

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

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)

2022年1月31日

Abstract

The Large Hadron Collider (LHC) is the world's highest energy particle collider, which designed to provide proton-proton collisions with center of mass energy of 14 TeV. The ATLAS is a general purpose detector at the LHC. The purposes of the ATLAS are to investigate precise measurements of the Standard Model and searches for the physics beyond the Standard Model.

The pixel detector is installed in the innermost layer of ATLAS. The calibration of the pixel detector fulfills tuning ASIC configuration parameters. Parameters can be changed because of the radiation damage so the calibration need to be done frequently. The calibration results can contain two main problems: ASIC injects incorrect charges and data is lost. This thesis reports the development of an analysis tool that automatically removes the problems by using appropriate exception handling. The tool is used for the latest calibration data obtained in September 2021. It found that the calibration results can not predict correct small charges. Evaluating the effect on the measurement data including small charges, and it is expected to be small for MIP measurement, which is the main target of the pixel detector.

The LHC plans to be upgraded so that it will increase the instantaneous luminosity. The upgrade is called HL-LHC(High-Luminosity LHC). The HL-LHC will have an instantaneous luminosity 5-7 times larger than the current LHC. This is expected to improve the measurement accuracy of the Standard Model and the sensitivity of the search for new physics. With the increase of instantaneous luminosity, higher performance of the detector is required due to the increase of data rate and hit occupancy. In addition, the current ATLAS pixel detectors are expected to reach their design radiation tolerance. So the inner detectors will be replaced to new detector called ITk(Inner Tracker).

For the production of ITk, about 10,000 pixel modules will be mass-produced, and quality tests will be conducted for all modules. In order to ensure efficient mass production and integrated pixel module selection, a system for integrated management of quality control tests' results is required. For this purpose, an integrated management system called *local database* is being developed mainly by Tokyo Institute of Technology. This thesis also reports a management features such as displaying test results, registering a new module, and synchronizing data with central database.

Integrating these features with those of the previous study, all the basic features required for the mass production are now in place. However, it was confirmed that some of the functions require very long processing times. Such a long processing time is very detrimental to the user's satisfaction and needs to be improved.

概要

フランスとスイスの国境にある欧州原子力研究機構 (CERN) に建設された陽子衝突加速器 LHC では、世界最高エネルギーである重心系エネルギー 14 TeV で陽子同士を衝突させることができる。LHC の衝突点の 1 つに設置されている ATLAS では、陽子衝突からの崩壊生成粒子を測定し、標準模型の精密測定やそれを超える新物理の探索を行っている。

ATLAS の最内層に設置されているシリコンピクセル検出器は、放射線損傷による影響を補正するために頻繁に電荷較正を行う必要がある。電荷較正結果には、ASIC が正しい電荷を生成できないことや、データの欠損等の問題が含まれることがあるため、これら値を適切な値に補完する必要がある。本研究では、電荷較正結果により適切な例外処理を行うよう、例外をアルゴリズムとして抽出・処理する解析ツールを開発した。開発した解析ツール用いて、2021 年 9 月に取得した最新の電荷較正データに対して電荷較正およびその補正を行った。最新の電荷較正データを用いて作成した結果から、小さい電荷量について電荷較正が理想的に行えていないことがわかった。最新の電荷較正データを用いて、小さい電荷量が測定データに与える影響の評価を行った。その結果、ATLAS ピクセル検出器における主な測定対象である MIP 粒子に対して、小さい電荷量を含むクラスターへの影響は小さいと予想され、電荷較正式から得られる電荷量の補正是行わないことに決定した。

また、LHC 高輝度化 (HL-LHC) に向けた ATLAS 検出器アップグレードのため、次世代ピクセル検出器の開発および量産の準備を進めている。HL-LHC では、瞬間ルミノシティが現在の LHC の 5-7 倍、積分ルミノシティが 2025 年までの約 10 倍になり、標準模型の測定精度の向上や新物理の探索感度の向上が期待される。瞬間ルミノシティの増加に伴うデータレートの増加やヒット占有率の増加により、検出器に対してより高い性能が要求される。さらに、現行 ATLAS ピクセル検出器は 2025 年における稼動後、設計放射線耐性に到達するため、再内層に設置されている内部飛跡検出器の総入れ替えを予定している。HL-LHC のために新しく設置する内部飛跡検出器を ITk (Inner Tracker) と呼ぶ。

ITk の製造のために、次世代ピクセルモジュール約 10000 台を量産し、全てのモジュールに対して品質試験を行う予定となっている。効率の良い量産と統合されたピクセルモジュール選定を行うために、品質試験結果を統合管理するシステムが必要となる。そのために、東工大を中心としてローカルデータベースという統合管理システムの開発が進められている。本研究では、先行研究において開発された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。

以上の機能を新たに実装することにより、ピクセルモジュールの次世代器量産における品質試験結果管理に必要な機能の基本的な部分が全て揃った。しかし、一部の機能において非常に長い処理時間を必要とすることが確認された。このような長い処理時間は使用者の満足度が非常に悪くなるため、改善が必要である。そのため、処理内容を細分化することにより改善方法を指摘し、今後の課題とした。

目次

概要	i
第 1 章 序論	1
1.1 素粒子標準模型	1
1.2 LHC	5
1.3 ATLAS 実験	6
1.4 HL-LHC アップグレード	11
第 2 章 シリコンピクセル検出器	17
2.1 シリコン検出器	17
2.2 ピクセルモジュール	20
2.3 放射線損傷	24
第 3 章 現行ピクセルモジュールの電荷較正	29
3.1 アナログ回路	29
3.2 電荷較正手法	29
3.3 電荷較正結果の履歴	33
第 4 章 電荷補正の最適化	35
4.1 電荷較正における補正の概要	35
4.2 電荷較正の補正	39
4.3 データに欠損が含まれる場合の補完	41
4.4 自動補完のための解析ツール	43
4.5 解析ツールの運用	45
4.6 本章のまとめ	49
第 5 章 次世代ピクセルモジュールの量産	50
5.1 次世代ピクセルモジュールの組み立て部品	50
5.2 次世代ピクセルモジュールの組み立て工程	53
5.3 品質試験	55
5.4 量産における試験結果管理	60
第 6 章 モジュール量産におけるデータベースシステム	62
6.1 量産に用いるデータベースの概要	62

