal	97.6%	89.8%	92.8%	95.8%	98.0%	98.5%

### $\mu$ 粒子の分解能に対する影響

$\mu$  粒子の Truthトラックとオフライントラックのパラメータの差の分布を図 37 に示す。また、標準偏差は  $p_T$  が  $0.680 \pm 0.002 \text{ GeV}$ 、 $\eta$  が  $4.142 \pm 0.006 \times 10^{-4}$ 、 $\Phi$  が  $8.49 \pm 0.01 \times 10^{-5}$  と確認された。表 3 と合わせると、最も影響が大きいのは  $\eta$  であり、9.8%の悪化が確認された。

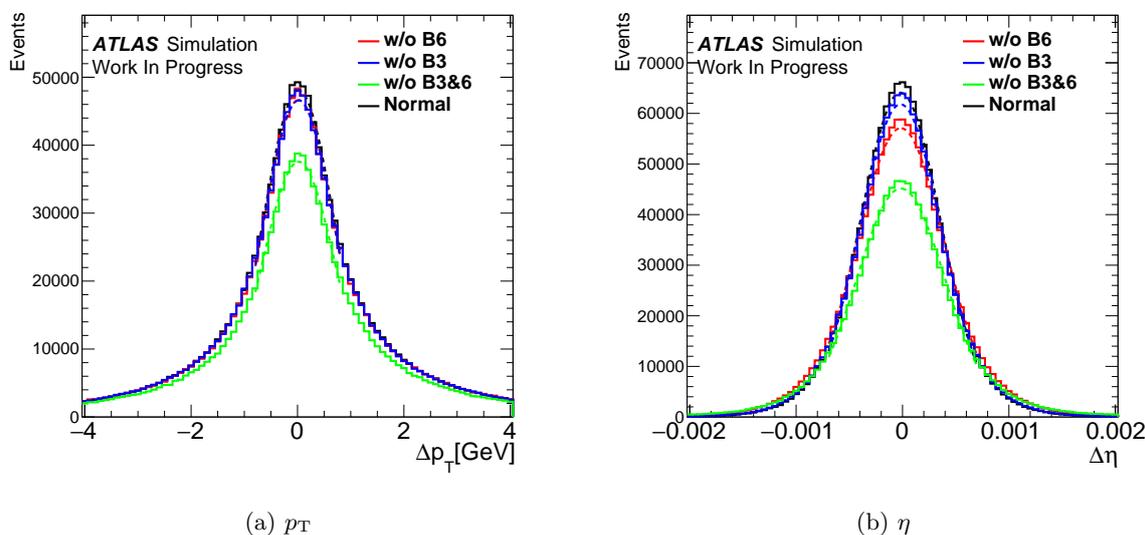


図 37:  $\mu$  粒子の分解能に対する影響 (w/o B3&6)。Truth トラック：バレル領域内の Z ボソンが崩壊した  $\mu$  粒子。オフライントラック：Truth トラックとの  $\Delta R$ (式 5) が  $\Delta R < 0.01$  となる  $\mu$  粒子

2本の  $\mu$  粒子で組んだ不変質量に対する影響を図 38 に示す。図 38b の分布を  $|\Delta m_{\mu\mu}| < 2.2\text{GeV}$  のバルク領域でガウスフィットすると、標準偏差は  $1.468 \pm 0.006\text{GeV}$  となる。よって、表 4 と合わせると、SCT2 層が動作しない場合の分解能に対する影響は  $3.0 \pm 0.6\%$  となる。

これらの結果は節 4.1.2 で確認された影響に対して大きいことは確認できたが、再構成に対する影響と比べるとその影響は小さい。よって、節 4.1.2 の分解能に対する影響はミューオン検出器の影響が大きいという結果と矛盾していないと言える。

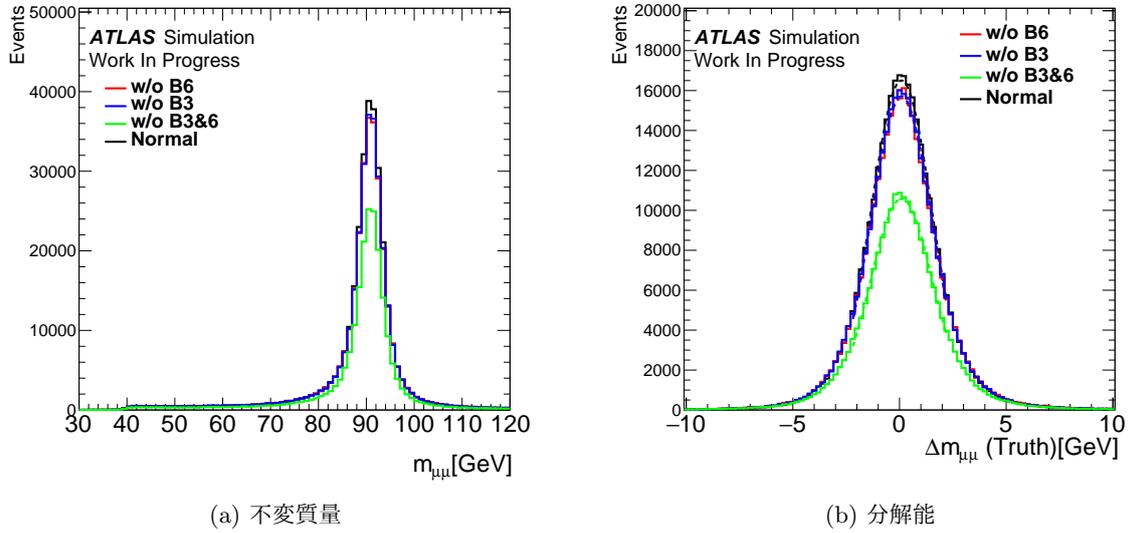


図 38: 2 本の  $\mu$  粒子の不変質量  $m_{\mu\mu}$ : 図 26a  $p_T > 20\text{GeV}$  かつ  $|\eta| < 1.0$  の  $\mu$  粒子 2 本から組んだ不変質量分布, 図 26b Truth とオフラインの不変質量の差

### $\tau$ 粒子の再構成に対する影響

シミュレーションにおける  $\tau_{had}$  に対する影響を図 39 に示す。まず図 39a から  $|\eta| < 0.8$  における影響は 21.4% であった。次に図 39b から  $\tau$ Track に対する影響を節 4.2 と同様に計算する。Truth が 1prong の場合から計算すると影響は 20.7% であり、3prong の場合から計算すると 20.0% であった。これは SCT1 層が動作しない場合と同様に、 $\mu$  粒子の再構成に対する影響と同程度の影響を示している。 $\tau_{had}$  に対する影響と  $\tau$ Track に対する影響で差が小さい理由としては Truth が 3prong の  $\tau_{had}$  がオフラインで 1prong として再構成される数が 9.6 倍に増えたことによるものである。

