

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 12 月 8 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]	1
5 1.2 LHC	4
6 1.3 ATLAS 実験	6
7 1.4 HL-LHC アップグレード	11
8 第 2 章 シリコンピクセル検出器	15
9 2.1 半導体検出器の一般論	15
10 2.2 ピクセル検出器	15
11 2.3 現行ピクセル検出器	15
12 2.4 新型ピクセル検出器	15
13 第 3 章 現行ピクセルモジュールの電荷較正	16
14 3.1 チューニング	16
15 3.2 電荷較正	16
16 3.3 電荷較正における問題点	16
17 第 4 章 電荷補正の最適化	17
18 4.1 これまでの補正方法	17
19 4.2 電荷較正の補正	17
20 4.3 データが欠陥した際の補正	17
21 4.4 本章のまとめ	17
22 第 5 章 次世代ピクセル検出器の量産	18
23 5.1 次世代ピクセル検出器の組み立て部品	18
24 5.2 次世代ピクセル検出器の組み立て工程	20
25 5.3 品質試験	21
26 5.4 量産における試験結果管理	21
27 第 6 章 データベースシステムの概要	22
28 6.1 量産に用いるデータベースの概要	22
29 6.2 本研究における開発項目	22

1	第 7 章	試験結果データ管理システムの開発	23
2	7.1	ピクセル検出器情報の登録	23
3	7.2	試験結果の管理	23
4	7.3	試験結果のアップロード・ダウンロード	23
5	7.4	試験結果の評価	23
6	第 8 章	まとめ	24
7	8.1	まとめ	24
8	8.2	今後の課題	24
9	付録 A	AppendixA	25
10	参考文献		26
11	謝辞		27

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。本章では LHC-ATLAS 実験と
⁸ 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 [1]

¹⁰ 物質を構成する最小の粒子は「素粒子」である。素粒子物理学を通して、自然界に存在する粒子やそれ
¹¹ らの粒子がどのように相互作用するかを理解することができる。

¹² 現在、素粒子物理を考える枠組みとして、標準模型 (SM: Standard Model) がある。標準模型は 1970
¹³ 年代に確立された理論であり、2012 年の Higgs 粒子の発見を最後に、標準模型から予測される粒子が全
¹⁴ て揃った。

¹⁵ 本説では、標準模型の概要と、標準模型からは説明できない理論について説明する。

¹⁶ 1.1.1 標準模型の概要

¹⁷ 宇宙に存在する全てのものは、素粒子と呼ばれる 17 種類の粒子から構成され、4 つの相互作用 (電磁
¹⁸ 相互作用、強い相互作用、弱い相互作用、重力相互作用) により記述されている。表 1.1、表 1.2 に標準模
¹⁹ 型に登場する素粒子を示す。

²⁰ 物質を構成する粒子はフェルミオンに分類される。フェルミオンとは整数から $1/2$ だけずれた値のス
²¹ ピンを持つ粒子の総称であり、標準模型に含まれるフェルミオンは全て $1/2$ のスピンを持つ。物質を構成
²² する粒子は、強い相互作用をするかどうかでクォークとレプトンに分類される。クォークは強い相互作用
²³ から自然界に単独で存在することができず、ハドロンというクォークの集合体で自然界に存在する。3 つ
²⁴ のクォークから構成されるハドロンをバリオン、クォークとその反クォークのペアから構成されるハドロ
²⁵ ンをメソンと呼ぶ。一方で、レプトンは強い相互作用の影響を受けないことから、単独で自然界に存在す
²⁶ ることができる。

²⁷ 力を媒介する粒子はボソンに分類される。ボソンとは整数値のスピンを持つ粒子の総称である。素
²⁸ 粒子の間に働く力には、強い力、弱い力、電磁気力、重力の 4 種類があり、標準模型では、強い相互作

表 1.1 標準模型での物質の構成粒子

	世代	名称	表記	電荷 [eV]	スピン	質量 [GeV]
クォーク	第一世代	アップクォーク	u	+2/3	1/2	$2.3_{-0.5}^{+0.7} \times 10^{-3}$
		ダウンドクォーク	d	-1/3	1/2	$4.8_{-0.3}^{+0.7} \times 10^{-3}$
	第二世代	チャームクォーク	c	+2/3	1/2	1.275 ± 0.025
		ストレンジクォーク	s	-1/3	1/2	$(95 \pm 5) \times 10^{-3}$
	第三世代	トップクォーク	t	+2/3	1/2	$173.21 \pm 0.51 \pm 0.71$
		ボトムクォーク	b	-1/3	1/2	4.18 ± 0.03
レプトン	第一世代	電子ニュートリノ	ν_e	0	1/2	$< 1.1 \times 10^{-9}$
		電子	e	-1	1/2	0.511×10^{-3}
	第二世代	ミューニュートリノ	ν_μ	0	1/2	$< 0.19 \times 10^{-3}$
		ミューイオン	μ	-1	1/2	105.7×10^{-3}
	第三世代	タウニュートリノ	ν_τ	0	1/2	$< 18.2 \times 10^{-3}$
		タウ	τ	-1	1/2	1777×10^{-3}

表 1.2 標準模型での力を伝える粒子

	名称	表記	スピン	電荷 [e]	相互作用	質量 [GeV]
ゲージボソン	光子	γ	1	0	電磁相互作用	$< 1 \times 10^{-27}$
	W 粒子	W^\pm	1	± 1	弱い相互作用	80.379 ± 0.012
	Z 粒子	Z	1	0	弱い相互作用	91.1876 ± 0.0021
	グルーオン	g	1	0	強い相互作用	0
スカラーボソン	ヒッグス粒子	H	0	0	質量を与える	125.7 ± 0.4

