

¹ ATLAS ピクセル検出器電荷較正の自動補完と
² 次世代器量産管理システムの開発

³ 東京工業大学 理学院物理学系物理学コース 陣内研究室
木下怜士 (20M00395)

⁴ 2021 年 11 月 30 日

¹ Abstract

² abstract

概要

世界最高エネルギーでの陽子衝突加速器 LHC で新物理の発見を目指す ATLAS 実験のピクセル検出器においては、電荷較正の結果にデータの欠損や較正の失敗が含まれると、実測およびシミュレーションに影響を及ぼすため、較正結果を評価し再較正を行う必要がある。本研究では、再較正の際に適切な欠損の補完処理を行うよう、例外をアルゴリズムとして抽出・処理する自動解析ツールを開発した。

また、LHC 高輝度化に向けた ATLAS 検出器アップグレードのため、新型ピクセル検出器の開発および量産の準備を進めている。検出器の品質管理のために、組立工程において様々な試験を行う。本研究では、効率の良い量産と統合されたモジュール選定のために、先行する読み出し試験についての管理機能に加え、外観鑑別や形状測定などの試験項目についての管理機能、モジュール登録機能、試験結果の共有機能の開発を行った。

1 目次

2 概要	i
3 第 1 章 序論	1
4 1.1 素粒子標準模型	1
5 1.2 LHC	1
6 1.3 ATLAS 実験	3
7 1.4 HL-LHC アップグレード	7
8 第 2 章 シリコンピクセル検出器	10
9 2.1 半導体検出器の一般論	10
10 2.2 ピクセル検出器	10
11 2.3 現行ピクセル検出器	10
12 2.4 新型ピクセル検出器	10
13 第 3 章 現行ピクセルモジュールの電荷較正	11
14 3.1 チューニング	11
15 3.2 電荷較正	11
16 3.3 電荷較正における問題点	11
17 第 4 章 電荷補正の最適化	12
18 4.1 これまでの補正方法	12
19 4.2 電荷較正の補正	12
20 4.3 データが欠陥した際の補正	12
21 4.4 本章のまとめ	12
22 第 5 章 新型ピクセル検出器の開発	13
23 5.1 新型ピクセル検出器の組み立て工程	13
24 5.2 品質試験	13
25 5.3 量産における試験結果管理	13
26 第 6 章 データベースシステムの概要	14
27 6.1 量産に用いるデータベースの概要	14
28 6.2 本研究における開発項目	14

1	第 7 章	試験結果データ管理システムの開発	15
2	7.1	ピクセル検出器情報の登録	15
3	7.2	試験結果の管理	15
4	7.3	試験結果のアップロード・ダウンロード	15
5	7.4	試験結果の評価	15
6	第 8 章	まとめ	16
7	8.1	まとめ	16
8	8.2	今後の課題	16
9	付録 A	AppendixA	17
10	参考文献		18
11	謝辞		19

¹ 第1章

² 序論

³ フランスとスイスの国境にある欧州原子力研究機構 (CERN) に設置されている大型陽子衝突型加速器
⁴ (LHC) では、現在、素粒子物理学の基礎となっている標準模型の精密測定や標準模型を超える物理現象
⁵ の探索が行われている。ATLAS 実験は LHC 上にある 4 つの衝突点の 1 つで行われている実験であり、
⁶ ATLAS 検出器を用いて生成粒子の測定が行われている。LHC では加速器のアップグレード (HL-LHC)
⁷ を予定しており、これに向けて ATLAS 検出器のアップグレードを行う。この章では LHC-ATLAS 実験
⁸ とそのアップグレード計画について説明する。

⁹ 1.1 素粒子標準模型

¹⁰ ganbatte kakima shou !!

¹¹ 1.1.1 標準模型の概要

¹² 1.1.2 標準模型を超えた新物理の探索

¹³ 1.2 LHC

¹⁴ LHC(Large Hadron Collider) は欧州原子核研究機構 (CERN) に建設された、周長がおよそ 27 km の
¹⁵ 陽子・陽子衝突型加速器である。陽子ビームの重心系エネルギーは世界最高のエネルギーである 14 TeV
¹⁶ に到達できるよう設計されている。この世界最高のエネルギーを用いて、標準模型の精密測定やそれを超
¹⁷ える新物理の探索が LHC の主な目的である。

¹⁸ 1.2.1 LHC の基本構造

¹⁹ 図 1.1 に CERN に設置されている加速器・検出器の全体図を示す。陽子を生成し、加速器によって段
²⁰ 階的に加速された 2 本の陽子ビームが、LHC 周上において衝突する。