6.2	ローカルデータベースの構造	64
6.3	モジュールの品質試験に必要な開発項目	66
第 7 章	試験結果データ管理システムの開発	69
7.1	品質試験結果の表示機能	69
7.2	品質試験結果の管理機能	73
7.3	中央データベースとローカルデータベースの同期機能	77
7.4	本章のまとめ	91
第 8 章	まとめ	92
8.1	結論	92
8.2	今後の課題	93
付録 A	ローカルデータベースのブラウザ表示	94
A.1	非読み出し試験結果のブラウザ表示	94
A.2	ピクセルモジュール基本特性のブラウザ表示	94
参考文献		101

第1章

序論

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 (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、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) 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 実験とそのアップグレード計画について説明する。

1.1 素粒子標準模型

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。

現在、素粒子物理を考える枠組みとして、標準模型 (SM: the Standard Model) がある。標準模型は 1970 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て揃った。

本節では、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。

1.1.1 標準模型の概要

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 に標準模型に登場する素粒子を示す。

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により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、自然界に単独で存在することができる。

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。素粒子の間に働く力には、強い力、弱い力、電磁気力があり、標準模型では、強い相互作用、弱い相互作用、

表 1.1 標準模型での物質の構成粒子 [2]。

	世代	名称	表記	電荷 [e]	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	$2.16_{-0.26}^{+0.49} \times 10^{-3}$
		ダウンドクォーク	d	-1/3	1/2	$4.67_{-0.17}^{+0.48} \times 10^{-3}$
	第二世代	チャームクォーク	c	+2/3	1/2	1.27 ± 0.02
		ストレンジクォーク	s	-1/3	1/2	$93_{-5}^{+11} \times 10^{-3}$
	第三世代	トップクォーク	t	+2/3	1/2	172.76 ± 0.30
		ボトムクォーク	b	-1/3	1/2	$4.18_{-0.02}^{+0.03}$
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	$< 0.19 \times 10^{-3}$
		ミューオン	μ	-1	1/2	105.6×10^{-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 [2]。

	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	0
	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	-	125.10 ± 0.14

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 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。

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る。しかし、表 1.1、表 1.2 は素粒子が質量を持つ事実を表しており、このことはゲージ対称性の破れを表す。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。ヒッグス場は複素スカラー場で、その真空期待値 $v \sim 250 \text{ GeV}$ が対称性を破るとともに粒子に質量を与える。各粒子はヒッグス場と直接結合しており、各粒子の質量は図 1.1 のように、ヒッグス場との結合定数に比例する。ヒッグス場を裏付ける上で、ヒッグス場の振動として現れるヒッグス粒子の観測が必要である。2012 年にヒッグス粒子の発見^{*1}が発表され、標準模型から予測される粒子が全て揃った。

*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。

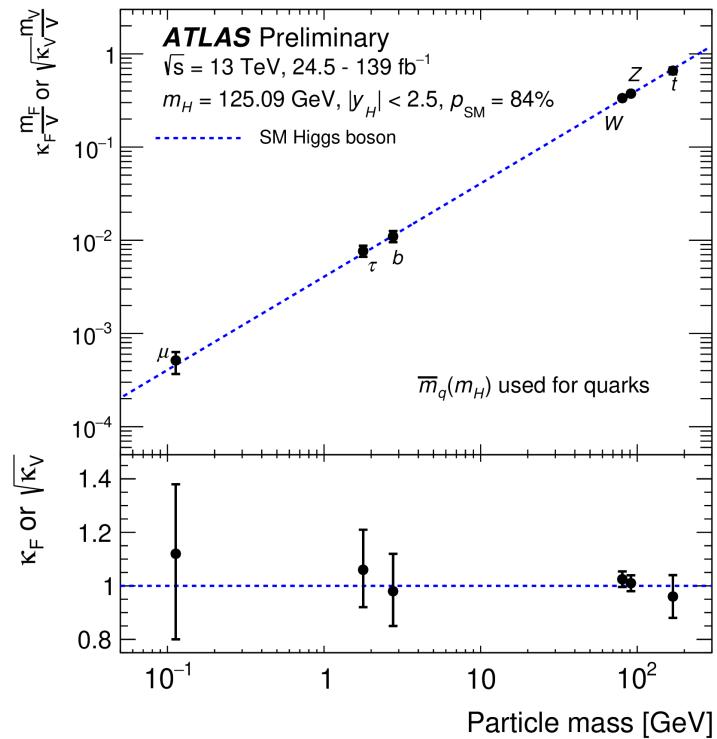


図 1.1 ヒッグス場との結合定数と素粒子の質量 [3]。 $\kappa_F \frac{m_F}{v}$ はフェルミオン ($F = t, b, \tau, \mu$) に対する結合定数を表し、 $\sqrt{\kappa_V} \frac{m_V}{v}$ はボソン ($V = W, Z$) に対する結合定数を表す。 v はヒッグス場の真空期待値を表す。

1.1.2 標準模型を超えた新物理の探索

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。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。標準模型の問題の 1 つとして、暗黒物質が挙げられる。

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^{*2}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。このことは、銀河には光学的な観測にかかる暗黒物質の存在の証拠とされる。他にも、宇宙背景放射 (CMB: Cosmic Microwave Background) 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つており、標準模型から得られる物質はエネルギー換算で宇宙全体の 5% に満たない。暗黒物質の実態は未だわかつてないが、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。しかし、標準模型には WIMP になりうる粒子の候補が存在しないため、標準模型を超える新たな理論体系が必要となる。

暗黒物質の解明や、標準模型におけるその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

^{*2} 回転曲線とは、銀河中心距離 R の関数として回転速度 $V(R)$ を表したものである。

表 1.3 超対称性粒子と標準模型の素粒子の対応。

総称	超対称性粒子	スピ	標準模型の粒子	スピ
スクオーケ スレプトン	$\tilde{u}, \tilde{c}, \tilde{t}$ $\tilde{d}, \tilde{s}, \tilde{b}$ $\tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$ $\tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau}$	0	u, c, t d, s, b ν_e, ν_μ, ν_τ e, μ, τ	1/2
ゲージーノ	$\tilde{\gamma}$ \tilde{W}^\pm \tilde{Z} \tilde{g}	1/2	γ W^\pm Z g	0
ヒグシーノ	$\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0, \tilde{H}^\pm$	1/2	H	0