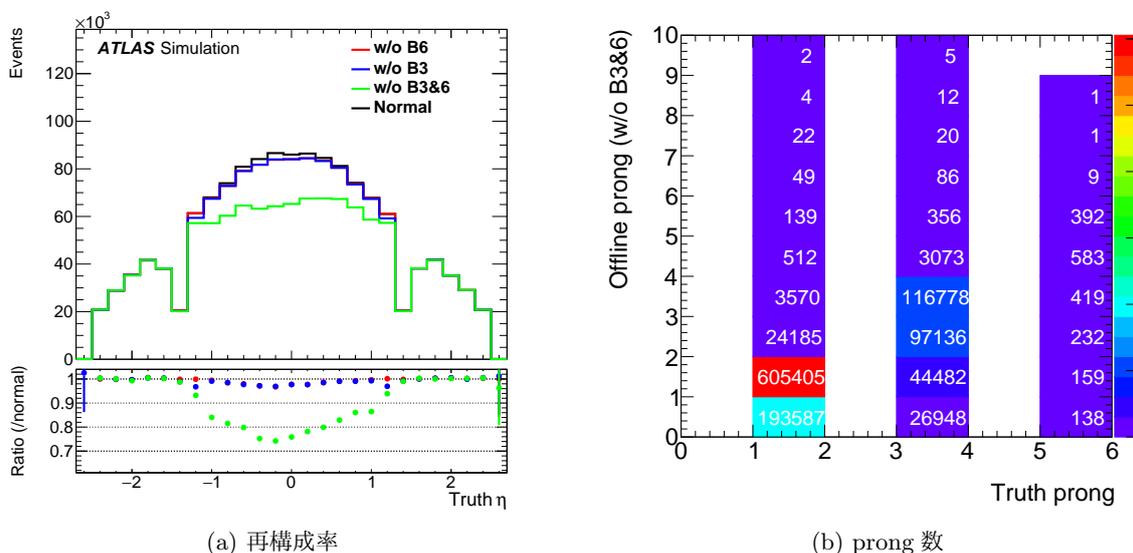


図 39: シミュレーションにおける  $\tau_{had}$  に対する影響 (w/o B3&6) : 図 39a Truth とマッチした上で全ての事象選択をかけたときのマッチした Truth の  $\eta$  分布 図 39b  $p_T$  の事象選択のみをしたときの Truth の prong 数と Offline の prong 数の関係 ( $|\eta| < 0.8$ )

### ジェット内の飛跡に対する影響

ジェット内の飛跡に対する影響を図 40-41 に示す。バレル領域において、データにおける影響は 44.7%、シミュレーションにおける影響は 33.6%であった。また、通常の場合におけるシリコンのヒット数が 11 以下の飛跡の割合はデータにおいて 46.5%、シミュレーションにおいて 38.8%であった。ここからシリコンのヒット数から予想される影響よりも実際の影響の方が小さく、データの方がそのずれは小さい。これは  $\mu$  粒子の再構成に対する影響で見られた特徴と同じであるため、ヒットの使用率によるずれであると考えられる。

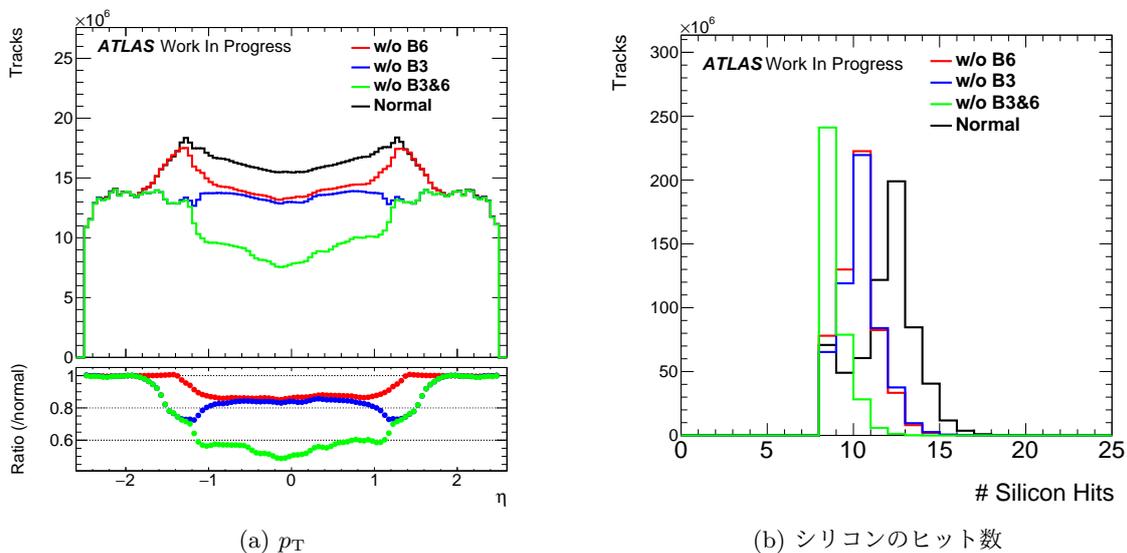


図 40: データにおける飛跡の再構成に対する影響 (w/o B3&6) : 図 40a  $\eta$  分布, 図 40b  $|\eta| < 1.0$  の飛跡のシリコンのヒット数

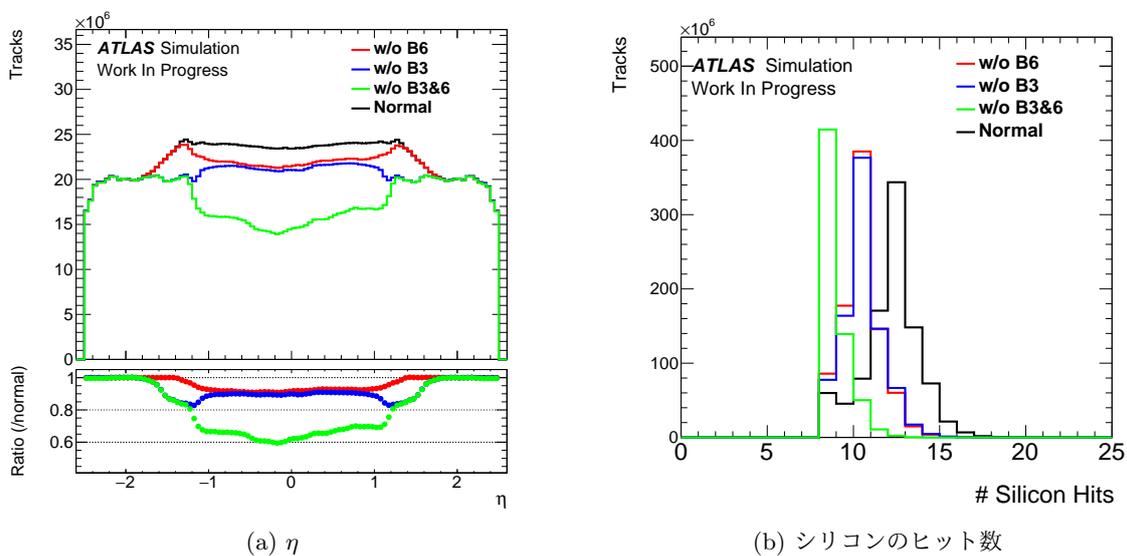


図 41: シミュレーションにおける飛跡の再構成に対する影響 (w/o B3&6) : 図 41a  $\eta$  分布, 図 41b  $|\eta| < 1.0$  の飛跡のシリコンのヒット数

#### 4.5 まとめ

Run3 終盤において SCT の最内層及び最外層が動作しない可能性を考慮し、その場合における飛跡再構成に対する影響を評価した。まず、シミュレーションにおける影響の結果をまとめる。 $\mu$