- 1 用、弱い相互作用、電磁相互作用が記述される。強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD: Quantum
 2 Chromodynamics) と、弱い相互作用と電磁相互作用を記述するワインバーグ-サラム理論のゲージ場が
 3 組みとなり標準模型が導入され、3つの相互作用はスピン1のゲージボソンによって媒介される。
 4 標準模型では、ゲージ場や基本粒子は質量を持たないものとしてラグランジアンの中に導入され、素粒
 5 子が質量を持つことはゲージ対称性の破れを表す。これは表 1.1、表 1.2 に示すように、素粒子が質量を
 6 持つことと矛盾する。そこで、対称性の破れを起こさせるヒッグス場の存在が提唱された。ヒッグス場は
 7 複素スカラー場で、その真空期待値 $v \sim 250$ GeV が対称性を破るとともに粒子に質量を与える。各粒子
 8 の質量は図 1.1 のように、ヒッグス場との結合定数に比例する。ヒッグス場と粒子の間にあるの相互作用
 9 はスピン0のスカラーボソンであるヒッグス粒子によって媒介される。2012 年のヒッグス粒子の発見^{*1}
 10 を最後に、標準模型から予測される粒子が全て揃った。

1.1.2 標準模型を超えた新物理の探索 [13]

- 12 標準模型を用いて、これまでに行われた素粒子実験のほとんどの結果を矛盾なく説明することができる
 13 る。しかし、標準模型では説明できない実験事実が確認されており、いくつかの点で不十分である。標準

*1 ヒッグス粒子は CERN の LHC で行われている ATLAS 実験と CMS 実験で発見された。

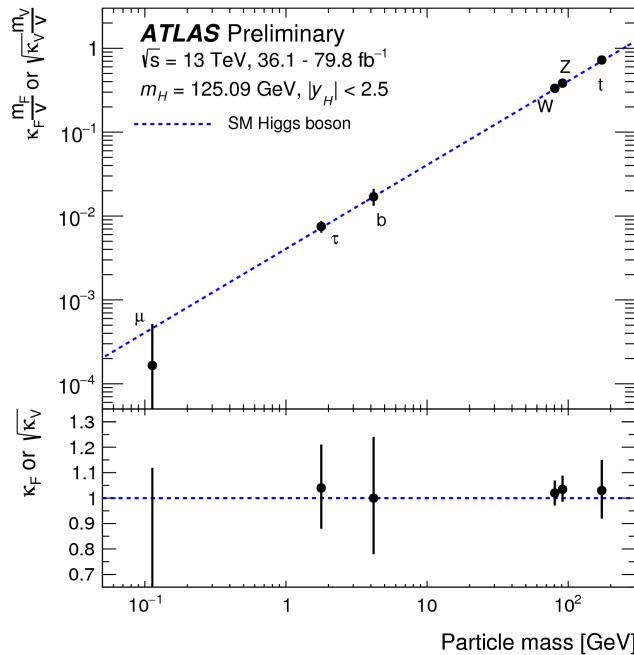


図 1.1 ヒッグス場との結合定数と素粒子の質量 [10]。 $\kappa_F m_F/v$ はフェルミオン ($F = t, b, \tau, \mu$) に対する結合定数を表し、 $\kappa_F m_F/v$ はボソン ($V = W, Z$) に対する結合定数を表す。 v はヒッグス場の真空期待値を表す。

- 1 模型の問題の 1 つとして、暗黒物質が挙げられる。
- 2 暗黒物質が存在することの最も有力で直接的な実験事実は、銀河の回転曲線の測定から得られる。光学分光観測で得られる銀河全体の回転速度の分布は、銀河に含まれる星やガスから得られる物質分布から予想される回転速度よりもはるかに大きな回転速度が得られる。このことから、銀河には光学的な観測にかかる暗黒物質の存在が確認された。他にも、重力レンズ効果などの宇宙観測により、暗黒物質は宇宙全体のエネルギーの約 27% を占めることがわかっており、これは標準模型から得られる物質の約 6 倍の量に相当する。暗黒物質の実態は未だわかっていないが、その候補として WIMP(Weak Interacting Massive Particle) という、弱く相互作用する重くて安定な中性粒子が挙げられる。
- 3 暗黒物質の解明や、標準模型における他の問題を解決するための新たな理論体系として、超対称性 (SUSY: Super Symmetry) 理論がある。超対称性理論では、標準模型の全ての素粒子の対となり、スピニが $1/2$ だけ異なる新たな素粒子が予言され、その中には暗黒物質の候補も含まれる。図 1.2 に超対称性粒子と標準模型の素粒子の対応図を示す。超対称性粒子の中で最も軽いものを LSP(Lightest SUSY Particle) と呼ぶ。
- 4 超対称性理論は標準模型では説明が困難な問題を解決することができる一方で、バリオン数やレプトン数を破る相互作用の存在を避けることができない。バリオン数とレプトン数を破る現象のひとつとして陽子崩壊があるが、このような崩壊は観測されていない。この事実を説明するために、バリオン数とレプトン数を破る崩壊を禁止する R パリティを導入する。R パリティは式 (1.1) のように定義されている。

$$R = (-1)^{3(B-L)} + 2s \quad (1.1)$$

- 18 ここで、 B, L はそれぞれバリオン数、レプトン数であり、 s はスピンである。R パリティは標準模型の粒子では 1 となり、超対称性粒子では -1 となる R パリティの保存から、標準模型の粒子と超対称性粒子

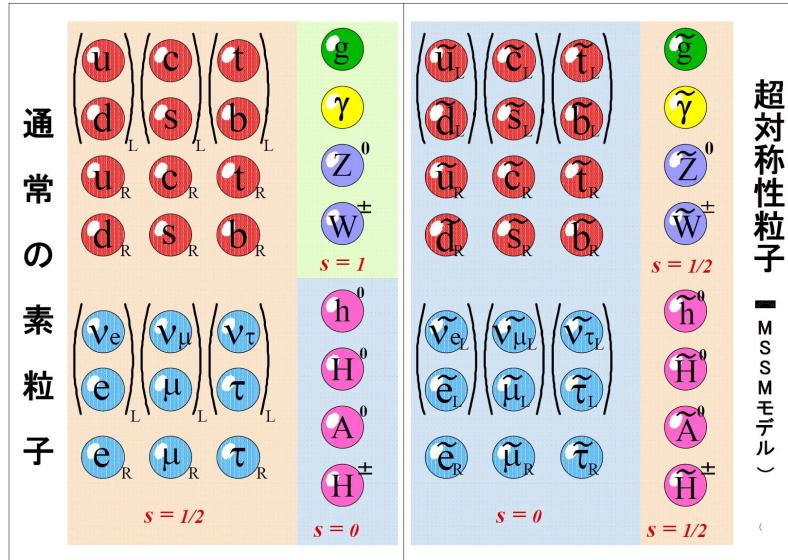


図 1.2 超対称性粒子 [11]