ンが 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。表 1.3 に超対称性粒子と標準模型の素粒子の対応を示す。電荷を持ったゲージーノとヒグシーノは質量固有状態 ($\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^\pm$) として観測され、中性のゲージーノとヒグシーノは質量固有状態 ($\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0$) として観測される。

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 パリティの保存することが導入される。R パリティは式 (1.1) のように定義されている。

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

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。よって R パリティの保存から、標準模型の粒子と超対称性粒子に起こりうる崩壊は以下の 3 通りのみである。

- $SM \rightarrow SM + SM$
- $SM \rightarrow SUSY + SUSY$
- $SUSY \rightarrow SM + SUSY$

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 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とができ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りうる。

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を解決することができる。超対称性理論により解明が期待される問題を以下に示す。

- 階層性問題
- B/L 対称性の破れの候補
- ニュートリノの質量形成のメカニズム

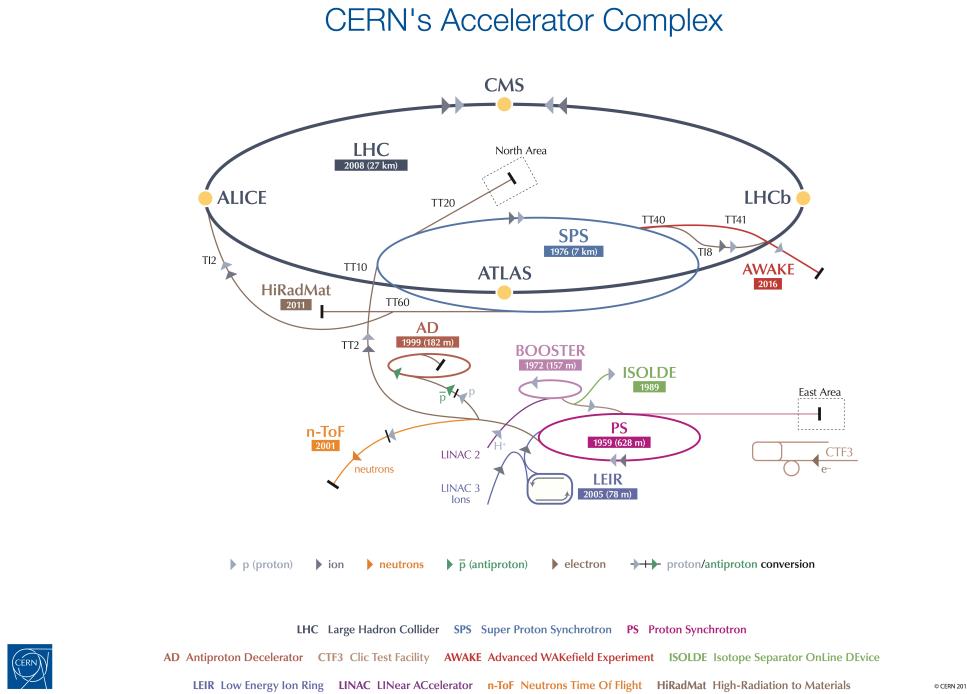


図 1.2 LHC の全体図 [4]

1.2 LHC

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27kmの陽子・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14TeVに到達できるよう設計されており、2018年までの稼働において重心系エネルギーは13TeVに到達した。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える新物理の探索がLHCの主な目的の一つである。

1.2.1 LHC の基本構造

図1.2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。その後、 1.15×10^{11} 個の陽子を集めてひとまとまりにする。このかたまりをバンチと呼び、LHCのビームは最大2808個のバンチから構成される。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50MeV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(PS)によって段階的に450GeV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6.5TeV(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25ns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 Troidala LHC ApparataS**)、CMS(**Compact Muon Solenoid**)、ALICE(**A Large Ion Collider 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。瞬間ルミノシティ L は式 (1.2) で与えられる。

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

ここで、 N_b は 1 バンチあたりに含まれる粒子数、 n_b は衝突するバンチペア数、 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。

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

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ンチ幅の標準偏差である。

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。

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

1.3 ATLAS 実験

ATLAS は LHC の衝突点の 1 つに設置されている汎用型の検出器である。図 1.3 に示すように、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。

1.3.1 ATLAS 実験で使用される座標系

ATLAS において粒子の位置・運動量を示すために、図 1.4 のような直交座標系 (x, y, z) および円筒座標系 (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。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 η を式 (1.5) のように定義する。

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

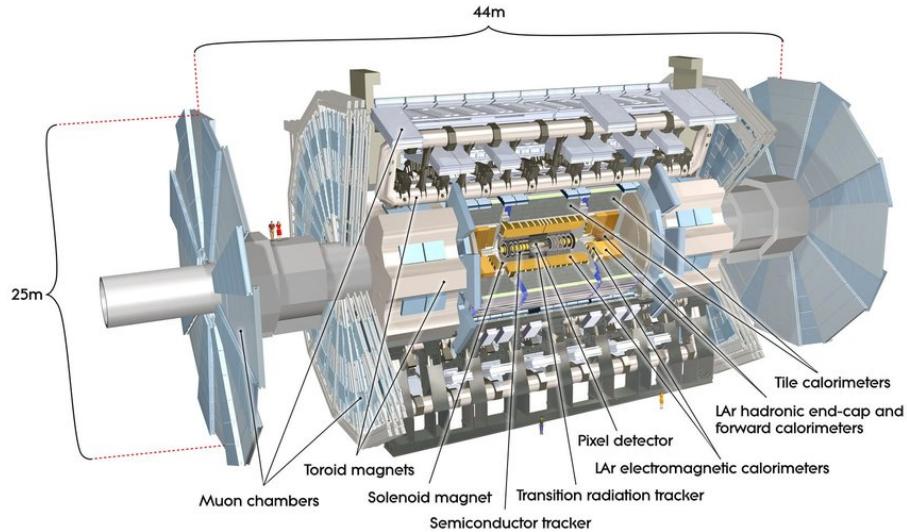


図 1.3 ATLAS 検出器の全体図 [5]。円筒の中心の内側から順に、内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミューオン検出器が衝突点を覆うように存在する。