粒子の再構成に対する影響として最内層が動作しない場合は 1.7%、最外層が動作しない場合は 1.7%、最内層と最外層が動作しない場合は 22.6%の再構成効率の低下が確認された。この影響は SCT が動作しなくなったことで飛跡再構成に要求しているシリコンのヒット数を満たすことができなくなってしまった飛跡による影響である。また、 $\mu$  粒子の分解能に対する影響は最内層が動作しない場合は 1.2%、最外層が動作しない場合は 1.3%、最内層と最外層が動作しない場合は 3.0%であった。分解能に対する影響は再構成に対する影響よりも小さく、2層動作しない場合において顕著である。この原因としてミューオン検出器が分解能に対して与える影響が大きいからであると考えられる。 $\tau$  が崩壊したハドロンに対する影響も  $\mu$  粒子と同程度であり、最内層が動作しない場合は 1.7%、最外層が動作しない場合は 1.7%、最内層と最外層が動作しない場合は 20.7%の再構成効率の低下が確認された。しかし、通常の場合に 2prong だった  $\tau_{had}$  が 1prong になることや 4prong だったものが 3prong になるなどによって、 $\tau_{had}$  として事象選択されなかったものがされるようになることによる回復も見られたため、 $\tau_{had}$  の再構成に対する影響は  $\tau$ Track の再構成率から計算される値よりも小さくなった。また、飛跡に対する影響として内部飛跡検出器によって再構成されたジェット内の飛跡に対する影響も評価した。影響は最内層が動作しない場合は 8.7%、最外層が動作しない場合は 6.7%、最内層と最外層が動作しない場合は 33.6%であった。これらの影響は特に  $p_T$  が高い飛跡に対しての影響が大きい。これは高い  $p_T$  の飛跡ほど少ないシリコンのヒット数で再構成できるため、SCT が動作しないことでシリコンのヒット数の要求を満たすことができなくなる飛跡が多いからである。

次にデータに対する影響として  $\mu$  粒子とジェット内の飛跡に対する影響を評価した。データにおける影響はシミュレーションにおける影響よりも大きく、 $\mu$  粒子に対する影響は最内層が動作しない場合は 2.6%、最外層が動作しない場合は 2.8%、最内層と最外層が動作しない場合は 29.0%の再構成効率の低下が確認された。また、ジェット内の飛跡に対する影響は、最内層が動作しない場合は 16.2%、最外層が動作しない場合は 13.4%、最内層と最外層が動作しない場合は 44.7%の再構成効率の低下が確認された。このデータとシミュレーションのずれはシリコンのヒット数によるものである。シミュレーションにおいてデータのヒット数の分布を再現すること、特に通常の場合において 8 ヒットや 9 ヒットで再構成される飛跡の再現は難しい。それらは SCT1 層が動作しないことで飛跡再構成の要求を満たさなくなってしまうため再構成がされなくなるため、シミュレーションとの違いが生じた。

## 5 影響の最小化

前章において SCT の 1 部が動作しない場合の影響について評価した。この章では評価した影響、特にジェット内の飛跡に対する影響を最小に抑えるための提案を行っていく。用いるサンプルはジェット内の飛跡の影響を見た 2018 年データを用いる。

### 5.1 飛跡再構成の要求の緩和

影響を小さくする方法として、飛跡再構成に要求するシリコンのヒット数を緩和することがある。前章でも触れたが、Run3 ではシリコンのヒット数を 8 ヒットを要求する。また飛跡の再構成への影響は、通常の場合において再構成に使用したヒット数が SCT の 1 部が動作しないことで 7 ヒット以下になってしまう飛跡が多いことが分かっている。よって、シリコンのヒット数の緩和は影響を最小化するにあたって、単純かつ効果的な方法であると考えられる。要求するヒット数は得られる飛跡と CPU リソースとの兼ね合いで決まっている。従って、飛跡に対する影響と CPU リソースについて議論する。

#### 5.1.1 全 $\eta$ 領域で要求を緩和

##### 飛跡再構成性能に対する影響

まず、全  $\eta$  領域でシリコンのヒット数の要求を緩和した場合の飛跡の再構成に対する影響をみる。Run3 における通常の運転である、「SCT が全層正常に動作してヒット数の要求が 8 ヒット」の飛跡に対して「SCT1 層が動作しないがヒット数の要求を緩めた」飛跡の再構成率を評価する。事象選択は基本は 4.3 と同様のものを要求するが、ヒット数の要求はそれぞれの場合に応じたヒット数を要求する。図 42 にヒット数の要求を 7 ヒットに緩めた場合、図 43 にヒット数の要求を 6 ヒットに緩めた場合の再構成率を示す。

ヒット数の要求を 7 ヒットにした場合、最外層が動作しない場合は全  $\eta$  領域において通常の運転と同等以上の飛跡を再構成することができる。しかし、最内層が動作しない場合は通常の運転ほどに再構成率を回復できていない。 $p_T$  分布から、 $p_T < 5\text{GeV}$  の領域においてのみ再構成率が回復していないことが分かる。この原因は、図 34a から考察ができる。まず、 $p_T$  が高い飛跡はヒット数が足りないために再構成されなくなった飛跡の割合が高いためにヒット数の要求を緩和することで改善が大きい。しかし、 $p_T$  が低い飛跡は SCT1 層が動作しないことで再構成が難しくなる飛跡が多いと考えられる。内部飛跡検出器の領域には磁場がかかっており、飛跡の曲率半径から  $p_T$  を求めるため、低い  $p_T$  の飛跡ほど曲がり方が大きい。よって、図 44 のように SCT1 層が動作しない場合に飛跡の再構成が難しくなる。ヒット数の要求を 6 ヒットにした場合、最内層が動作しない場合であっても全  $\eta$  領域において通常の運転と同等以上の飛跡を再構成することができる。また、エンドキャップ領域において飛跡が増えていることが分かる。このほとんどは Fakeトラックと呼ばれる飛跡である。Fakeトラックは、異なる粒子の残したヒットをランダムに繋げてしまった場合や、1 本の粒子から 2 本の飛跡が再構成され、それが何らかの理由で除去されなかった場合などに生じる。

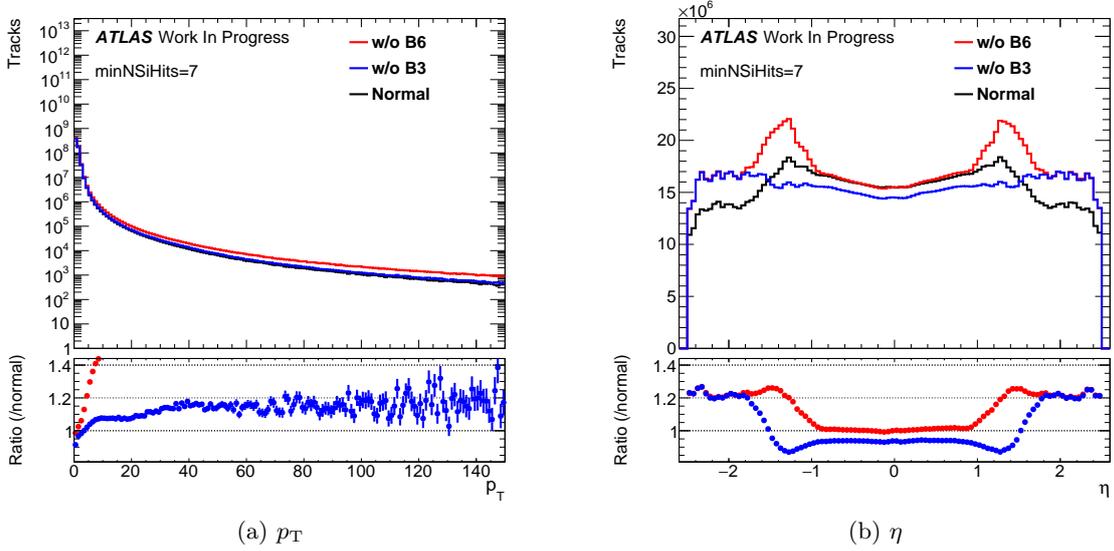


図 42: シリコンのヒット数の要求を 7 ヒットにした場合のデータにおける飛跡の再構成に対する影響。ただし、Normal は要求が 8 ヒットの通常の場合：図 42a  $|\eta| < 1.0$  の飛跡の  $p_T$  分布，図 42b  $\eta$  分布：下図は Run3 の通常の状態の飛跡に対する SCT が動作しない場合の再構成率