²¹ 金属製の円筒に水素ガスを注入し、電場を用いて水素分子を陽子と電子に分離する。LHC のビー
²² ムは、最大 2808 個のバンチと呼ばれる陽子のかたまりから構成され、 1.15×10^{11} 個の陽子が 1 バ
²³ ナンチとして加速される。すなわち、LHC において陽子陽子衝突から物理現象の探索をするためには、
²⁴ $2 \text{ beams} \times 2808 \text{ bunches} \times 1.15 \cdot 10^{11} \approx 6 \cdot 10^{14}$ 個の陽子を生成する必要がある。

²⁵ 生成された陽子バンチは、初めに線形加速器 (LINAC 2) によって 50 MeV まで加速される。その後、

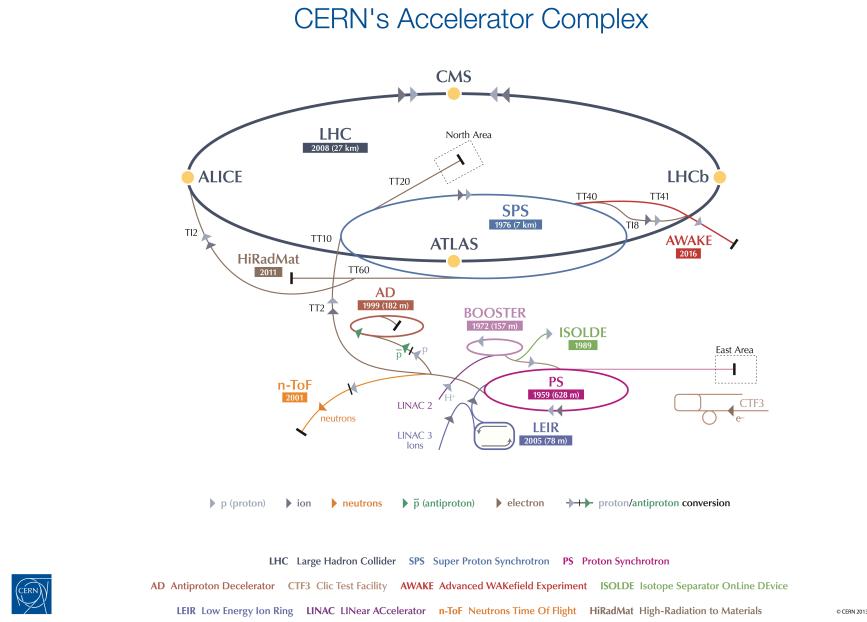


図 1.1 LHC の全体図 [1]

- 1 陽子シンクロトロンブースター (PBS)、陽子シンクロトロン加速器 (PS)、スーパーシンクロトロン加速器 (SPS) によって段階的に 450 GeV まで加速され、2 本の逆向きに加速された陽子バンチが LHC に投入される。LHC に投入された陽子バンチは 6.5 GeV(2018 年時点) まで加速されて、各衝突点において 2 つの陽子バンチが約 25 ns の間隔で衝突する。
- 5 LHC のビームパイプ上には 4 つの衝突点が設けられており、それぞれの衝突点において AT-
- 6 LAS(A Troidala LHC Apparatus)、CMS(Compact Muon Solenoid)、ALICE(A Large Ion Collider
- 7 Experiment)、LHCb 実験が行われている。

1.2.2 ルミノシティ

陽子ビームの強度を表すパラメータとして瞬間ルミノシティ L が用いられる。反応断面積 σ の物理イベントが、1 秒あたりに生じるイベント数 N は式 (1.1) で与えられる。

$$L = \gamma_r \frac{N_b^2 n_b f_{rev}}{4\pi\varepsilon_n \beta^*} R \quad (1.1)$$

- 9 ここで、 N_b は 1 バンチあたりに含まれる粒子数、 n_b は 1 ビームに含まれるバンチ数、 f_{rev} はビームの回
- 10 転周波数、 γ_r は陽子ビームのローレンツ因子、 ε_n はビーム軸に垂直な平面でのビームの広がり、 β^* は衝
- 11 突点における振幅の大きさである。 R は幾何学的損失係数という、ビーム衝突が有限の角度で起きること
- 12 による係数であり、式 (1.2) で表される。

$$R = \left(1 + \left(\frac{\theta_c \sigma_z}{2\sigma^*} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (1.2)$$

- 13 ここで、 θ_c は衝突時ビーム交差角、 σ_z は衝突時におけるバンチ長の標準偏差、 σ^* は衝突時におけるのバ
- 14 ンチ幅の標準偏差である。