₁ に起こりうる崩壊は以下の 3 通りのみである。

- ₂ • $\text{SM} \rightarrow \text{SM} + \text{SM}$
- ₃ • $\text{SM} \rightarrow \text{SUSY} + \text{SUSY}$
- ₄ • $\text{SUSY} \rightarrow \text{SM} + \text{SUSY}$

₅ ここで、SM は標準模型の粒子、SUSY は超対称性粒子を表す。超対称性粒子の中で最も軽いものである
₆ LSP(Lightest SUSY Particle) はより軽い超対称性粒子が存在しないため、それ以上崩壊するこ
₇ ぎず安定な状態であることがわかる。したがって、中性の LSP は WIMP であり、暗黒物質の候補にな
₈ りうる。

₉ 他にも、超対称性理論の導入により、標準模型では説明できなかった問題が以下のように解決する。

- ₁₀ • 階層性問題の解決
- ₁₁ • B/L 対称性の破れの候補
- ₁₂ • ニュートリノの質量形成のメカニズム
- ₁₃ • 超ひも理論の特徴

₁₄ 1.2 LHC

₁₅ 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
₁₆ 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
₁₇ 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
₁₈ える新物理の探索が LHC の主な目的である。

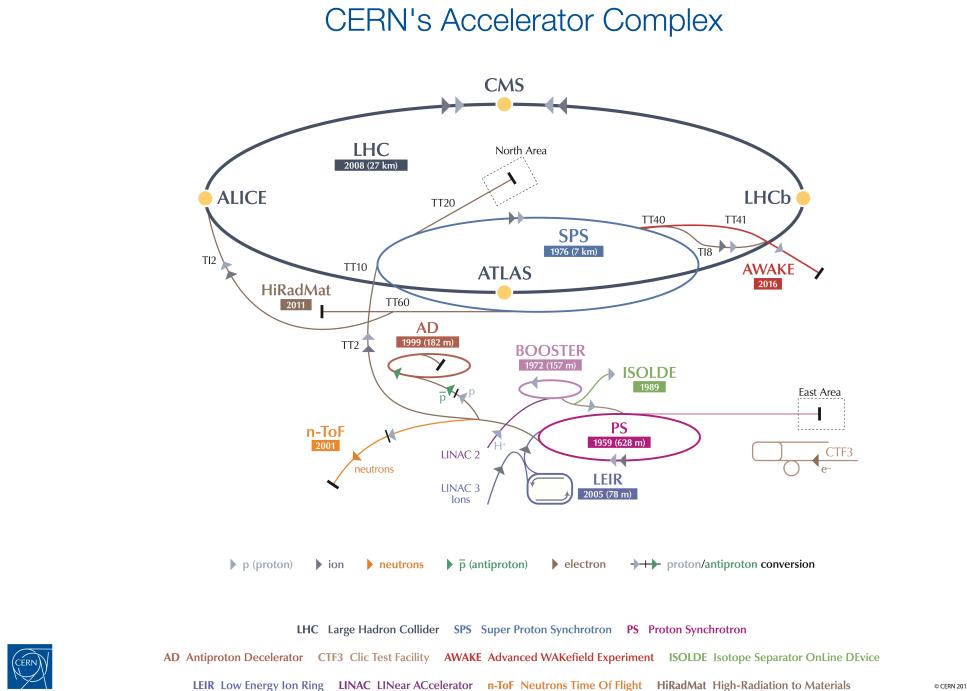


図 1.3 LHC の全体図 [2]

1.2.1 LHC の基本構造

図 1.3 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。

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、 $2 \text{ beams} \times 2808 \text{ bunches} \times 1.15 \cdot 10^{11} \approx 6 \cdot 10^{14}$ 個の陽子を生成する必要がある。

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、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。

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 ATLAS(A Toroidal LHC Apparatus)、CMS(Compact Muon Solenoid)、ALICE(A Large Ion Collider Experiment)、LHCb 実験が行われている。

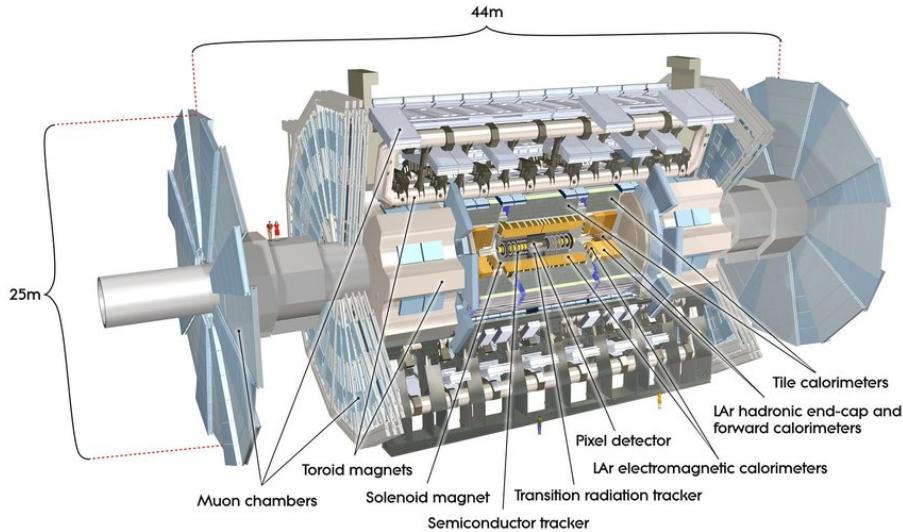


図 1.4 ATLAS 検出器の全体図 [3]