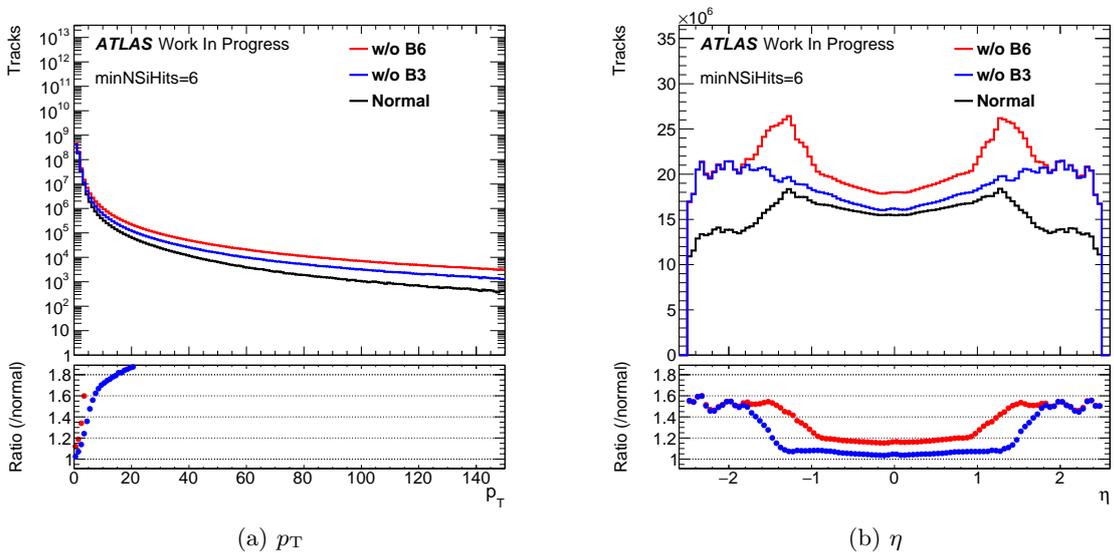


図 43: シリコンのヒット数の要求を 6 ヒットにした場合のデータにおける飛跡の再構成に対する影響。ただし、Normal は要求が 8 ヒットの通常の場合：図 43a  $|\eta| < 1.0$  の飛跡の  $p_T$  分布，図 43b  $\eta$  分布：下図は Run3 の通常の状態の飛跡に対する SCT が動作しない場合の再構成率

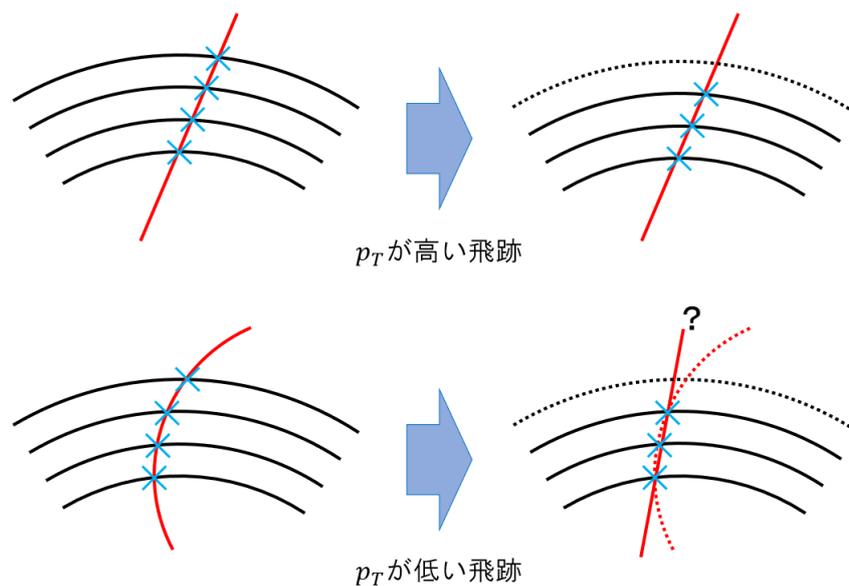


図 44: 飛跡の再構成 (略図)

## CPU リソース

CPU リソースへの評価として、同じ計算機を使い再構成にかかった CPU 時間で評価した。評価方法は全  $\eta$  領域でヒット数の要求を変えて 100 イベントずつデータを再構成し、その CPU 時間を評価する。その結果を図 45 に示す。増加率は要求を 7 ヒットにした場合  $25 \pm 5\%$ 、6 ヒットにした場合  $13 \pm 4\%$  となった。これらは飛跡の数が増えたことが原因であると考えられるため、飛跡の数の比と CPU 時間の比関係を図 49 に示す。ここから、飛跡数と CPU 時間はある程度の比例関係にあることが分かる。

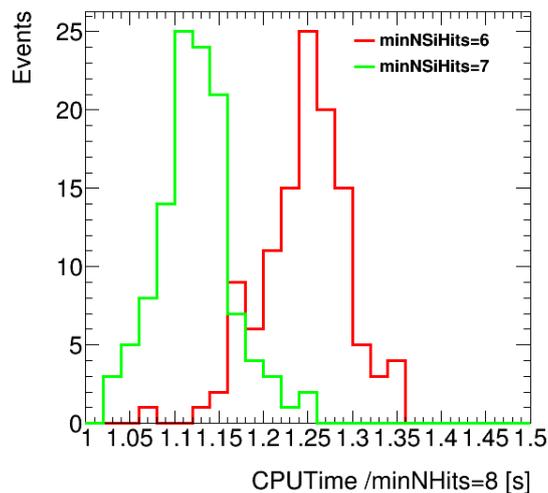


図 45: CPU リソースの増加量 : 同じイベントにおいて 8 ヒットを要求した場合に対して要求を緩くした場合に何倍の CPU 時間がかかったかを示している。赤 : 要求を 6 ヒットにした場合、緑 : 要求を 7 ヒットにした場合

