

¹ ATLAS ピクセル検出機の電荷補正方法の最適化と
² 新型ピクセル検出機量産の品質試験結果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 31 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	6
8 第 2 章 シリコンピクセル検出器	7
9 2.1 半導体検出器の一般論	7
10 2.2 ピクセル検出器	7
11 2.3 現行ピクセル検出器	7
12 2.4 新型ピクセル検出器	7
13 第 3 章 現行ピクセルモジュールの電荷較正	8
14 3.1 チューニング	8
15 3.2 電荷較正	8
16 3.3 電荷較正における問題点	8
17 第 4 章 電荷補正の最適化	9
18 4.1 これまでの補正方法	9
19 4.2 電荷較正の補正	9
20 4.3 データが欠陥した際の補正	9
21 4.4 本章のまとめ	9
22 第 5 章 新型ピクセル検出器の開発	10
23 5.1 新型ピクセル検出器の組み立て工程	10
24 5.2 品質試験	10
25 5.3 量産における試験結果管理	10
26 第 6 章 データベースシステムの概要	11
27 6.1 量産に用いるデータベースの概要	11
28 6.2 本研究における開発項目	11

1	第 7 章	試験結果データ管理システムの開発	12
2	7.1	ピクセル検出器情報の登録	12
3	7.2	試験結果の管理	12
4	7.3	試験結果のアップロード・ダウンロード	12
5	7.4	試験結果の評価	12
6	第 8 章	まとめ	13
7	8.1	まとめ	13
8	8.2	今後の課題	13
9	付録 A	AppendixA	14
10	参考文献		15
11	謝辞		16

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 HC 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、

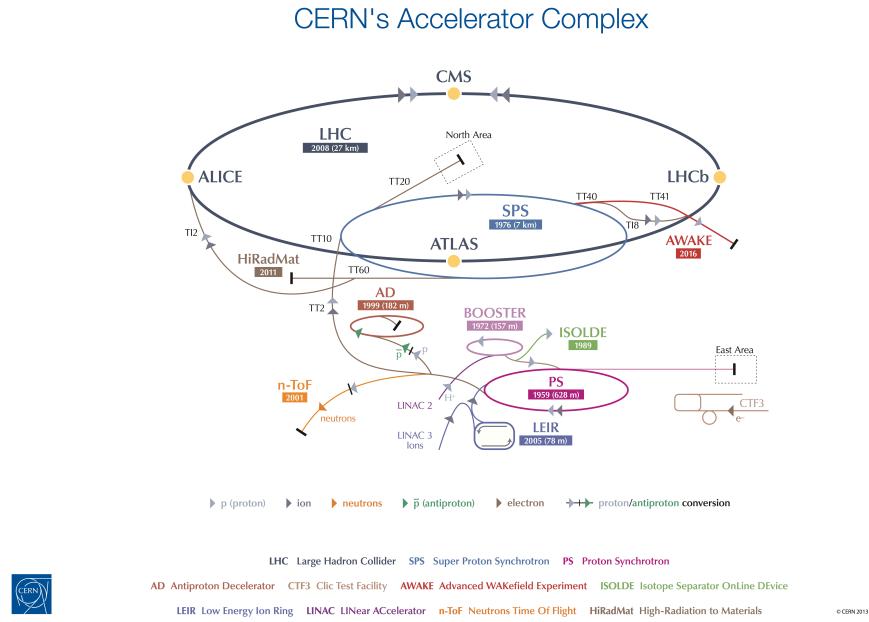


図 1.1 LHC の全体図 [1]

- 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。

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

- 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。 F 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。