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 (1.2) で与えられる。

$$L = \gamma_r \frac{N_b^2 n_b f_{rev}}{4\pi \varepsilon_n \beta^*} R \quad (1.2)$$

- 2 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による係数であり、式 (1.3) で表される。

$$R = \left(1 + \left(\frac{\theta_c \sigma_z}{2\sigma^*} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (1.3)$$

- 6 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^* は衝突時におけるバンチ幅の標準偏差である。
- 8 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 を用いて式 (1.4) のように表すことができる。

$$N_{event} = \int L dt \sigma \quad (1.4)$$

1.3 ATLAS 実験

- 11 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 1.4 に示すように、
- 12 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

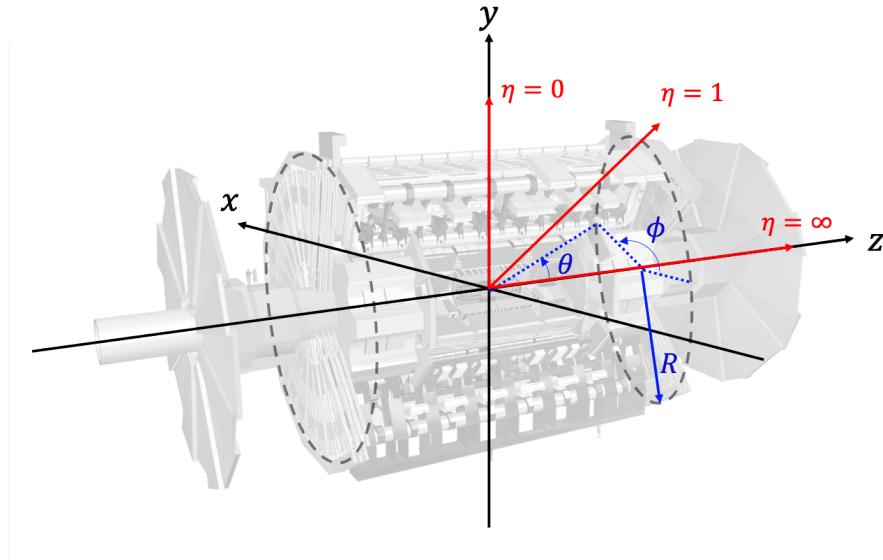


図 1.5 ATLAS 検出器で使用される座標系 [3]

- 1 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。

4 1.3.1 ATLAS 実験で使用される座標系

- 5 ATLASにおいて粒子の位置・運動量を示すために、図 1.5 のような直交座標系 (x, y, z) および円筒座
- 6 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
- 7 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 軸が正の領域を A-side、負の領域を C-side と呼ぶ^{*2}。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
- 8 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
- 9 式 (1.5) のように定義する。
- 10

$$\eta \equiv -\ln \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (1.5)$$

- 11 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
- 12 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
- 13 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
- 14 ($|\eta| \geq 1.0$) と呼ぶ。

15 1.3.2 内部飛跡検出器

- 16 図 1.6 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
- 17 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

^{*2} 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

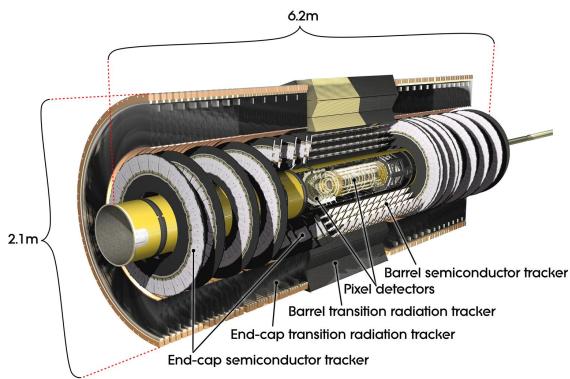


図 1.6 Composite

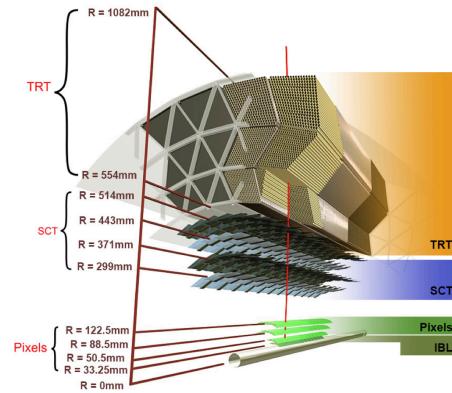


図 1.7 Gradation

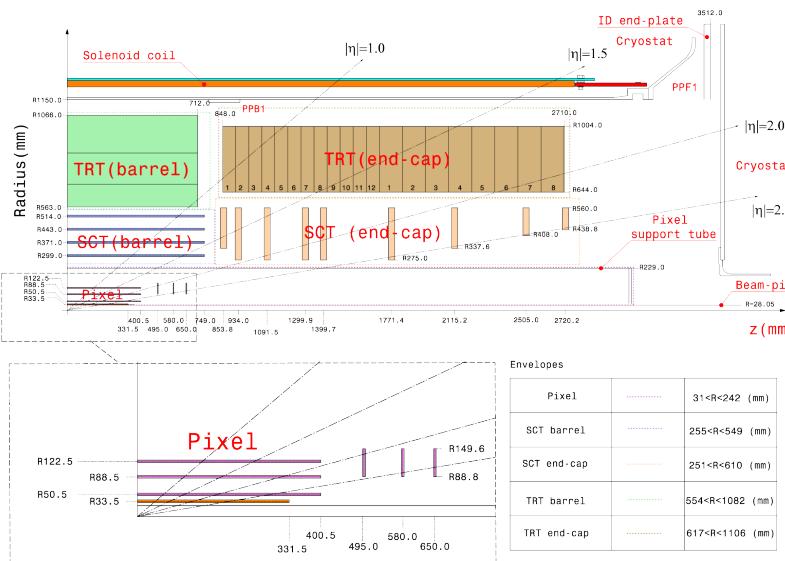


図 1.8 ATLAS 検出器の全体図 [4]