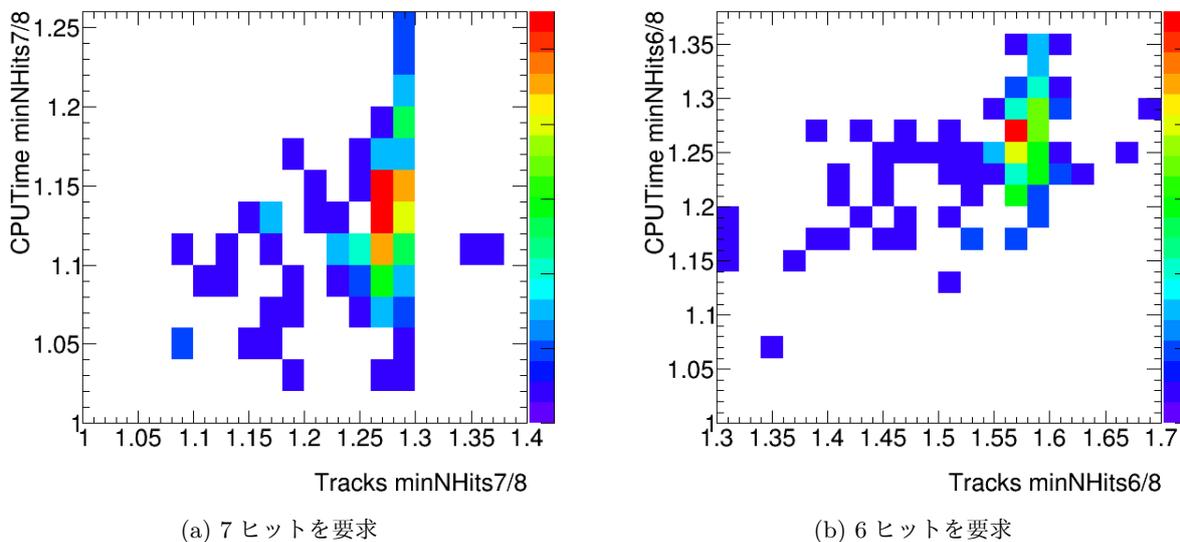


図 46: 飛跡の数と CPU リソースの関係 縦軸 : 要求が 8 ヒットの場合に対する CPU リソースの増加率 横軸 : 要求が 8 ヒットの場合に対する飛跡の増加率

### 5.1.2 バレル領域のみで要求を緩和

前節においてヒット数の要求を緩和することにより飛跡再構成率が回復すること、及びその場合に CPU リソースの使用率が増加することが分かった。しかし、エンドキャップ領域において飛跡が増えているため、バレル領域においてのみ要求を緩和した場合に CPU リソースの使用率の増

加を抑えることができると考えられる。そこで、バレル領域のみでシリコンのヒット数の要求を緩和する。しかし、バレル領域とエンドキャップ領域の区別は非常に複雑な問題となり得るため、今回は再構成時にそれを区別するのではなく、再構成された飛跡に対して領域の区別を行う。よって、ここではCPUリソースの言及はしない。

飛跡の再構成の際に飛跡が動作していないセンサーを通ったと判断された場合、そのセンサーの数がDead Sensorとして情報を残す。今回はこのDead Sensorと $\eta$ の領域でシリコンのヒット数の要求を緩和する。具体的には以下の条件を通った場合に緩和する。

- $|\eta| < 1.6$
- Dead Sensor  $\geq 2$

この条件を通った飛跡のシリコンのヒット数の要求を7ヒットにした場合の結果を図47に、6ヒットにした場合の結果を図48に示す。

全 $\eta$ 領域での結果から予想されるように、最外層が動作しない場合は7ヒット、最内層が動作しない場合は、6ヒットに要求を緩和することで通常の場合と同程度の飛跡再構成効率を得られる。しかし、 $|\eta| > 1.6$ の領域において、通常の場合に対して要求が7ヒットの場合は7%、6ヒットの場合は9%程高い再構成効率を示している。この原因を精査するために要求を変えたときのシリコンのヒット数の分布を確認した。その結果を図49に示す。ここから8ヒットの飛跡数が要求を緩くした場合の方が多くことが分かる。

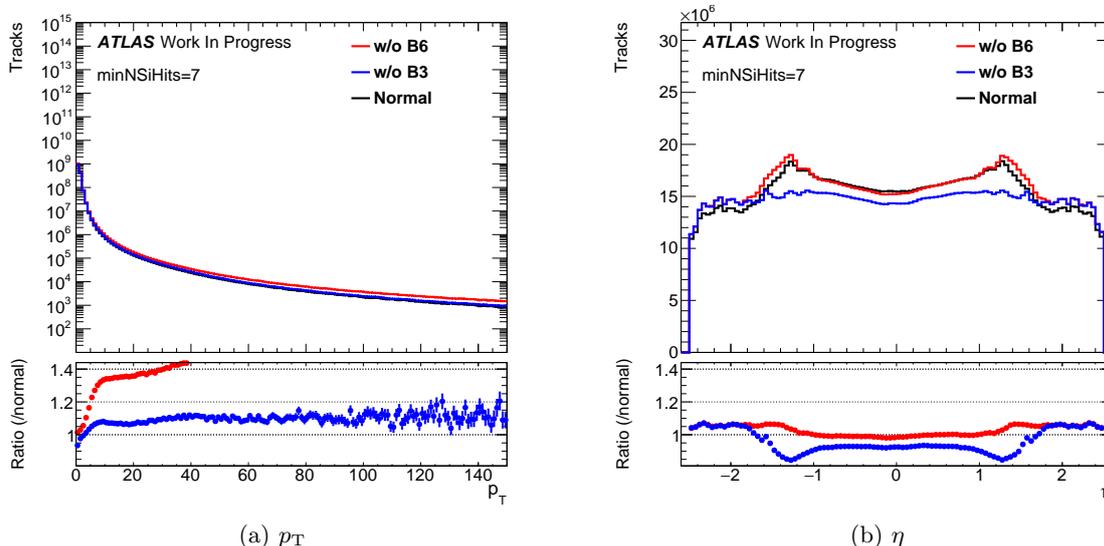


図 47: バレル領域においてシリコンのヒット数の要求を7ヒットにした場合のデータにおける飛跡の再構成に対する影響：図47a  $|\eta| < 1.0$ の飛跡の $p_T$ 分布, 図47b  $\eta$ 分布：下図はRun3の通常の状態の飛跡に対するSCTが動作しない場合の再構成率

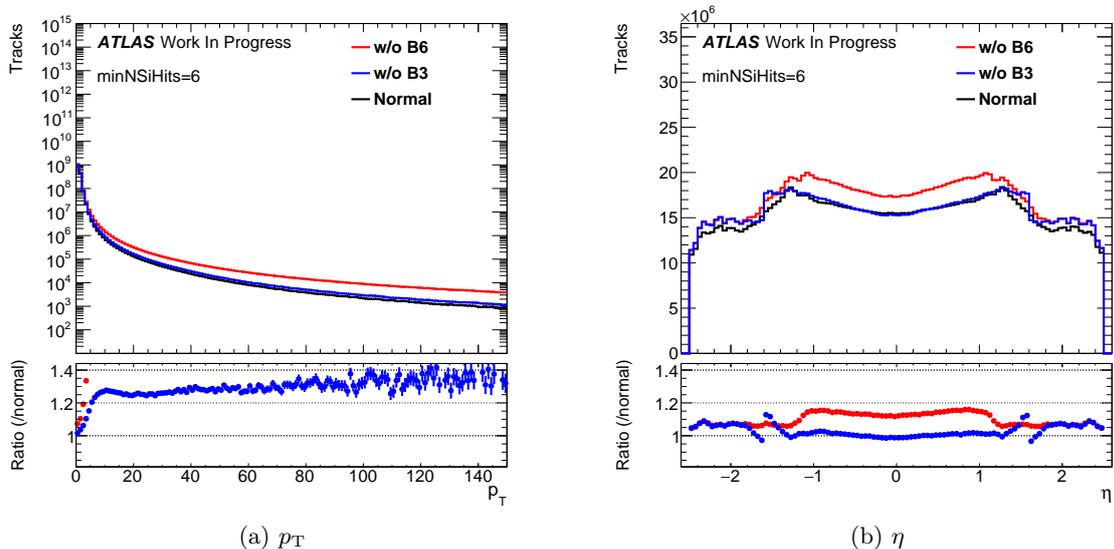


図 48: バレル領域においてシリコンのヒット数の要求を 6 ヒットにした場合のデータにおける飛跡の再構成に対する影響：図 48a  $|\eta| < 1.0$  の飛跡の  $p_T$  分布, 図 48b  $\eta$  分布：下図は Run3 の通常の状態の飛跡に対する SCT が動作しない場合の再構成率