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

- 13 ここで、 θ_c は衝突時ビーム交叉角、 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。

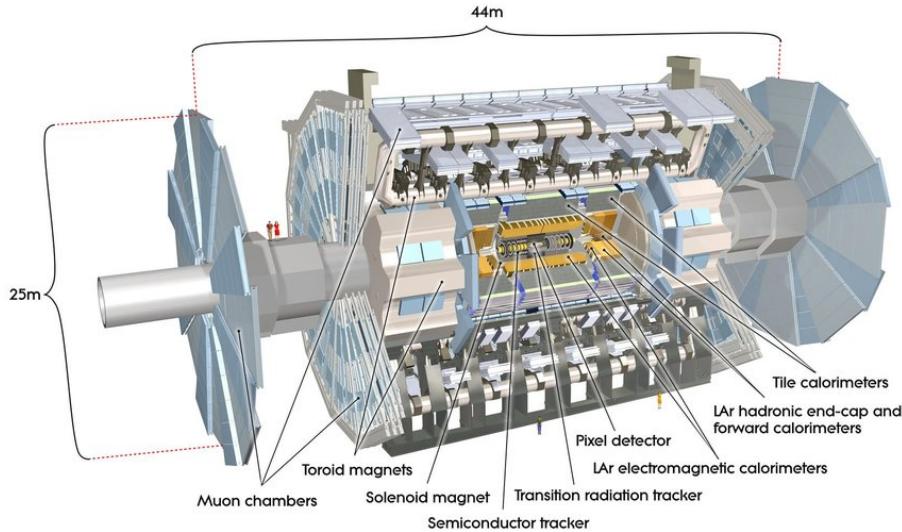


図 1.2 ATLAS 検出器の全体図 [2]

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 実験は 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 内部飛跡検出器

11 図 1.3 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
12 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
13 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。

15 IBL、ピクセル検出器

16 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
17 最内層に配置されている。IBL はバ렐部に 1 層配置され、ピクセル検出器はバ렐部が 3 層、エンド
18 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。
19 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
20 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

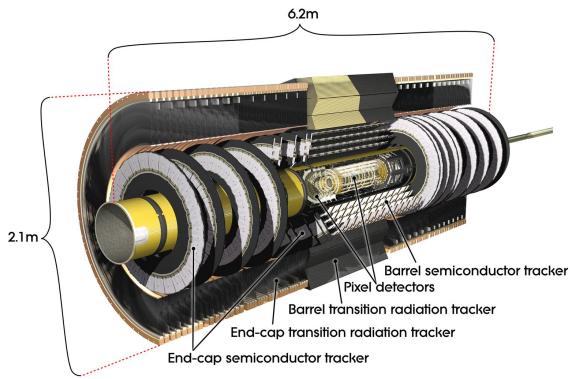


図 1.3 Composite

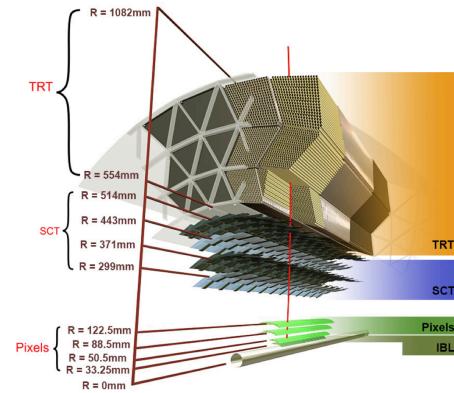


図 1.4 Gradation

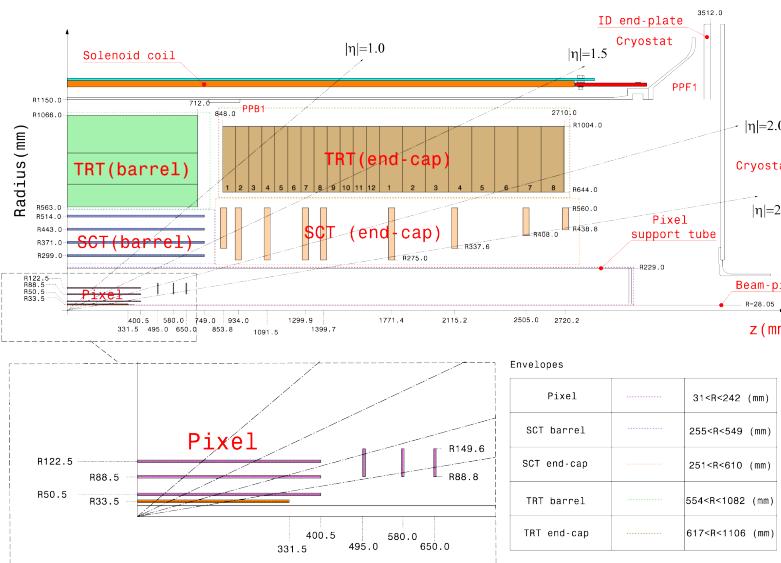


図 1.5 ATLAS 検出器の全体図 [3]