- 1 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。

3 IBL、ピクセル検出器

4 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
5 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
6 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 1.3 に示す。

7 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
8 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
9 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
10 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
11 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
12 ASIC の詳細については 2.3 節に示す。

表 1.3 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 $					

1.3.1 ストリップ検出器

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。

1.3.2 遷移放射検出器

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) 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 CO₂ と 3% の O₂ 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 μm 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 1.9 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と位置の測定、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^{*3}、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

^{*3} 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。

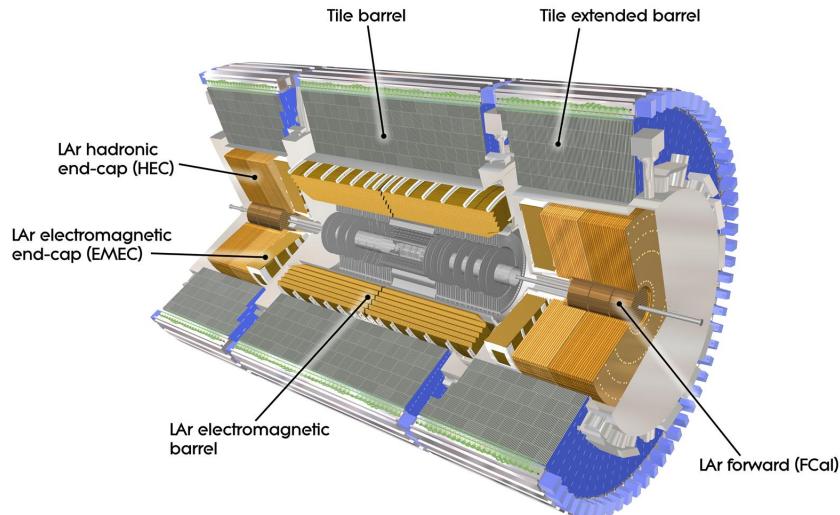


図 1.9 カロリメータの全体図 [5]

- ¹ 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 $20X_0^{*4}$ 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 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 ($1.5 < |\eta| < 3.2$) 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。

⁸ 1.3.4 ミューオン検出器

- ⁹ 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 ($\sim 2.2 \mu\text{sec}$) 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) までのミューオンの運動量を測定できるよう設計されている。

- ¹⁰ 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、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 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) を用いてミューオンの通過位置測定を行う。



図 1.10 2021 年 1 月に作成された LHC の運転計画 [6]。2025 年

1.4 HL-LHC アップグレード

図 1.10 に LHC の運転計画を示す。LHC では、2025 年から **HL-LHC**(High Luminosity LHC) アッ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 $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 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 までで取得予定である 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

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、ピークル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 1.5 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 (1.2) 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いくつかの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,

*4 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。

表 1.4 HL-LHC でのビームパラメータ [7]

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

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^{*5}を導入

1.4.2 内部飛跡検出器のアップグレード

HL-LHCにおいて、ATLASはこれまでよりもさらに過酷な放射線環境下に晒される。瞬間ルミノシティが現行 LHC の設計値の 5-7 倍にまで増加するため、現行の ATLAS を用いて HL-LHC の環境下において測定を行うと主に二つの問題が生じると予想される。

- 瞬間ルミノシティが大きくなることにより、バンチ衝突あたりの生成粒子数が増加し放射線損傷の影響がより大きくなる。検出器のセンサーが放射線損傷を受けると、型変換^{*6}等が原因で検出効率が低下するため、より高い放射線耐性を持つ検出器が要求される。
- 各検出器のヒット占有率の増加である。HL-LHC では、パイルアップが 200 まで増加すると予想されており内部飛跡検出器での飛跡の数が増加することで、飛跡の識別が困難になり、再構成の性能が大幅に低下する。特に、荷電粒子への感度が高いガス検出器である TRT では検出器の占有率が 100% に達してしまうと予想されている。そのため、HL-LHCにおいてはよりパイルアップ耐性が高い検出器が必要となる。

以上の理由により、ATLAS の衝突点に最も近い検出器である内部飛跡検出器の総入れ替えを計画している。HL-LHCのために開発されている、新たな内部飛跡検出器を ITk(Inner Tracker) と呼ぶ。ITk のデザインを図 1.11 に示す。ITk は全てシリコン半導体検出器から構成され、図 1.12 に示すように、TRT は廃止され、内側にピクセル検出器、外側にストリップ検出器が配置されている。ピクセル検出器はバレル部の 5 層とエンドキャップ部の層、ストリップ検出器はバレル部の 4 層とエンドキャップ部の 6 層

*5 「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。[8]

*6 ??参照

表 1.5 HL-LHC でのビームパラメータ [7]

パラメータ	現行 IBL	ITk
ピクセルサイズ [μm^2]	7	7
読み出しデータレート 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(パイアルアップ)	27	138
パイアルアップ密度 [/mm]	0.21	1.25
積分ルミノシティ [$\text{fb}^{-1}/\text{year}$]	45	260