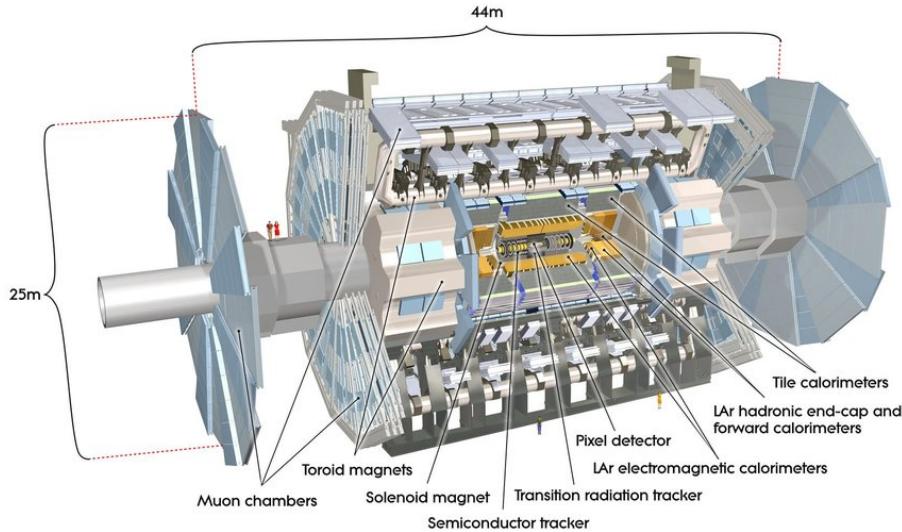


図 1.2 ATLAS 検出器の全体図 [2]

1 単位時間あたりに起こる物理事象の回数 N_{event} は、瞬間ルミノシティ L と反応断面積 σ を用いて
 2 式 (1.3) のように表すことができる。

$$N_{\text{event}} = \int L dt \sigma \quad (1.3)$$

3 1.3 ATLAS 実験

4 ATLAS は LHC の衝突点の一つに設置されている汎用型の検出器である。図 1.2 に示すように、
 5 ATLAS 検出器は直径 25 m 長さ 44 m の円筒型をした巨大な検出器である。その中心に陽子の衝突点
 6 があり、LHC によって加速された陽子ビームが円筒の中心軸を通過するような構造になっている。陽子
 7 ビームの衝突点である円筒の中心の内側から順に、内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリ
 8 メータ、ミューオン検出器が衝突点を覆うように存在する。内部飛跡検出器と電磁カロリメータの間には
 9 ソレノイド磁石、ハドロンカロリメータの外側にはトロイド磁石が配置されている。

10 1.3.1 ATLAS 実験で使用される座標系

11 ATLASにおいて粒子の位置・運動量を示すために、図 1.3 のような直交座標系 (x, y, z) および円筒座
 12 標系 (R, ϕ, z) を用いる。直交座標系は陽子の衝突点を原点とし、LHC リングの中心方向を x 軸、鉛直
 13 方向に上向きを y 軸、ビーム軸を z 軸と定義し、 $z > 0$ はジュネーブ市内の方向を指す。 z 軸が正の領
 14 域を A-side、負の領域を C-side と呼ぶ^{*1}。円筒座標系は z 軸からの距離を R とし、 xy 平面内における
 15 方位角を ϕ と定義する。また、 yz 平面における天頂角 θ を用いて擬ラピディティ (pesudorapidity) η を
 16 式 (1.4) のように定義する。

$$\eta \equiv -\ln \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (1.4)$$

^{*1} A-side は Airport がある方向、C-side はフランスの Saint-Genis-Pouilly という街にある Charly's Pub というバーがある方向

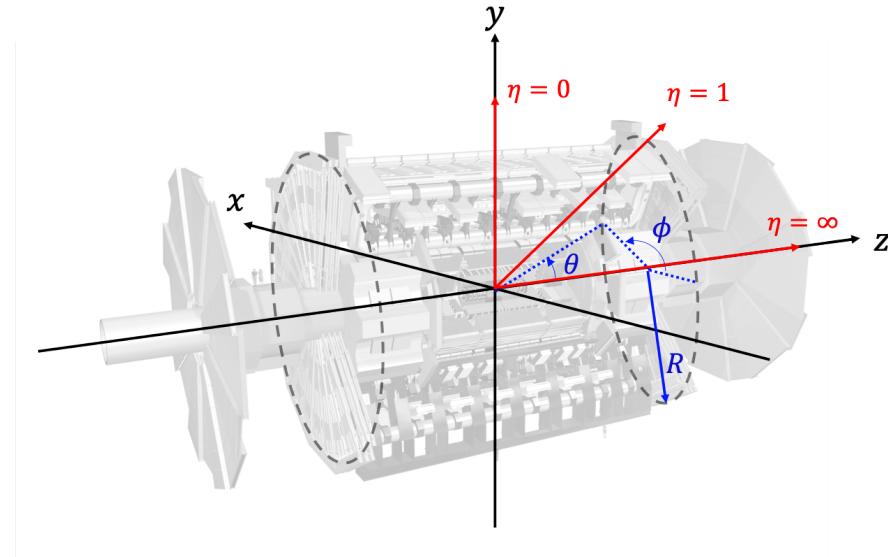


図 1.3 ATLAS 検出器で使用される座標系 [2]