- 1 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についての詳細は 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 $					

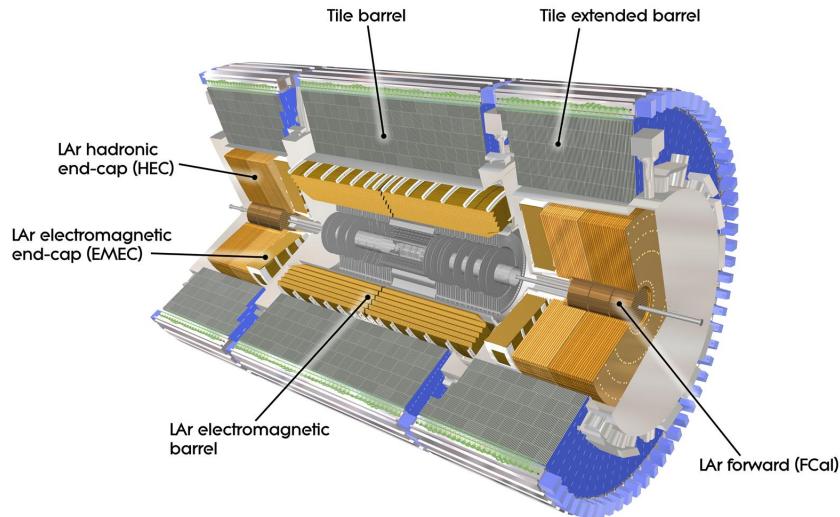


図 1.6 カロリメータの全体図 [4]

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 1.6 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。

1 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 ($1.4 < |\eta| <$
2 3.2) の領域に設置されている。検出層に液体アルゴン^{*1}、吸収層に鉛 ($Z = 82$) が用いられており、高エ
3 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
4 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
5 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
6 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
7 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 $20X_0$ ^{*2} を超えるため、測
8 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。

9 ハドロンカロリメータは、電磁カロリメータの外側に配置され、バレル部 ($|\eta| < 1.7$) とエンドキャッ
10 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
11 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。
12 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
13 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。

14 1.3.3 ミューオン検出器

15 1.4 HL-LHC アップグレード

^{*1} 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。

^{*2} 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。

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 新型ピクセル検出器の開発

³ 5.1 新型ピクセル検出器の組み立て工程

⁴ 5.2 品質試験

⁵ 5.3 量産における試験結果管理

¹ 第6章

² データベースシステムの概要

³ 6.1 量産に用いるデータベースの概要

⁴ 6.2 本研究における開発項目

1 第7章

2 試験結果データ管理システムの開発

- 3 7.1 ピクセル検出器情報の登録
- 4 7.2 試験結果の管理
- 5 7.3 試験結果のアップロード・ダウンロード
- 6 7.4 試験結果の評価

¹ 第8章

² まとめ

³ 8.1 まとめ

⁴ 8.2 今後の課題

₁ 付録 A

₂ AppendixA

参考文献

- [1] "The CERN accelerator complex", <https://cds.cern.ch/images/OPEN-PHO-ACCEL-2013-056-1> CERN Document Server
- [2] Joao Pequenao. Computer generated image of the whole ATLAS detector. Mar 2008.
- [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/> ATLAS Collaboration
- [4] "Computer Generated image of the ATLAS calorimeter", <https://cds.cern.ch/images/CERN-GE-0803015-01>

1 謝辞

2 shaji

1 図目次

2	1.1	ATLAS 検出器	2
3	1.2	ATLAS 検出器	3
4	1.3	Composite	4
5	1.4	Gradation	4
6	1.5	ATLAS 検出器	4
7	1.6	ATLAS カロリメータ	5

1 表目次

2	1.1	IBL、ピクセル検出器の配置	4
---	-----	--------------------------	---