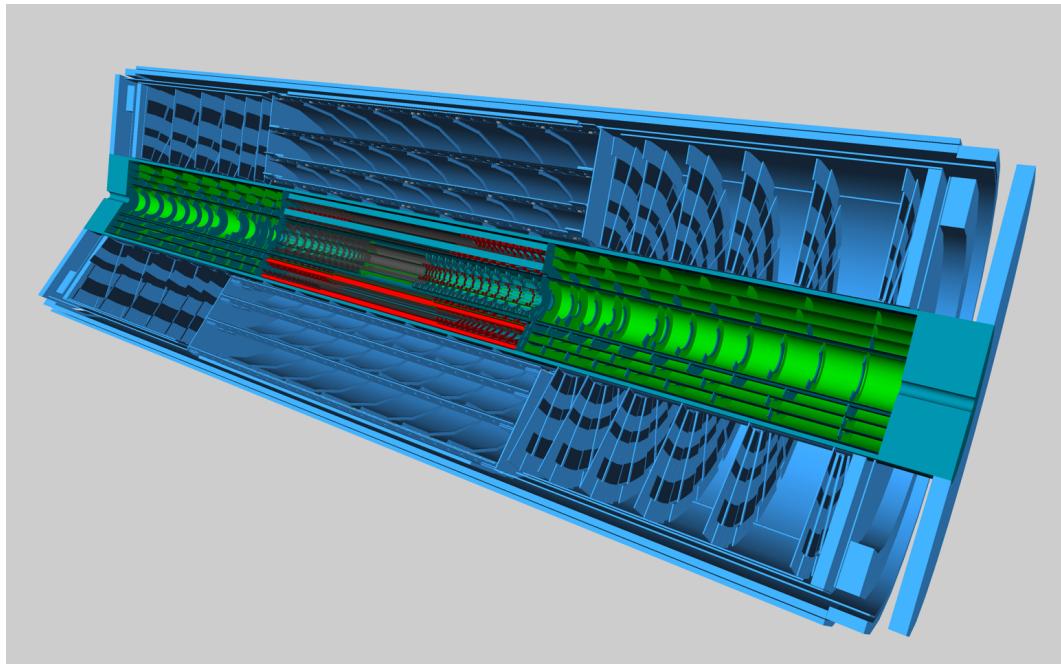


図 1.11 ITk の断面図 [9]。

- 1 から構成され、ITk 全体で $|\eta| < 4$ の領域を覆うように配置されている。
 2 上で挙げた、放射線損傷についての問題を解消するために、ピクセル検出器に新たな半導体センサーを
 3 導入する。特に、放射線の影響が大きくなるバ렐部の最内層では高放射線耐性を持つ 3D センサーを使
 4 用することが予定されている。ヒット占有率の問題については、センサーの厚みを薄くし、ピクセルサイ
 5 ズを現行ピクセルの $1/5$ にすることにより、ヒット占有率を抑えることが期待される。さらに、1 衝突あ
 6 たりのパイアルアップが高くなることから、読み出しシステムの高速化も必要となる。
 7 このようなアップグレードを行うことにより、HL-LHC における高い瞬間ルミノシティ環境下におい
 8 ても、低いフェイクレート⁷や高い飛跡再構成効率を実現することができる。現行 LHC の検出範囲外で
 9 あつた $2.7 < |\eta|$ が検出可能になることにより、フェイクレートを抑えつつ、3 GeV 以上のミューオンを

⁷ fake

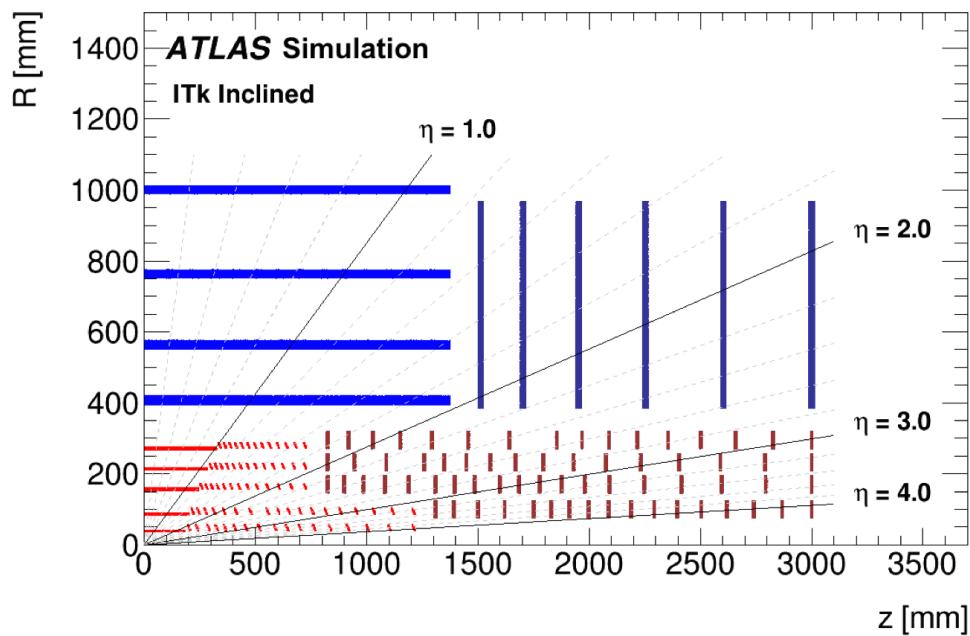


図 1.12 ITk の断面図 [9]。

₁ 99% 以上の効率で検出、さらには 1 GeV 以上の電子やパイオニアを 85% 以上の効率で検出可能となる。

₂ 1.4.3 HL-LHC physics

₃ 図 1.10 にある運転計画のように、LHC では 2010 年の運転開始から統計をため、積分ルミノシティは
₄ RUN1 の終了時において 30 fb^{-1} 、RUN2 の終了時において 190 fb^{-1} となっている。

¹ 第2章

² シリコンピクセル検出器

³ 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
⁴ 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
⁵ ル検出器について説明する。

⁶ 2.1 半導体検出器の一般論

⁷ 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。

⁸ 2.2 ピクセル検出器

⁹ 2.3 現行ピクセル検出器

¹⁰ 2.4 新型ピクセル検出器

¹ 第3章

² 現行ピクセルモジュールの電荷較正

³ 3.1 チューニング

⁴ 3.2 電荷較正

⁵ 3.3 電荷較正における問題点

¹ 第4章

² 電荷補正の最適化

³ 4.1 これまでの補正方法

⁴ 4.2 電荷較正の補正

⁵ 4.3 データが欠陥した際の補正

⁶ 4.4 本章のまとめ

1 第5章

2 次世代ピクセル検出器の量産

3 ～と同時に、HL-LHC アップグレードに向けた内部飛跡検出器の総入れ替えのため、次世代ピクセル
 4 検出器の開発が進められている。現在、ITk に搭載するピクセル検出器量産の各組み立て工程における試
 5 験やそのシステムの確立のため、試作器を用いたデモンストレーションが行われている。