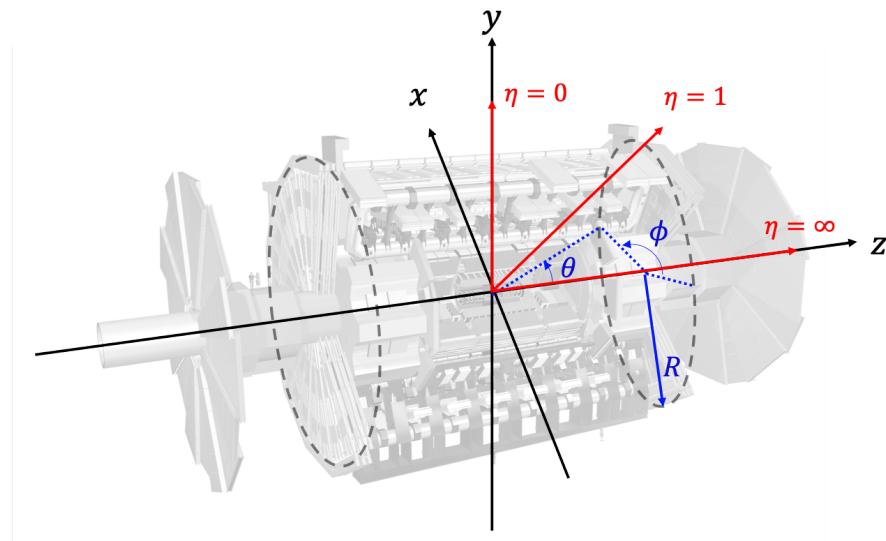


図 1.4 ATLAS 検出器で使用される座標系 [5]。直交座標系 (x, y, z) および円筒座標系 (R, ϕ, z) が定義される。

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

1.3.2 内部飛跡検出器

図 1.5、図 1.6 に内部飛跡検出器の全体図および断面図を示す。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。

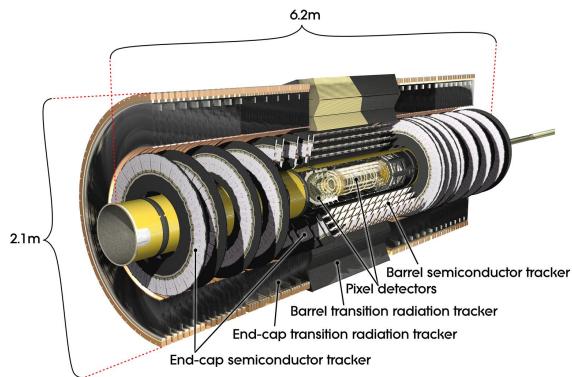


図 1.5 内部飛跡検出器の全体像 [12]。

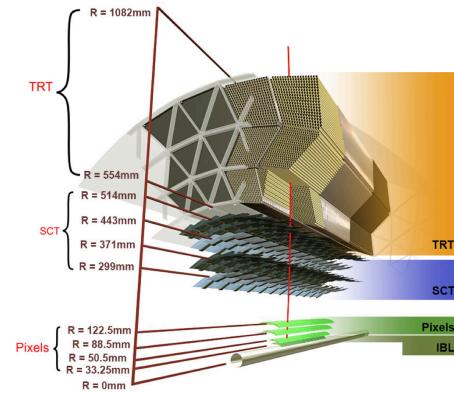


図 1.6 内部飛跡検出器の断面図 [13]。

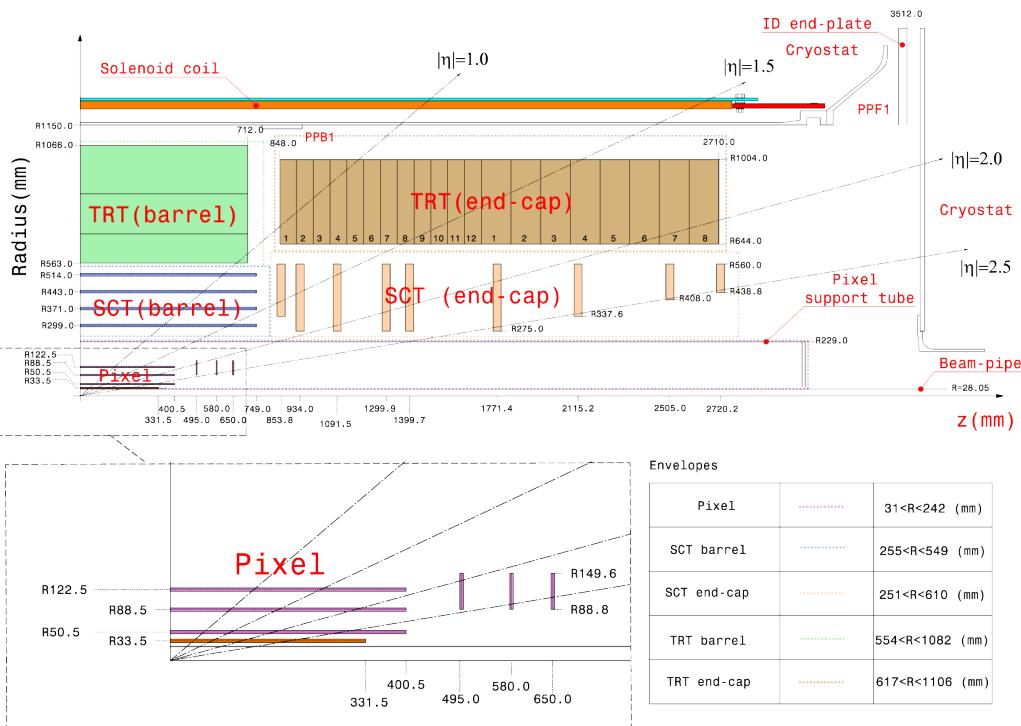


図 1.7 内部飛跡検出器の配置 [6]。

IBL、ピクセル検出器

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を表 1.4 に示す。

ピクセル検出器は LHC の運転開始時である 2010 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 (2013 年 - 2014 年) にピクセル検出器のさらに内層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。

表 1.4 IBL、ピクセル検出器の配置。 z は図 1.4 におけるビーム軸方向の座標を表し、 R は円筒座標系における z 軸からの距離を表す。

		R [mm]	z [mm]	検出器の総数	ピクセルの総数 ($\times 10^6$)
Barrel	IBL	33.5	< 331.5	224	6.02
	B-layer	50.5	< 400.5	286	13.2
	Layer 1	88.5	< 400.5	494	22.8
	Layer 2	122.5	< 400.5	676	31.2
Endcaps	Disk 1	$88.8 < R < 149.6$	495	48×2	4.4
	Disk 2	$88.8 < R < 149.6$	580	48×2	4.4
	Disk 3	$88.8 < R < 149.6$	650	48×2	4.4