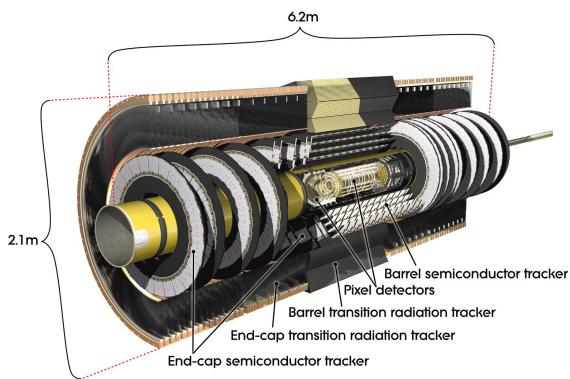


図 1.4 Composite

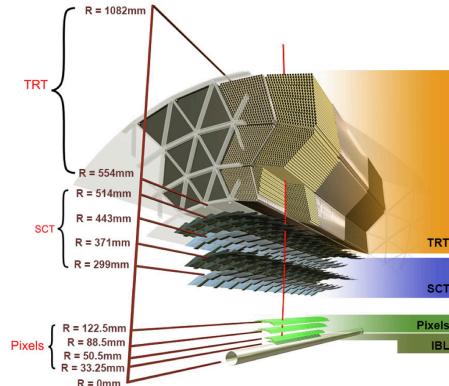


図 1.5 Gradation

- 1 擬ラピディティ η の差はローレンツ不変量であるから、ATLAS 実験において粒子の位置や検出器の配置を示す際に、極角 θ ではなく擬ラピディティが用いられることが多い。 $|\eta|$ が小さく ATLAS の側面に対応する領域をバレル部 ($|\eta| \leq 1.0$)、 $|\eta|$ が大きく ATLAS の底面に対応する部分をエンドキャップ部 ($|\eta| \geq 1.0$) と呼ぶ。

5 1.3.2 内部飛跡検出器

- 6 図 1.4 に内部飛跡検出器の全体図を示す。内部飛跡検出器は ATLAS の最内層に配置され、内側から順に IBL、ピクセル検出器、ストリップ検出器、遷移放射検出器で構成されている。衝突点から生成された荷電粒子を検出することで飛跡の再構成を行う。内部飛跡検出器の外側に配置されたソレノイド磁石により、2 T の磁場がビーム軸に並行な方向にかけられる。

10 IBL、ピクセル検出器

- 11 IBL(Insertable B-Layer) およびピクセル検出器はシリコン半導体検出器であり、内部飛跡検出器の最内層に配置されている。IBL はバレル部に 1 層配置され、ピクセル検出器はバレル部が 3 層、エンド

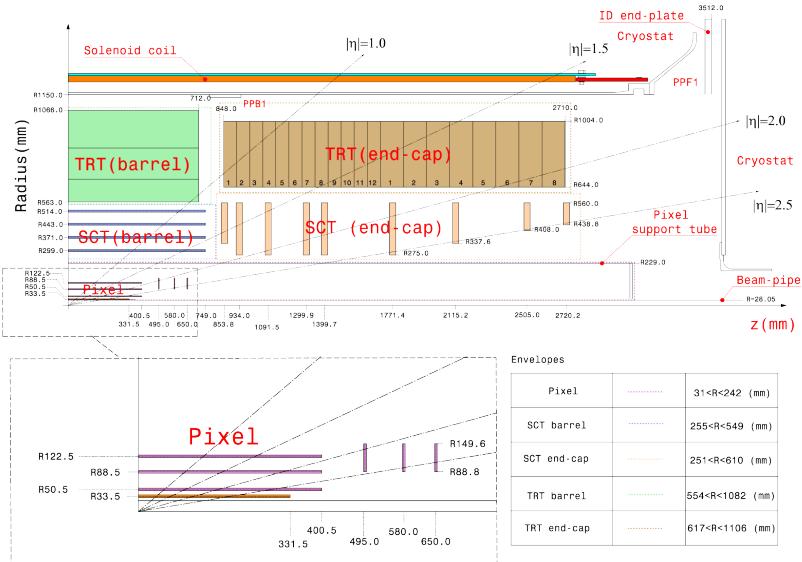


図 1.6 ATLAS 検出器の全体図 [3]