6 日本では新型器量産の際に約 2000 個のモジュールを生産する予定である。新型器の量産の際に、効率
 7 の良い量産と統合されたモジュール選定を行うため、品質試験結果を統合管理するシステムの開発が必要
 8 となる。

9 5.1 次世代ピクセル検出器の組み立て部品

10 量産工程は、各組み立て機間に届いたセンサーと ASIC から作られるベアモジュールとフレキシブル基
 11 板の接着から始まる。本節では各部品の詳細について説明する。

12 5.1.1 ベアモジュール

13 ベアモジュールはセンサーと ASIC をバンプ接合することにより作られる。クアッドモジュールではセ
 14 ンサー 1 枚に対して ASIC4 枚、トリプレットモジュールではセンサー 1 枚に対して ASIC 1 枚から構成
 15 される。ベアモジュールは通過する粒子を検出する、モジュールの中でも重要な部品である。センサーを
 16 通過した荷電粒子は電子・ホール対を生成し、それにより得られる信号を ASIC を用いて増幅・整形を行
 17 う。図 5.1 にベアモジュールの全体図を示す。

18 5.1.2 フレキシブル基板

19 フレキシブル基板はセンサーの裏側（図 5.1 ので見えている面）に接着され、
 20 フレキシブル基板は、以下の 3 つの役割を持つ。

- 21 • ASIC からの信号輸送

22 センサーから得られた信号は ASIC で増幅・整形され、フレキシブル基板に送られてくる。フレキ
 23 シブル基板は送られてきた信号を後段の PC へ送る。

- 24 • 電源の供給

25 外部からの電源を、センサーと ASIC に供給する。センサーには、空乏領域を増加させるために
 26 100 V 程度の HV(High Voltage) をかける。ASIC には、電源供給のために 5.6 V 程度の LV(Low

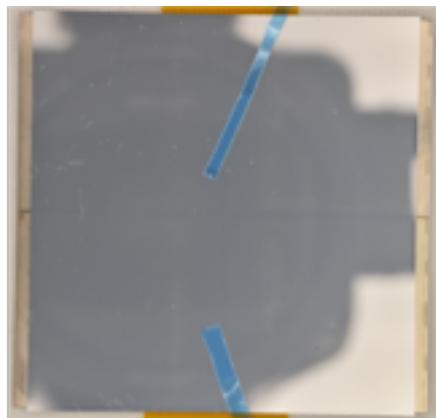


図 5.1 ベアモジュールの全体図。センサー側から見たものであり、左右に ASIC がはみ出している。これはフレキシブル基板につながるワイヤーのためのパッドが存在する部分である。



図 5.2 フレックス基板の全体図。

Voltage)

- モジュールの制御システム (DCS: Detector Control System)

モジュールの温度測定のために 2 つの NTC(Negative Temperature Coefficient) が配置されている。

5.1.3 モジュールキャリア

モジュールキャリアはモジュールの運搬の際や品質試験を行う際に、モジュールを保護用の容器である。組み立てられたモジュールは ASIC とフレックス基板を繋ぐワイヤー部やセンサーの部分等が剥き出しになっているため、そのままの状態で品質試験を行うのはモジュール破損のリスクを伴う。モジュールキャリアでモジュールを保護することにより、安全に品質試験を行うことができる。

また、モジュールキャリアの別の役割として、モジュール周囲の湿度環境を一定に保つことが挙げられる。運転時に想定される最低温度は -45°C のため、品質管理試験ではペルチェ素子を用いた温度制御装

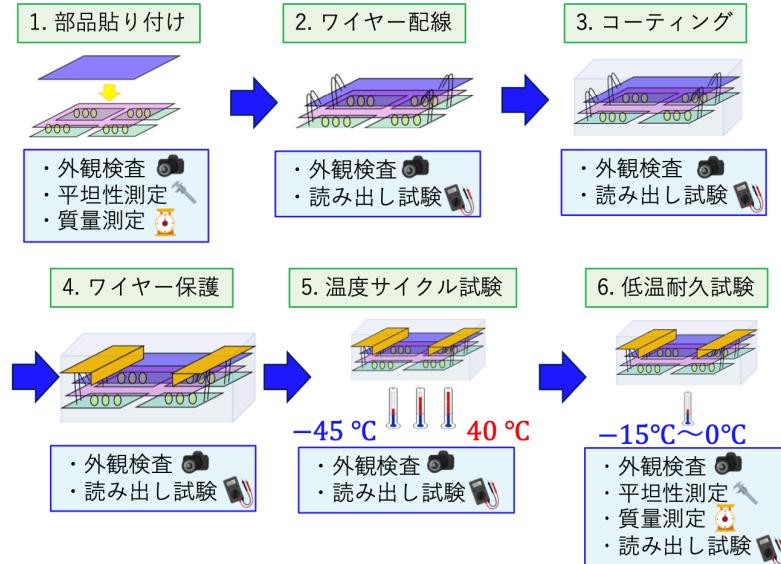


図 5.3 ATLAS 検出器の全体図 [4]

- 1 置^{*1}を用いて -45°C までモジュールの周囲温度を下げる。その際、モジュールへの結露を防ぐための結
2 露を防ぐためキャリア内に乾燥窒素ガスを流し込むことで氷点下においてもモジュールへの結露を防いで
3 いる。