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。

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 1.8 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 ($1.4 < |\eta| <$

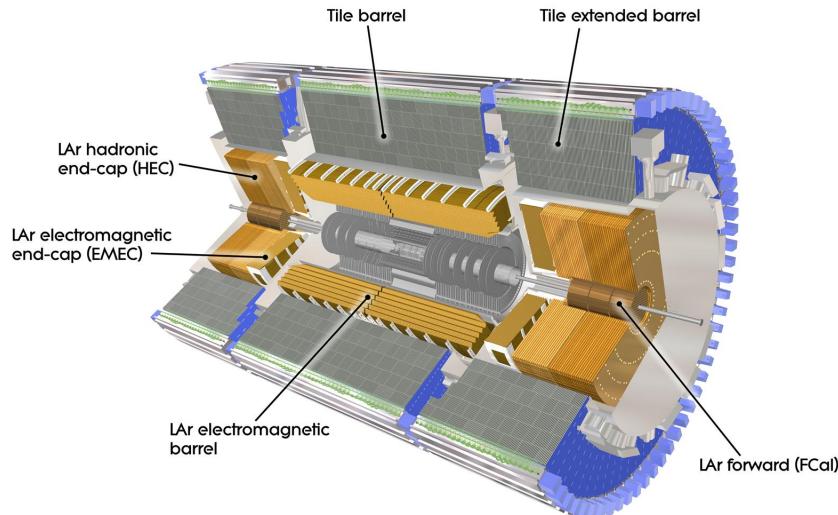


図 1.8 カロリメータの全体図 [7]

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 $20X_0$ 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。ここで、 X_0 は放射長であり、電子のエネルギーが $1/e \sim 0.37$ となる距離である。

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。タイルカロリメータの厚さは $7.4 \lambda_0$ となっている。電磁カロリメータとあわせることにより、カロリメータの厚さは $9.7 \lambda_0$ となり、ハドロンのエネルギーを十分に測定することができる。ここで、 λ_0 は相互作用長であり、ハドロンと原子核による強い相互作用が起こる平均自由行程である。

1.3.4 ミューオン検出器

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、100 GeV の運動量を約 3%、1 TeV を約 10% の運動量分解能で測定できるよう設計されている。

^{*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 2021 年 1 月に作成された LHC の運転計画 [8]。2025 年に現行の検出器を用いた測定が終わり、HL-LHC アップグレードが開始する予定である。

ミューオンの運動量測定は、MDT(Monitored Drift Tube) が担っている。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렐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。

1.4 HL-LHC アップグレード

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、2025 年までは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 の加速

表 1.5 HL-LHC でのビームパラメータ [9]。

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

器の構成要素について入れ替えや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る。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 の衝突点周り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 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、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

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ある。陽電子ビームのバンチは有限の角度で衝突をするため、バンチが重なり合わないことによるビーム不安定性がある。そこで、ビーム軸と平行になるように回転させることによりバンチの重なりが多くなり、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。[10]