- 1 キャップ部が片側 3 層で構成される。IBL、ピクセル検出器が配置される領域を表 1.1 に示す。
- 2 ピクセル検出器は LHC の運転開始時である 2007 年から稼働している検出器であり、読み出しチップに FE-I3 という $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ のピクセルを持つ ASIC が使用されている。IBL は、LHC における 2 年間のシャットダウン期間 (2012 年 - 2014 年) に新たに設置された。IBL は陽子ビームの衝突点に最も近い検出器のため、高い放射線耐性と多い事象数を処理することができるよう設計されている。読み出しチップには FE-I4 と呼ばれる、 $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ のピクセルを持つ ASIC が使用されている。これらの ASIC の詳細については 2.3 節に示す。

表 1.1 IBL、ピクセル検出器の配置

	IBL	B-Layer	Layer1	Layer2	Endcaps
Radius [mm]	33.5	50.5	88.5	122.5	$88.8 < R < 149.6$
z [mm]	< 331.5	< 400.5	< 400.5	< 400.5	495.0, 580.0, 650.0
$ \eta $					

8 ストリップ検出器

- 9 ストリップ検出器 (SCT: SemiConductor Tracker) はシリコン半導体検出器であり、ピクセル検出器の外側に配置されている。バレル部 4 層で $|\eta| < 1.4$ の領域を、エンドキャップ部では片側 9 層ずつで $1.4 < |\eta| < 2.5$ の領域を覆うように配置されている。ストリップ検出器のモジュールはストリップが 80 μm 間隔で並んだシリコンセンサー 2 枚を 40 mrad ずらして重ねることにより、入射粒子の二次元の位置情報を測定することができる。

14 遷移放射検出器

- 15 遷移放射検出器 (TRT: Transition Radiation Tracker) は、ストローチューブで構成された検出器であり、内部飛跡検出器の最外層に配置されている。バレル部では 52544 本のストローチューブ (長さ 1.5 m)

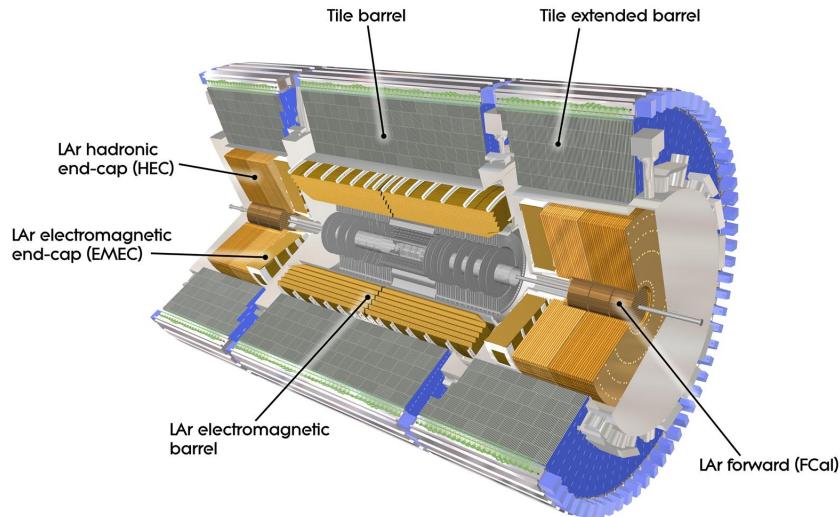


図 1.7 カロリメータの全体図 [4]

が $0.5 \text{ m} < R < 1.1 \text{ m}$, $|\eta| < 1$ の領域を、エンドキャップ部では片側 122880 本のストローチューブ (長さ 0.4 m) が $0.8 \text{ m} < |z| < 2.7 \text{ m}$, $< |\eta| < 2$ の領域を覆うように配置されている。ドリフトチューブの直径は 4 mm であり、チューブ内部には 70% の Xe、 27% の CO_2 と 3% の O_2 の混合ガスが充填されており、チューブの中心部に直径 $31 \mu\text{m}$ のワイヤーが張られている。荷電粒子がストローチューブを通過すると、混合ガスをイオン化する。それにより発生した自由電子は、チューブの外側にかけられた電場によりワイヤーに向かってドリフトし、読み出しされる。