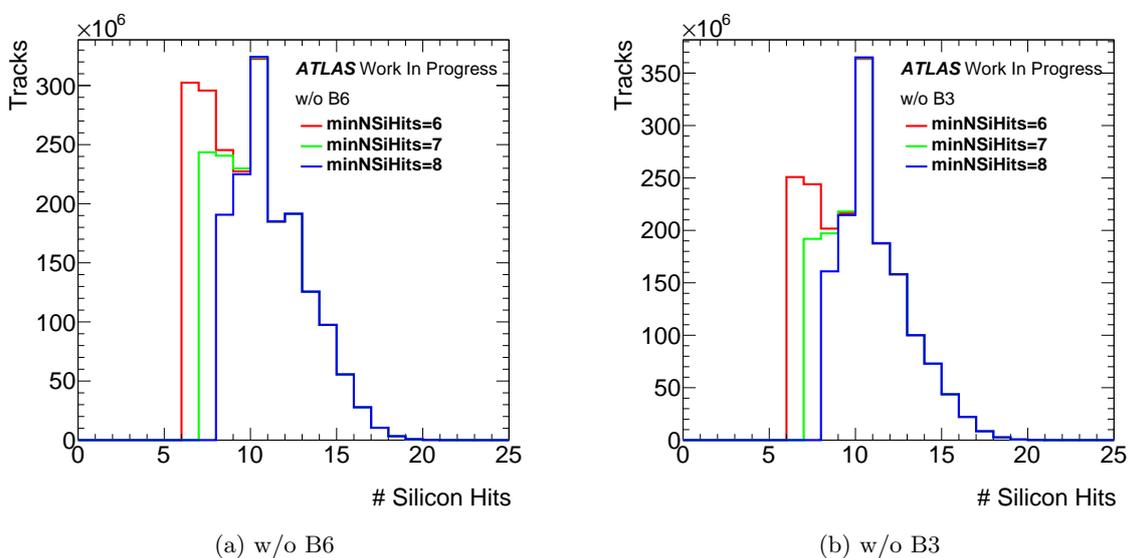


図 49: シリコンのヒット数の要求を変えたときのシリコンのヒット数分布：図 49a 最外層が動作しない場合, 図 49b 最内層が動作しない場合：全  $\eta$  領域の飛跡を使用

## 5.2 まとめ

SCTの1部が動作しない場合の影響を最小にするために飛跡再構成におけるシリコンのヒット数の要求を緩和した場合を評価した。全 $\eta$ 領域で要求を緩和した場合、最外層が動作しない場合は要求を7ヒットにすると、最内層が動作しない場合は要求を6ヒットにすると、Run3における通常の運転と同程度の飛跡の再構成効率を得ることができる。しかし、最内層が動作しない場合であっても要求を7ヒットにすることで、 $p_T > 5\text{GeV}$ の飛跡の再構成効率は回復することができる。これは、 $p_T$ が高い飛跡の方が少ないヒット数でも再構成がしやすいため、もともと少ないヒット数で再構成していた飛跡がSCTの1部が動作しないことでヒット数の要求を満たすことができなくなることで再構成できなくなる飛跡が多いためである。

また、CPUリソースを同じ計算機を使ってデータを再構成した場合のCPU時間で評価した。ここからRun3の通常の運転である要求が8ヒットに対して、7ヒットにすると13%、6ヒットにすると26%必要なCPUリソースが増加した。この増加は飛跡数の増加によるものよりも飛跡数が増加したことによるジェットなどの識別にかかる時間が増えたことによるものであると考えられる。

## 6 まとめと展望

ATLAS 検出器の最内に位置する内部飛跡検出器の1つである SCT は Run2 において安定した運転を実現した。しかし、内部飛跡検出器は Run3 終了までの運転となっておりそのように設計されているため、Run3 における SCT の放射線損傷が懸念される。SCT グループでは Run3 での運用に向けて、放射線損傷のモデル化と予想を行っており、全層で Run3 終了まで安定的な運用ができると予想されている。しかし、SCT の最内層と最外層が様々な理由により Run3 終盤において運用が難しくなる可能性がある。よって、本論文では SCT の最内層と最外層のセンサーが全く動作しないという保守的な状況を想定し、飛跡再構成に対する影響を評価した。また、その影響を最小化するための提案について議論する。

まず、シミュレーションにおける影響の結果をまとめる。 $\mu$  粒子の再構成に対する影響として最内層が動作しない場合は 1.7%、最外層が動作しない場合は 1.7%、最内層と最外層が動作しない場合は 22.6% の再構成効率の低下が確認された。この影響は SCT が動作しなくなったことで飛跡再構成に要求しているシリコンのヒット数を満たすことができなくなってしまった飛跡による影響である。また、 $\mu$  粒子の分解能に対する影響は最内層が動作しない場合は 1.2%、最外層が動作しない場合は 1.3%、最内層と最外層が動作しない場合は 3.0% であった。分解能に対する影響は再構成に対する影響よりも小さく、2 層動作しない場合において顕著である。この原因としてミューオン検出器が分解能に対して与える影響が大きいためと考えられる。 $\tau$  が崩壊したハドロンに対する影響も  $\mu$  粒子と同程度であり、最内層が動作しない場合は 1.7%、最外層が動作しない場合は 1.7%、最内層と最外層が動作しない場合は 20.7% の再構成効率の低下が確認された。また、飛跡に対する影響として内部飛跡検出器によって再構成されたジェット内の飛跡に対する影響も評価した。影響は最内層が動作しない場合は 8.7%、最外層が動作しない場合は 6.7%、最内層と最外層が動作しない場合は 33.6% であった。これらの影響は特に  $p_T$  が高い飛跡に対しての影響が大きい。これは高い  $p_T$  の飛跡ほど少ないシリコンのヒット数で再構成できるため、SCT が動作しないことでシリコンのヒット数の要求を満たすことができなくなる飛跡が多いからである。次にデータに対する影響として  $\mu$  粒子とジェット内の飛跡に対する影響を評価した。データにおける対する影響はシミュレーションにおける影響よりも大きく、 $\mu$  粒子に対する影響は最内層が動作しない場合は 2.6%、最外層が動作しない場合は 2.8%、最内層と最外層が動作しない場合は 29.0% の再構成効率の低下が確認された。また、ジェット内の飛跡に対する影響は、最内層が動作しない場合は 16.2%、最外層が動作しない場合は 13.4%、最内層と最外層が動作しない場合は 44.7% の再構成効率の低下が確認された。このデータとシミュレーションのずれはシリコンのヒット数によるものである。シミュレーションにおいてデータのヒット数の分布を再現することは難しい。特に通常の場合において 8 ヒットや 9 ヒットで再構成される飛跡の再現は難しいため、その影響が見えた。