5.2 次世代ピクセル検出器の組み立て工程

- 5 次世代ピクセル検出器の組み立て工程を図 5.3 に示す。組み立て工程ではフレキシブル基板とベアモ
6 ジュールの接着から始まり、ワイヤー配線、パリレン高分子によるコーティング、ワイヤー保護を行いピ
7 クセルモジュールが完成する。その後、温度サイクル試験および低温耐久試験において、運転時に想定さ
8 れる温度環境において組み立てたモジュールが運用できるかの試験を行う。本節では、組み立て工程、お
9 よびモジュールの温度耐久についての試験についての説明を示す。

10 ベアモジュール・フレキシブル基板の接合

- 11 モジュールの組み立て工程は、組み立て機関に輸送されたベアモジュールとフレキシブル基板の接合か
12 ら始まる。輸送された各部品の外観検査等の受け取り時の試験を行った後、ベアモジュールとフレキシブル
13 基板の接合を行う。接合の後、モジュールの外観検査・平坦性測定・質量測定を行う。

14 ワイヤー配線

- 15 フレキシブル基板からセンサーおよび ASIC への電圧の供給や、ASIC からの信号を読み出すため、フ
16 レキシブル基板とセンサーおよび ASIC 間をワイヤーで接続する。

17 パリレンコーティング

- 18 モジュールのセンサーと ASIC の端の部分での放電を防ぐこと、湿気や化学物質からの保護を目的とし
19 てパリレンコーティングを行う。パリレンはパラキシリレン系ポリマーの略である。パリレンは結晶性が

*1 KEK における次世代ピクセル検出器の量産では、東工大を中心に関発している温度制御システムを用いる。

- 1 高く絶縁耐力に優れ、周波数に依存せず低い誘電率・誘電正接特性を持っており、湿気や腐食性ガスへの
- 2 耐性も併せ持つ。

3 ワイヤー保護

- 4 ワイヤーは直径 25 μm のため、非常に細い。

5 温度サイクル

- 6 組み立てたモジュールに対して、ITk 実装後にされる特異的な温度変化のサイクルを行い、その後もモ
- 7 ジュールが正常な応答をするか試験をする。温度変化の際、フレキシブル基板にたわみが生じ、それが原
- 8 因でバンプ接合部に剥がれが生じてしまうことがある。このようない温度サイクルによるモジュールの損傷
- 9 がないことを確認する必要がある。

10 温度サイクルは、動作温度範囲 $-45^{\circ}\text{C} < T < 40^{\circ}\text{C}$ で 100 サイクル以上、 $-55^{\circ}\text{C} < T < 60^{\circ}\text{C}$ を
11 1 サイクルである。

12 低温耐久試験

13 ITk 運転におけるピクセル検出器の周囲温度は $-15^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$ である。組み立てたモジュールが
14 低温環境下において長時間正常に動作することを確認する試験が低温耐久試験である。低温耐久試験で
15 は、温度制御筐体を用いてモジュールの周囲温度を -15°C に保ちつつ ASIC の回路読み出し試験を行
16 う。読み出し試験は 1 時間に 1 度行われる。

17 長時間放置しつつ読み出し試験を行うため、インターロックシステム、機器の遠隔制御、温度制御筐体
18 の遠隔監視等の技術が必要となる。

1 5.3 品質試験

2 5.3.1

3 5.4 量産における試験結果管理

4 第6章

1 データベースシステムの概要

2 6.1 量産に用いるデータベースの概要

3 6.2 本研究における開発項目

4 第7章

5 試験結果データ管理システムの開発

6 7.1 ピクセル検出器情報の登録

1 7.2 試験結果の管理

2 7.3 試験結果のアップロード・ダウンロード

3 7.4 試験結果の評価

4 第8章

1 まとめ

2 8.1 まとめ

1 8.2 今後の課題

² 付録 A

³ AppendixA

参考文献

- [1] ” 大学院 素粒子物理学 1 素粒子の基本的性質 ”
 南部陽一郎・木下東一郎・牧二郎・中西襄・政池明、講談社サイエンティフィック
- [2] ” The CERN accelerator complex ” ,
<https://cds.cern.ch/images/OPEN-PHO-ACCEL-2013-056-1> CERN Document Server
- [3] Joao Pequenao. Computer generated image of the whole ATLAS detector. Mar 2008.
- [4] ”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>
- [5] ”Computer Generated image of the ATLAS calorimeter”, <https://cds.cern.ch/images/CERN-GE-0803015-01>
- [6] <https://hilumilhc.web.cern.ch/content/hl-lhc-project>
- [7] ”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>
- [8] ””, <https://www2.kek.jp/ja/news/topics/2007/crab.html>
- [9] ”ATLAS Inner Tracker Pixel Detector Technical Design Report”, <https://cds.cern.ch/record/2285585/files/ATLAS-TDR-030.pdf>
- [10] ATLAS Collaboration. “Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 80 fb-1 of protonproton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV collected with the ATLAS experiment”. CERN Document Server. 2019-9 更新. <http://cdsweb.cern.ch/record/2629412/>, (2021-1)
- [11] <https://atlas.kek.jp/main/movie/photos/physics/index.html>
- [12] <https://home.cern/science/physics/dark-matter>
- [13] <https://arxiv.org/pdf/hep-ph/0404175.pdf>

2 謝辞

3 shaji

4 図目次

5	1.1	ヒッグス場との結合定数と素粒子の質量	3
6	1.2	超対称性粒子	4
7	1.3	LHC の全体図	5
8	1.4	ATLAS 検出器	6
9	1.5	ATLAS 検出器	7
10	1.6	Composite	8
11	1.7	Gradation	8
12	1.8	ATLAS 検出器	8
13	1.9	ATLAS カロリメータ	10
14	1.10	LHC の運転計画	11
15	1.11	ITk の断面図	13
16	1.12	ITk の断面図	14
1	5.1	ベアモジュール	19
2	5.2	フレックス基板	19
3	5.3	ATLAS 検出器	20

4 表目次

5	1.1	標準模型での物質の構成粒子	2
6	1.2	標準模型での力を伝える粒子	2
449	1.3	IBL、ピクセル検出器の配置	9
450	1.4	HL-LHC でのビームパラメータ	12
451	1.5	HL-LHC でのビームパラメータ	13