1.3.3 カロリメータ

図 1.7 にカロリメータの全体像を示す。ATLAS におけるカロリメータはサンプリング型のカロリメータであり、検出層と吸収層から成る積層構造である。カロリメータは内部飛跡検出器の外側に配置されており、全体で $|\eta| < 4.9$ の領域を覆うように配置されている。粒子と物質の相互作用の違いから、対象とする粒子の種類により電磁カロリメータとハドロンカロリメータが用意されている。このような構造から、カロリメータを用いて通過粒子のエネルギーや位置の測定、電子・光子とハドロンの区別、ジェットの識別を行うことができる。

電磁カロリメータは、ソレノイド磁石の外側のバレル部 ($|\eta| < 1.4$) とエンドキャップ部 ($1.4 < |\eta| < 3.2$) の領域に設置されている。検出層に液体アルゴン^{*2}、吸収層に鉛 ($Z = 82$) が用いられており、高エネルギーの電子・光子が電磁カロリメータに到達すると、吸収層において電子対生成や制動放射を繰り返し、電磁シャワーを形成する。低エネルギーになった粒子は検出層においてイオン化しエネルギーを失い、イオン化により発生した電子が電気信号として読み出される。電磁シャワーによって得られる合計エネルギーを計算することにより、入射電子・光子のエネルギー測定を行うことができる。電子と光子の区別は、内部飛跡検出器中の飛跡情報を用いて行う。電磁カロリメータの厚さは $20X_0$ ^{*3} を超えるため、測定対象である電子・光子のほとんどは電磁カロリメータにおいて全てのエネルギーを失う。

*2 液体アルゴン (LAr) はエネルギー応答が線形で且つ安定を持つ物質である。また、放射線耐性も充分持ち合わせている。

*3 X_0 は放射長であり、入射粒子のエネルギーが $1/e \sim 0.37$ となる距離である。



図 1.8 2021 年 1 月に作成された LHC の運転計画 [5]。2025 年

1 ハドロンカロリメータは、電磁カロリメータの外側にあり、バレル部 ($|\eta| < 1.7$) とエンドキャップ部
2 ($1.5 < |\eta| < 3.2$) の領域に設置されている。バレル部は検出層にシンチレータ、吸収体に鉄を用いたタイ
3 ルカロリメータから成り、エンドキャップ部では検出層に液体アルゴン、吸収層に銅が用いられる。高エ
4 ネルギーのハドロンがハドロンカロリメータに入ると、吸収層において原子核と強い相互作用し粒子多重
5 生成を行い、カスケードシャワーを発生しそのエネルギー測定を行う。

6 1.3.4 ミューオン検出器

7 ミューオン検出器はカロリメータの外側にあり、 $|\eta| < 2.7$ の領域に設置される、ATLAS における
8 最外層の検出器である。ミューオンは物質の透過力が高く、他の崩壊生成粒子と比較して寿命が長い
9 ($\sim 2.2 \mu\text{sec}$) ため、ATLAS の外側まで透過する。予想される最高エネルギー (1 TeV) までのミューオン
10 の運動量を測定できるよう設計されている。

11 ミューオン検出器の大部分は、MDT(Monitored Drift Tube) である。MDT は直径約 3 cm のドリ
12 フトチューブ検出器であり、ミューオンの通過位置を測定することができる。測定のトリガーとして、
13 バレル部においては RPC(Resistive Plate Chamber)、エンドキャップ部においては TGC(Thin Gap
14 Chamber) から得られる情報を用いる。ビームパイプに近い領域 ($2.0 < |\eta| < 2.7$) においては、バックグ
15 ラウンドの γ 線や中性子が多く、ヒットレートが大きい。MDT はドリフト時間が長いため、この領域に
16 おいては MDT ではなく高い入射レートに耐えられる CSC(Cathode Strip Chamber) を用いてミュー
17 オンの通過位置測定を行う。

18 1.4 HL-LHC アップグレード

19 図 1.9 に LHC の運転計画を示す。LHC では、2025 年から HL-LHC(High Luminosity LHC) アッ
20 プグレードが開始する予定である。2027 年の運転開始から瞬間ルミノシティを設計値である $1.0 \times$
21 $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の 5-7 倍に増加させ、2037 年における運転停止までの積分ルミノシティを Run3 まで取
22 得予定である 300 fb^{-1} の約 10 倍にまで増加させることが目標である。

- このアップグレードに伴い、ATLAS に配置される検出器についてもアップグレードが予定されている。
この節では、HL-LHC アップグレード計画と、本研究と関わりのある ATLAS 内部飛跡検出器のアップグレード計画について述べる。

1.4.1 HL-LHC の概要

表 1.2 HL-LHC でのビームパラメータ [6]