影響を最小化するための提案として、飛跡再構成のシリコンのヒット数の要求を緩和することについて議論した。結果として、最内層が動作しない場合は要求を 6 ヒットにすると、最外層が動作しない場合は要求を 7 ヒットにすることで Run3 の通常の運転と同様の飛跡再構成性能を得られることが分かった。しかし、CPU リソースの使用量が要求を 6 ヒットにすると 26%、7 ヒットにすると 13% 上がることが分かった。

展望としては影響を最小化するにあたってのヒット数の要求を緩和する飛跡を精査することである。また、その場合の CPU リソースの使用量がどの程度の増加で済むのかについても評価する必要がある。

## 謝辞

この場を借りてお世話になった方々に感謝の意を述べさせていただきます。

初めに、指導教員である寄田浩平教授に感謝いたします。研究についてはもちろんのこと、それ以外の直接研究に関わらない場面でも大変お世話になりました。特に、進路について悩んでいる時にたくさんのお話をさせていただいたことはとても感謝しています。次の自転車は踏破します。

田中雅士准教授にはグループこそ違いましたが、様々な場面での的確なコメントを頂けたことはとても感謝しています。いつの日か正面から日本酒が飲めるようになります。

坂本敦子秘書には、出張時などの事務の面で大変お世話になりました。また、自分のしょうもない言動にも反応を示して頂けたことは救いでした。

駒宮幸男上級研究員には、学部4年時のゼミの時からお世話になりました。輪講の際などには自分の至らない知識を補っていただけたことはとても感謝しています。

ATLASグループの皆様にも感謝します。元博士研究員の森永真央さんには学部でFTKをやっていたころから常にお世話になりました。森永さんの下について研究ができたことは幸運だったと思っています。また、助手の三谷貴志さん、博士課程の加地俊瑛さんには分からない点などに対して丁寧に教えていただけたおかげで何とか研究を進めていくことができました。後輩である秋山大也君、鈴木隆仁君、山際美由希さんとは変な名前呼び合ったりと良い意味で固くない関係になれたと思います。3人の姿勢からも学ぶことがたくさんありました。

同期の小津龍吉君、諸星博之君にも感謝します。2人ともグループは違いましたが、くだらないことから真面目なことまで話せる良い仲間になれたと思います。

最後に、いつも支えてくれている家族に感謝します。

## A 付録

### $\Phi$ 分布

$\mu$  粒子とジェット内の飛跡に対する影響の  $\Phi$  分布を図 50, 51 に示す。 $\mu$  粒子、ジェット内の飛跡の両方に同様の構造が見えている。これは検出器の設計によるものである。シリコンの内部飛跡検出器は検出できない領域をなくすために  $\Phi$  方向に重なる部分があるように設置してある。その重なっている部分を粒子が通った場合 1 層に 2 ヒットが生じるため、再構成時のヒット数が多くなることが起こる。この概略図を図 52 に示す。本論において、SCT の 1 部が動作しない場合に再構成できなくなる飛跡のほとんどはシリコンのヒット数が要求を下回ることが分かっている。つまり、検出器が重なっている部分を通った飛跡は再構成に対する影響に耐性を持っていると言える。また、図 51 においても同様の構造が見えているため、シミュレーションは検出器の構造をよく再現していることが分かる。