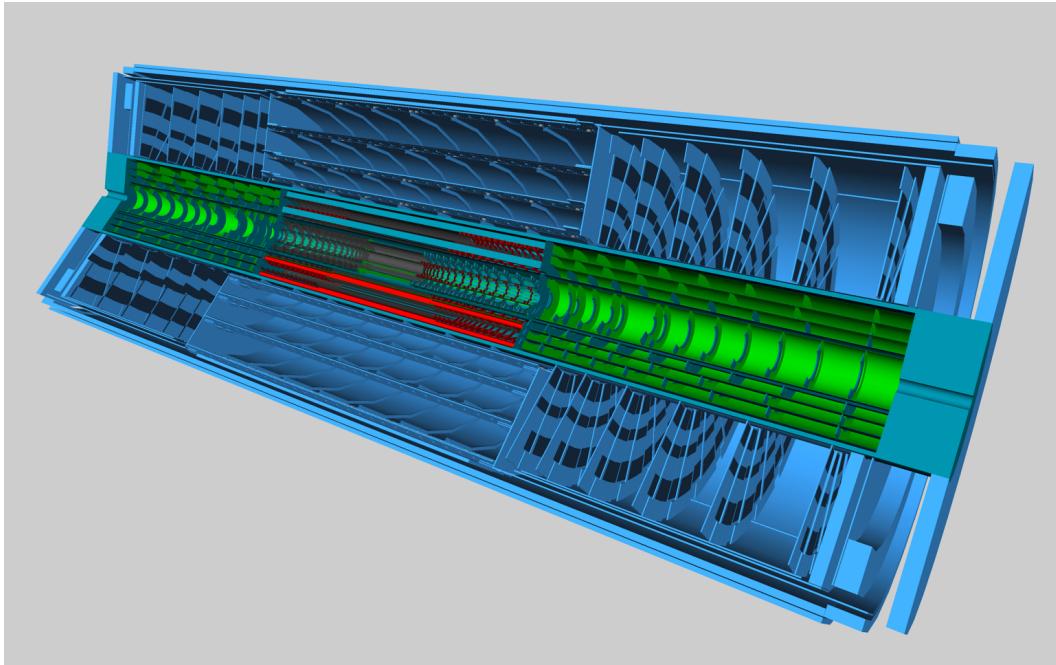


図 1.10 ITk の全体図 [11]。緑色の領域はピクセル検出器を表し、青色の領域はストリップ検出器を表す。

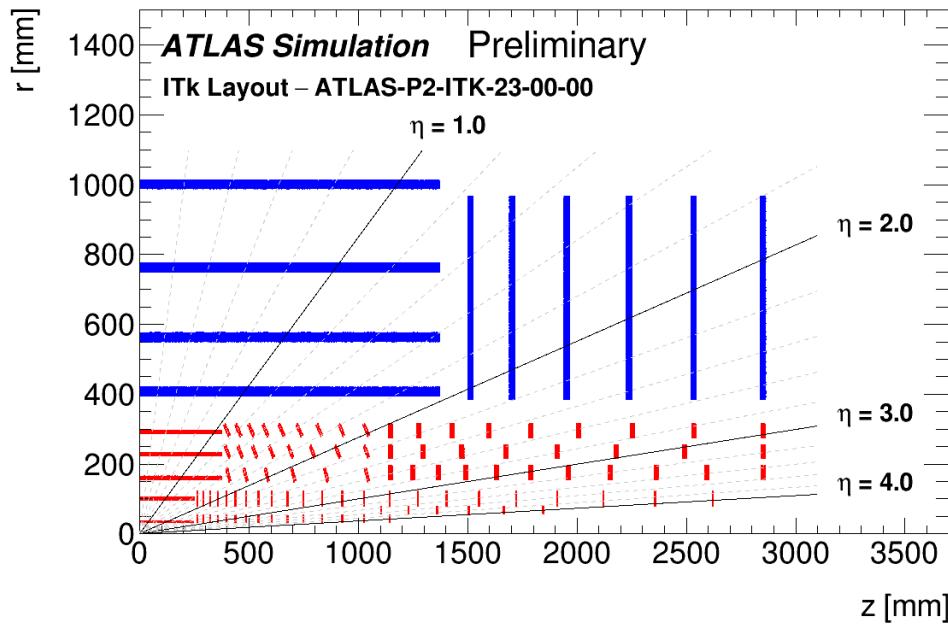


図 1.11 ITk のピクセル検出器およびストリップ検出器の配置 [14]。原点は ITk の中心であり、 z 軸はビーム軸方向、 r はビーム軸と垂直な半径を表す。赤色はピクセル検出器、青色はストリップ検出器を表す。

能が大幅に低下する。特に、荷電粒子への検出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。

以上の理由に加え、現行の ATLAS に搭載されている IBL およびピクセル検出器は Run3 の終わりまでに設計放射線耐性 (IBL: $5 \times 10^{15} [1\text{MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2]$, ピクセル検出器: $1 \times 10^{15} [1\text{MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2]$) に到達

する。そのため、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行うことを計画している。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 の全体像を図 1.10 に示す。ITk は全てシリコン半導体検出器から構成される。図 1.11 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。

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導入する。特に、放射線の影響が大きくなるバレル部の最内層では高放射線耐性を持つ 3D センサーを使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、ピクセルサイズを $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ または $25 \times 100 \mu\text{m}^2$ と現行ピクセルのピクセルサイズ ($50 \times 250 \mu\text{m}^2$) の $1/5$ にすることにより、ヒット占有率を同程度に保つことが期待される。さらに、1 衝突あたりのパイルアップが高くなることと、トリガーレートが 1 MHz になることから、読み出しシステムの高速化も必要となる。

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ても、高い飛跡再構成効率における解析を行うことができる。さらに、現行 LHC の検出範囲外であった $2.7 < |\eta|$ 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 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 [11]。

1.4.3 HL-LHC における物理測定

HL-LHC では、Run3 終了時までに取得予定である 300 fb^{-1} のデータと比較して約 10 倍の統計が得られるため、生成断面積の小さい物理過程について探索感度の向上や、これまで測定された標準模型粒子の測定精度の向上が期待される。HL-LHC の測定から得られる統計を用いて期待される物理を以下に示す。

- 高密度 QCD [15]
- フレーバー物理 [16]
- 標準模型を超える物理 [17]
- ヒッグス粒子の精密測定 [18]
- 標準模型粒子の精密測定 [19]

本節では、標準模型を超える物理の超対称性粒子の探索について取り上げる。HL-LHC における ATLAS での物理事象の探索として、Disappearing track を用いた長寿命粒子の探索がある。

超対称性粒子には様々な理論の候補が存在するが、LHC の陽子衝突から生成される超対称性粒子は長寿命な粒子 (LLP: Long Lived Particle) の存在が予測されている。図 1.12 に LHC における陽子衝突から生成されると予想される $\tilde{\chi}_1^\pm$, $\tilde{\chi}_1^0$ 生成ダイアグラムと HL-LHC の検出器における崩壊の模式図を示す。図 1.12 の右図に示すように、陽子衝突から $\tilde{\chi}_1^\pm$, $\tilde{\chi}_1^0$ とジェットが生成される。 $\tilde{\chi}_1^\pm$ は長寿命粒子であり、ITk の 5 層目までヒットを残し、低運動量を持つパイオニア (π^\pm) と $\tilde{\chi}_1^0$ に崩壊する。低運動量を持つパイオニアは磁場により大きく曲げられるため検出器内に飛跡を残さず、 $\tilde{\chi}_1^0$ は中性粒子であるため飛跡を残さない。そのため、 $\tilde{\chi}_1^\pm$ の飛跡は崩壊後に飛跡を残さずに消えたように見える。このように、衝突点からの飛跡が途中で途切れるような信号を **Disappearing track** と呼ぶ。

図 1.12 の右図の模式図において、ITk の内側 5 層のピクセル検出器のみに飛跡を残し、それより外側に配置されるストリップ検出器には飛跡を残さない。このような、検出器内で消えるような短い飛跡は **tracklet** と呼ばれる。また、通常の飛跡は **track** と呼ぶ。track の再構成のために、ITk に少なくとも 7 つのヒットがあることを要求するのに対して、tracklet の再構成のためにはピクセル検出器に少なくとも 4 つのヒットが要求される。 $\tilde{\chi}_1^\pm$ の飛跡は短く tracklet として測定されると予想されるため、ピクセル検

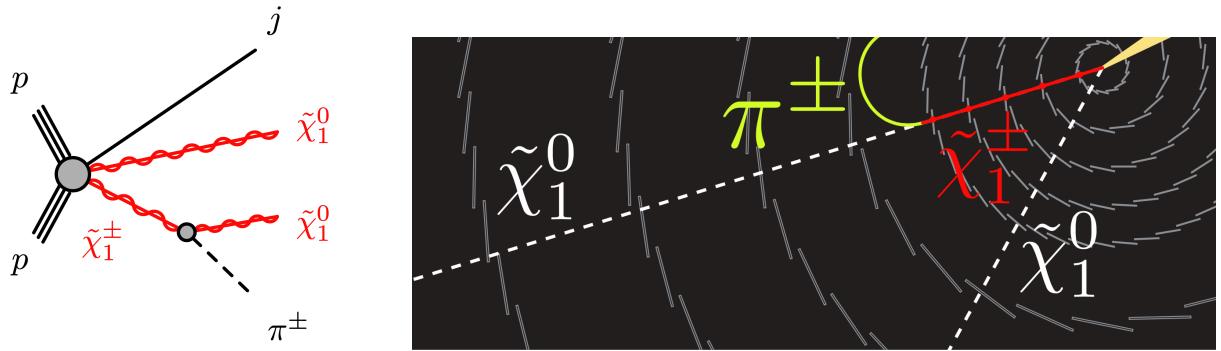


図 1.12 $\tilde{\chi}_1^\pm$, $\tilde{\chi}_1^0$ 生成ダイアグラム (左図) と HL-LHC の検出器における崩壊の模式図 (右図) [20]。模式図はビーム軸と垂直な平面を表しており、円状に広がる層は ITk (内側 5 層はピクセル検出器、外側 4 層はストリップ検出器) を表す。陽子衝突から生じた $\tilde{\chi}_1^\pm$ は長寿命粒子であり、ITk の 5 層目までヒットを残す。その後、低運動量を持つパイオニア (π^\pm) と $\tilde{\chi}_1^0$ に崩壊する。