パラメータ	現行 LHC	HL-LHC
陽子エネルギー [TeV]	7	7
1 バンチあたりの陽子数 N_b	1.15×10^{11}	2.2×10^{11}
交差角 θ_c [μrad]	285	590
幾何学的損失係数 R (括弧内はクラブ空洞無し)	0.836	0.829 (0.305)
衝突点における振幅 β^* [m]	285	590
xy 平面のビームの広がり ε_n [μm]	3.75	2.50
1 交差あたりの事象数(パイルアップ)	27	138
パイルアップ密度 [/mm]	0.21	1.25
積分ルミノシティ [$\text{fb}^{-1}/\text{year}$]	45	260

LHC は 2010 年春から本格運転を開始し、長期運転停止期間 (LS: Long Shutdown) を重ねて、ピークリミノシティを設計値である $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の 2 倍まで向上させ、データ取得を行っていく予定である。さらに、2025 年-2027 年における長期運転停止期間 (LS3) において LHC のアップグレードを行い、瞬間ルミノシティを現行 LHC の設計値の 5-7 倍にまで増加させる。

表 1.2 に現行 LHC と HL-LHC で予定されている主なビームパラメータをまとめた。式 (1.1) より、瞬間ルミノシティを増大させるには、ビーム電流 (N_b, n_b) を増強し、衝突点でのビームサイズ (ε_n, β^*) を絞り、交差角 θ_c による幾何学的損失係数 R をできるだけ大きくするよう設計する必要がある。そのため、HL-LHC ではルミノシティを大幅に向上させるために以下のような改良を計画している。

- LHC に入射する陽子ビームの強度と輝度を向上させるため、前段加速器の各機器 (Linac4, PSB, PS, SPS) について更新・アップグレードを実施
- 衝突点でのビームサイズを絞る(衝突点における振幅 β^* を減少)ため、ATLAS、CMS の衝突点周囲の挿入部に新たに高磁場の磁石を実装
- 幾何学的損失係数 R を現行 LHC と同程度に保つため、衝突点のクラブ空洞⁴を導入

1.4.2 HL-LHC physics

素粒子のところと内容を合わせる。
統計量がどれくらい必要で、それが再現できる？

⁴ 「クラブ空洞」とは、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で開発された特殊な超伝導空洞で、電子・陽電子ビームのバンチを回転させることにより、より高いルミノシティを達成することを目指して開発された技術である。[7]