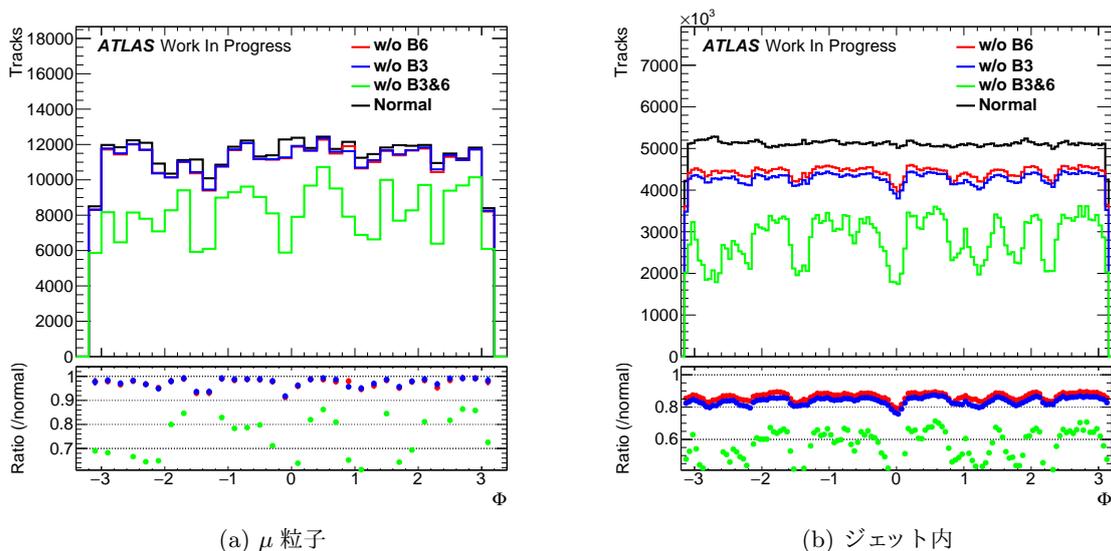


図 50: データにおける  $\mu$  粒子とジェット内の飛跡の  $\Phi$  分布 : バレル領域の飛跡のみ

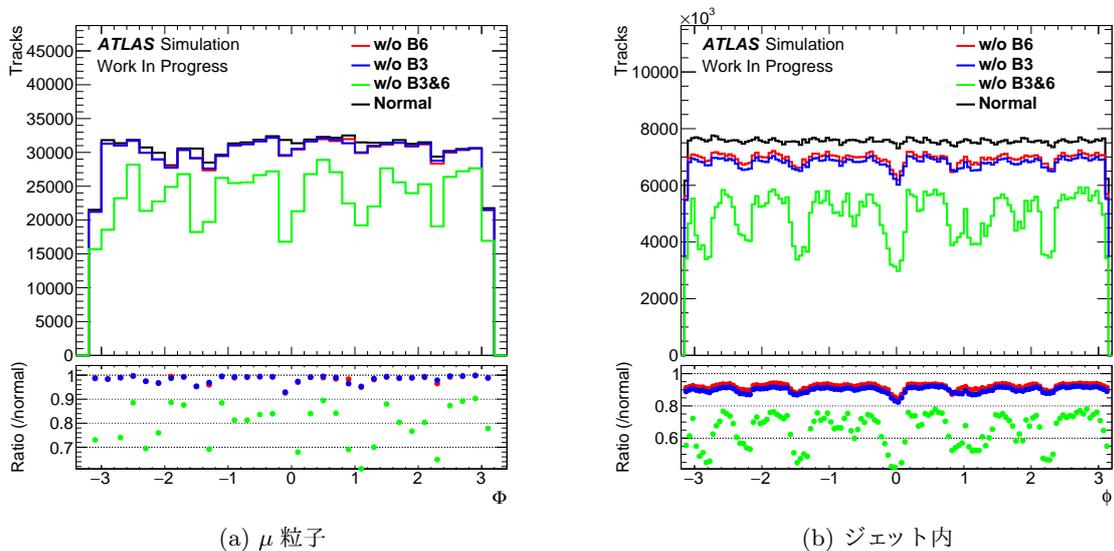


図 51: シミュレーションにおける  $\mu$  粒子とジェット内の飛跡の  $\Phi$  分布：バレル領域の飛跡のみ

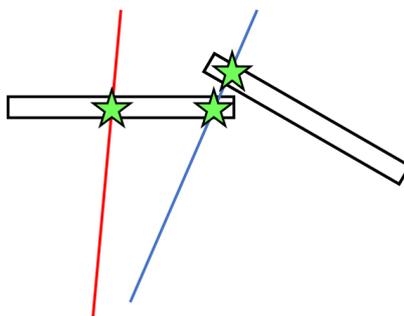


図 52: 内部飛跡検出器の  $\Phi$  方向の構造と飛跡のヒット数

## 参考文献

- [1] Particle Data Group, <http://pdg.lbl.gov/>
- [2] Lyndon Evans and Philip Bryant. LHC Machine. JINST, 3:S08001, 2008.
- [3] CERN Document Server, The four main LHC experiments, <http://cds.cern.ch/record/40525>
- [4] CERN Accelerating science, <https://hilumilhc.web.cern.ch/content/hl-lhc-project>
- [5] The ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, <http://iopscience.iop.org/1748-0221>
- [6] C Kourkoumelis and S Vourakis, HYPATIA—an online tool for ATLAS event visualization, <http://iopscience.iop.org/0031-9120/49/1/21>
- [7] ATLAS Collaboration. ATLAS Insertable B-Layer Technical Design Report. ATLAS-TDR-19.2010. <https://cds.cern.ch/record/1291633>
- [8] G Aad et al JINST(2008) 3 P07007, "ATLAS pixel detector electronics and sensors"
- [9] ATLAS JAPAN, "Selected Photos of ATLAS Silicon Microstrip Modules"
- [10] The ATLAS Collaboration, Performance of the ATLAS Trigger System in 2015, arXiv:1611.09661
- [11] 三井真吾, p型シリコンストリップセンサーとピクセルセンサーの設計及び放射線損傷評価
- [12] 電子情報通信学会 <http://www.ieice-hbkb.org/portal/>
- [13] 京都大学工学研究科義家研究室 HP <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/mre/research/research.html>
- [14] M. Moll, 1999, Radiation Damage in Silicon Particle Detectors, PhD Dissertation, HamburgUniv.
- [15] CERN Document Server, The Operational Experience, Challenges and-Performance of the ATLAS Semiconductor Tracker during LHC Run2 , <https://cds.cern.ch/record/2706059/files/ATL-INDET-PROC-2020-002.pdf>
- [16] The ATLAS Collaboration, Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker, arXiv:1404.7473
- [17] ATLAS Collaboration, Muon reconstruction performance of the ATLAS detector in proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, Eur.Phys.J.C76(2016) 292
- [18] ATLAS TDAQ Group, Lowest un-prescaled triggers per data-taking period, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/Atlas/LowestUnprescaled>

- 
- [19] ATLAS Collaboration, Topological cell clustering in the ATLAS calorimeters and its performance in LHC Run 1, *Eur. Phys. J. C*
- [20] ATLAS Collaboration, Reconstruction, Energy Calibration, and Identification of Hadronically Decaying Tau Leptons in the ATLAS Experiment for Run-2 of the LHC

学籍番号: 5319A010-1

## 研究活動の不正行為 定義確認書

2021年2月6日

早稲田大学大学院先進理工学研究科長 殿

早稲田大学大学院先進理工学研究科

物理及応用物理学 専攻 2年

本人氏名 伊藤 紘貴

(自署)

私は、裏面に記載のある研究活動の不正行為に関する定義を理解し、修士論文提出において、不正行為または不正行為と疑われる行為を一切行っていないことを誓約します。  
なお、当該行為を行なうと、厳重な処分（無期停学・当該学期成績無効・修士論文不合格等）を受けること、学位取得後であっても学位取消となることを十分に認識した上で、論文を執筆しました。

## 研究倫理教育受講確認書

2021年2月6日

本人氏名 伊藤 紘貴 

私は、修士論文の執筆にあたり、以下の研究倫理教育を受講しました。

<input checked="" type="checkbox"/>	GEC 設置科目「研究倫理概論」の受講
<input type="checkbox"/>	専攻設置科目の受講 科目名 ( )
<input type="checkbox"/>	その他 ( ) ※受講前に指導教員を通じて専攻主任の承認を受けること。 ※受講証明を添付すること。

## 研究活動の不正行為（捏造、改ざん、盗用、剽窃）について

修士論文を作成するに当たっては、以下の点に十分留意してください。

- ◆既存の文書・資料や自ら取得したデータ等に関し、「捏造・改ざん」は絶対に行ってははいけません。これらの行為は、社会人はもちろん、学生であっても当然守らなくてはならないルールです。

※捏造：事実でないことを事実のように仕立て上げること。でっちあげること。

※改ざん：文書やデータ等の全部あるいは一部を、故意に本来のものでない内容・形式・時期等に変更すること。悪意の有無は問わない。

- ◆学問の体系に新たな知見を加えるとき、その信頼性は命です。学術研究でも、そのための対応が求められます。そこでは上記に加え、資料・データ等の適切な利用と管理、情報取得に当たってのインフォームドコンセントの適用、取得した個人情報の保護等に配慮しなければなりません。

他人の著作物（書籍や論文などに加え、講演での発言やインターネットに掲載された文章・図表・データ等も含む）を活用する場合には、「盗用・剽窃」に十分配慮してください。

盗用・剽窃は、著作権法で禁止された行為です。社会人はもちろん、学生であっても当然守らなくてはならないルールです。

※盗用・剽窃：引用元を適切に記載せずに、他人の文章、結果、意見、アイデア、理論、学説などを自分のものとして発表すること。

- ◆学問の発展は独創性・独自性が基盤です。初めにそれを公表した人のオリジナリティを尊重し、敬意を払うことは学問の府に身を置く者の当然の責務です。学術論文においても、自分の考えと他人の意見を明確に区別し、表現しなければなりません。

このためには、適切な「引用」が重要です。学術論文では、他人の意見・アイデア・理論などを参照・参考にした箇所ごとに番号を付け、巻末や脚注で、その出所を明らかにすることが一般的です。学会等によって、その記載順序が若干異なりますが、以下を標準にします。

- ・論文・総説：著者、題名、掲載誌名、巻号、ページ、発表年（月）等
- ・国際会議・シンポジウム・口頭発表：著者、題目、シンポジウム等の名称、場所、年月、巻号、ページ、出版元、出版年等
- ・著書：題目、著者、ページ、出版元、出版年等

インターネットのからの引用では、以下の通りとします。

- ・著者、タイトル、URL、検索日

- ◆プレゼンテーション用のパワーポイントでは、上記の引用方法を簡略化して用いることを認めます。簡略化の原則は確認・参照の容易性です。例えば、論文からの引用では、著者、掲載誌名、発表年月のみの記載を認めます。著書や論文、インターネットなどの文章をそのまま記載する場合は、「」を付け、その文章を誰が公表しているかを明示するのが一般的です。