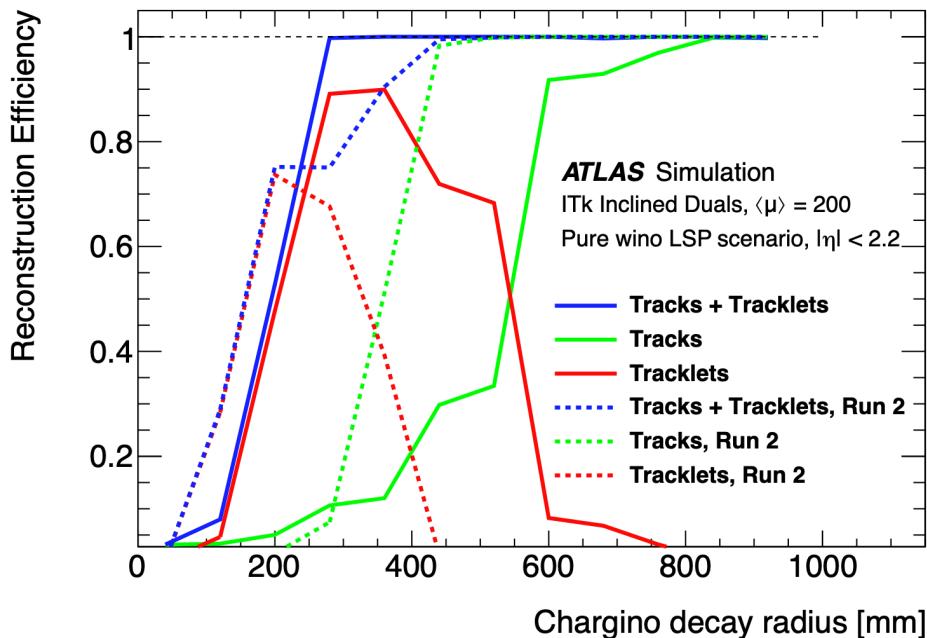


図 1.13 ITk および現行の内部飛跡検出器における、Disappearing track の飛跡が再構成される効率 [11]。実線は ITk における飛跡再構成の効率を表し、破線は Run2 における内部飛跡検出器の飛跡再構成の効率を表す。

出器の測定精度が重要となる。図 1.13 に ITk および現行の内部飛跡検出器における、track と tracklet の飛跡が再構成される効率を示す。ITk は現行の内部飛跡検出器と比較して、200-400 mm 程度の短い飛跡に対する tracklet が向上していることがわかる。

図 1.14 に HL-LHC における測定から得られる、HL-LHC ATLAS 実験で期待される電弱ゲージーノ探索感度を示す。HL-LHC での探索感度の予測値と理論予測 [21] を比較すると、LSP にウィーノを仮定した模型では $\tilde{\chi}_1^\pm$ の質量は寿命 0.2 ns において約 850 GeV、ヒグシーノを仮定した模型では寿命 0.02 ns において約 300 GeV の質量領域にまで感度を持つことが期待される。

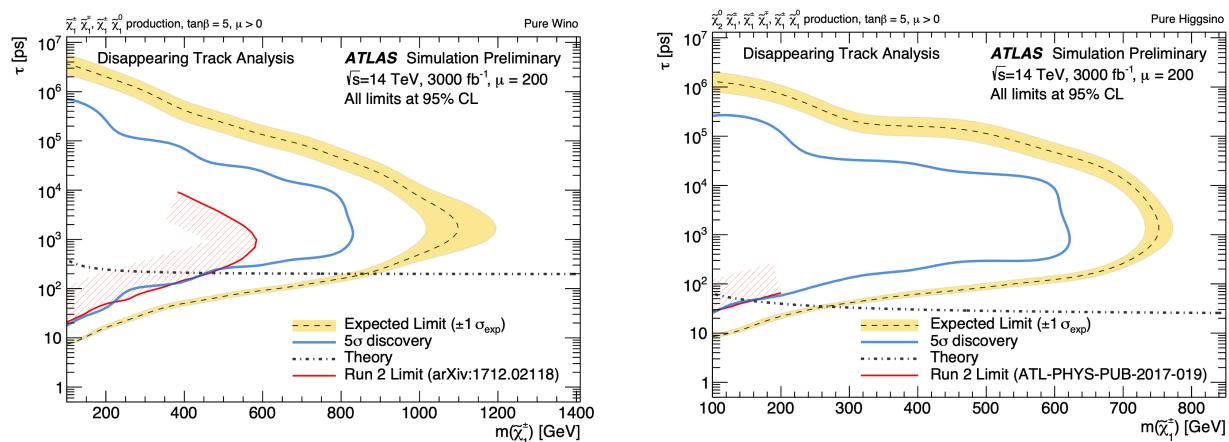


図 1.14 HL-LHC ATLAS 実験で期待される電弱ゲージーノ探索感度 [20]。これらの図は、 $\tilde{\chi}_1^\pm$ の質量（横軸）と寿命（縦軸）を 95% の信頼区間（CL）で表す。左図は LSP に ウィーノ を仮定した場合であり、右図は LSP に ヒグシーノ を仮定した場合である。

第2章

シリコンピクセル検出器

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、半導体検出器の一般論と、現在 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ル検出器について説明する。