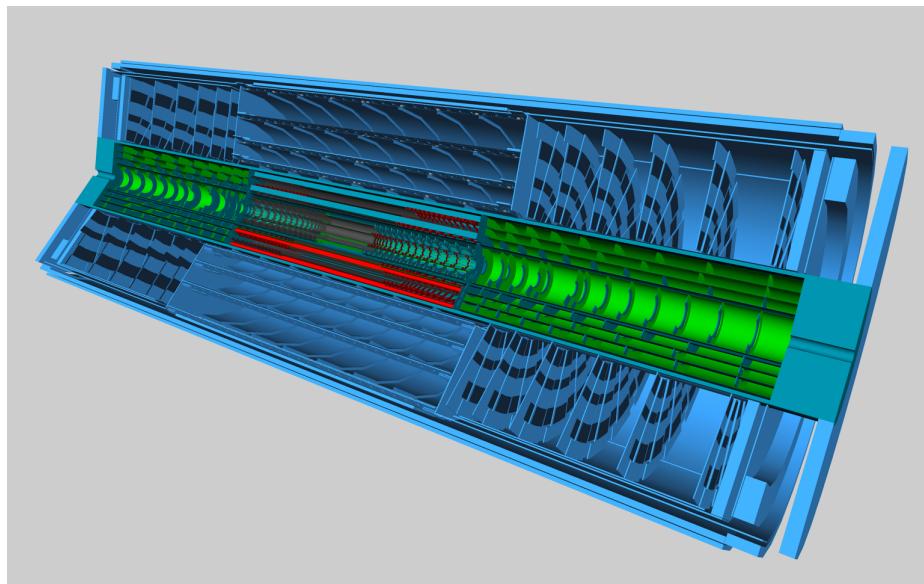


図 1.9 ITk の断面図 [8]。

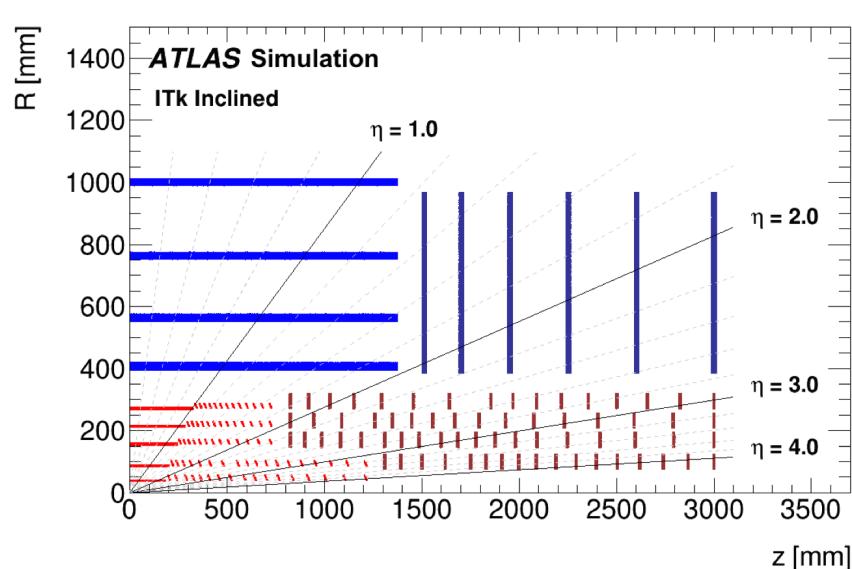


図 1.10 ITk の断面図 [8]。

1.4.3 内部飛跡検出器のアップグレード

HL-LHC アップグレードに伴い、ATLAS でもアップグレードが予定されており、

2 第2章

3 シリコンピクセル検出器

4 本研究で使用するピクセル検出器は、シリコンを用いた半導体検出器である。本章では、半導体検出器
5 の一般論と、ATLAS 実験で用いられているピクセル検出器、および HL-LHC で用いられる新型ピクセ
6 ル検出器について説明する。

7 2.1 半導体検出器の一般論

8 結晶構造を持つ物質は、その電気的な性質から導体、半導体、絶縁体に大別される。

9 2.2 ピクセル検出器

10 2.3 現行ピクセル検出器

1 2.4 新型ピクセル検出器

² 第3章

³ 現行ピクセルモジュールの電荷較正

⁴ 3.1 チューニング

⁵ 3.2 電荷較正

¹ 3.3 電荷較正における問題点

² 第4章

³ 電荷補正の最適化

⁴ 4.1 これまでの補正方法

⁵ 4.2 電荷較正の補正

⁶ 4.3 データが欠陥した際の補正

¹ 4.4 本章のまとめ

² 第5章

³ 新型ピクセル検出器の開発

⁴ 5.1 新型ピクセル検出器の組み立て工程

⁵ 5.2 品質試験

¹ 5.3 量産における試験結果管理

² 第6章

³ データベースシステムの概要

⁴ 6.1 量産に用いるデータベースの概要

¹ 6.2 本研究における開発項目

2 第7章

3 試験結果データ管理システムの開発

4 7.1 ピクセル検出器情報の登録

5 7.2 試験結果の管理

6 7.3 試験結果のアップロード・ダウンロード

1 7.4 試験結果の評価

₂ 第8章

₃ まとめ

₄ 8.1 まとめ

₁ 8.2 今後の課題

₂ 付録 A

₁ AppendixA

2 参考文献

- 3 [1] "The CERN accelerator complex" , <https://cds.cern.ch/images/>
4 OPEN-PHO-ACCEL-2013-056-1 CERN Document Server
- 5 [2] Joao Pequenao. Computer generated image of the whole ATLAS detector. Mar 2008.
- 6 [3] "Study of the material of the ATLAS inner detector for Run 2 of the LHC", <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/PERF-2015-07/ATLASCollaboration>
- 7 [4] "Computer Generated image of the ATLAS calorimeter", <https://cds.cern.ch/images/CERN-GE-0803015-01>
- 8 [5] <https://hilumilhc.web.cern.ch/content/hl-lhc-project>
- 9 [6] "The High-Luminosity upgrade of the LHC: Physics and Technology Challenges for the Accelerator and the Experiments", <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/706/2/022002/pdf>
- 10 [7] "", <https://www2.kek.jp/ja/news/topics/2007/crab.html>
- 11 [8] "ATLAS Inner Tracker Pixel Detector Technical Design Report", <https://cds.cern.ch/record/2285585/files/ATLAS-TDR-030.pdf>

2 謝辞

1 shaji

2 図目次

3	1.1	ATLAS 検出器	2
4	1.2	ATLAS 検出器	3
5	1.3	ATLAS 検出器	4
6	1.4	Composite	4
7	1.5	Gradation	4
8	1.6	ATLAS 検出器	5
9	1.7	ATLAS カロリメータ	6
10	1.8	LHC の運転計画	7
1	1.9	ITk の断面図	9

2 表目次

3	1.1	IBL、ピクセル検出器の配置	5
275	1.2	HL-LHC でのビームパラメータ	8