2.1 シリコン検出器

本節では、シリコン検出器を例に半導体の主な性質と検出原理について述べる。

2.1.1 半導体検出器の一般論

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。半導体は導体と絶縁体の中間程度の電気伝導度を持つ物質であり、この違いはバンドギャップの幅の違いにより説明することができる。結晶構造を持つ物質中では、電子が占有するエネルギー状態はほぼ連続^{*1}となり、エネルギー・バンドを形成する。エネルギー・バンドの内、フェルミ準位よりエネルギーが高いエネルギー・準位を持つものを伝導帯と呼ぶ。伝導帯が電子で満たされていなければ伝導帯に存在する電子は結晶中を自由に移動することができる。また、フェルミ準位より低いエネルギー・準位を持つものを価電子帯と呼ぶ。一方で、伝導帯と価電子帯の間の領域を禁制帯と呼ぶ。禁制帯にはエネルギー・準位が存在しないため、電子が存在できない。そのため、電子は伝導帯か価電子帯にのみ存在する。

導体は伝導帯が部分的に電子に占有されているか、伝導帯が価電子帯と重なっている状態にある。そのため、伝導帯に存在する電子は、外部電界からエネルギーを受け取り、容易に高い準位に遷移することができる。よって、導体中ではわずかな外部電場により、自由に電子が移動することができる。一方で、半導体や絶縁体では価電子帯の準位は充満し、伝導帯は空となっている。そのため、電流を流すためにはバンドギャップ E_g を超えるエネルギーを与え、価電子帯の電子を伝導帯に励起させる必要がある。伝導帯の電子や価電子帯におけるホール（正孔）が結晶中で外部電場により自由に動くことができ、電流が流れる。電子や正孔のような電荷を伝える役割を持つものをキャリアと呼ぶ。半導体ではバンドギャップ $E_g \simeq 1 \text{ eV}$ である。 $T = 0 \text{ K}$ では、全ての電子は価電子帯にあり、伝導帯には電子は存在しない。室温 $T = 300 \text{ K}$ ではバンドギャップ E_g は熱エネルギー kT の数十倍程度であり、わずかな量の電子が価電子帯から伝導帯へ熱的に励起されている。そのため、半導体は低温では絶縁体であり、室温においては電気伝導度が非常に小さい導体のように振る舞う。絶縁体は $E_g > 9 \text{ eV}$ と大きなバンドギャップを持つため、

^{*1} 電子の存在するエネルギー・準位の間隔は 10^{-18} [eV] と極めて小さいためほぼ連続とみなすことができる。

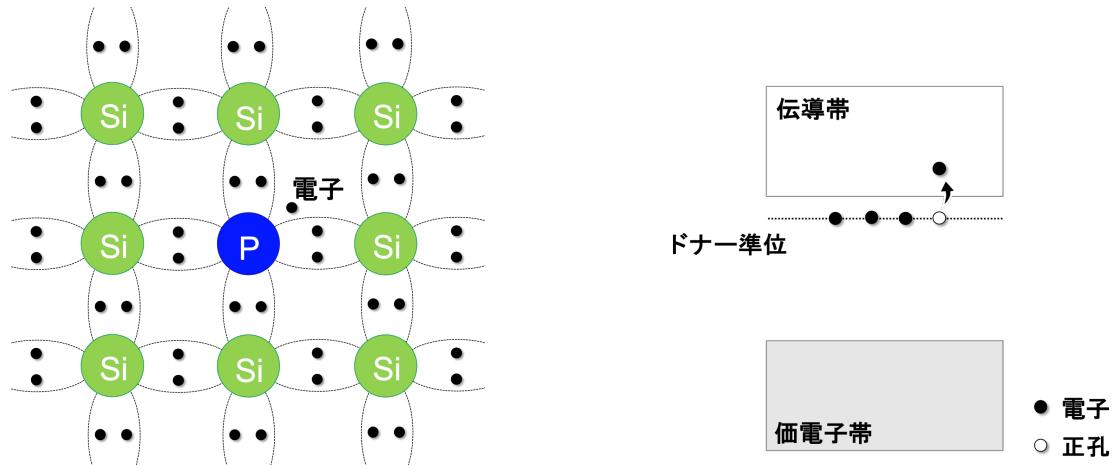


図 2.1 n 型半導体の結晶構造とバンド構造。

伝導帶にいる電子の数は非常に少なく電流は流れない。

2.1.2 n 型半導体と p 型半導体

先述したように、半導体は常温で導電性を持つが、導体と比較すると伝導帶に存在する電子は少なく電気伝導度は非常に小さい。電気伝導度を大きくするために半導体に不純物を少量添加する方法により、禁制帯内に新たなバンド構造を作ることができる。これにより、バンドギャップは小さくなり、より多くのキャリアを生成することができ電気伝導度が大きくなる。添加する不純物の種類により、n 型半導体と p 型半導体に分類される。

図 2.1 に n 型半導体の結晶構造とバンド構造を示す。この図は純粋結晶中のシリコン（Si）の 1 つをリン（P）で置き換えた場合である。4 値の元素であるシリコンを 5 値のリンで置き換えることにより、価電子中の電子が 1 つ余る。リンと余った電子間の結合エネルギーは、半導体のバンドギャップ E_g より小さい。よって、ドナー準位に束縛された電子は、熱エネルギーに容易により伝導帶に励起され、自由電子となる。添加された 5 値の元素のことをドナーと呼ぶ。

図 2.2 に p 型半導体の結晶構造とバンド構造を示す。この図は純粋結晶中のシリコン（Si）の 1 つをホウ素（B）で置き換えた場合である。4 値の元素であるシリコンを 3 値のホウ素で置き換えることにより、価電子中の電子が不足し正孔が多くなる。これによって得られる正孔の結合エネルギーは、半導体のバンドギャップ E_g より小さい。よって、価電子帯の電子は熱的励起により容易にアクセプター準位に励起される。これにより、価電子帯中に 1 個の自由な正孔が生じて電流を流すことができる。添加された 3 値の元素のことをアクセプターと呼ぶ。

2.1.3 半導体検出器の動作原理

半導体検出器は、n 型半導体と p 型半導体を接合した pn 接合を用いて作られる。pn 接合の様子を図 2.3 に示す。pn 接合面では、電子と正孔の再結合が起こり、キャリアがほとんど存在しない空乏層と呼ばれる空間が生じる。n 型半導体側は電子を失ったことにより正に帯電し、p 型半導体側は正孔を失したことにより負に帯電している。そのため、空乏層の両端に電位差が生じ、これを拡散電位と呼ぶ。空乏層を荷電粒子が通過すると、粒子のエネルギー損失に比例して電子正孔対が生じる。空乏層内で生じた自由な電子や正孔は、拡散電位が作る電場 V_{bi} により電極付近に移動する。これにより、電極表面に電荷が

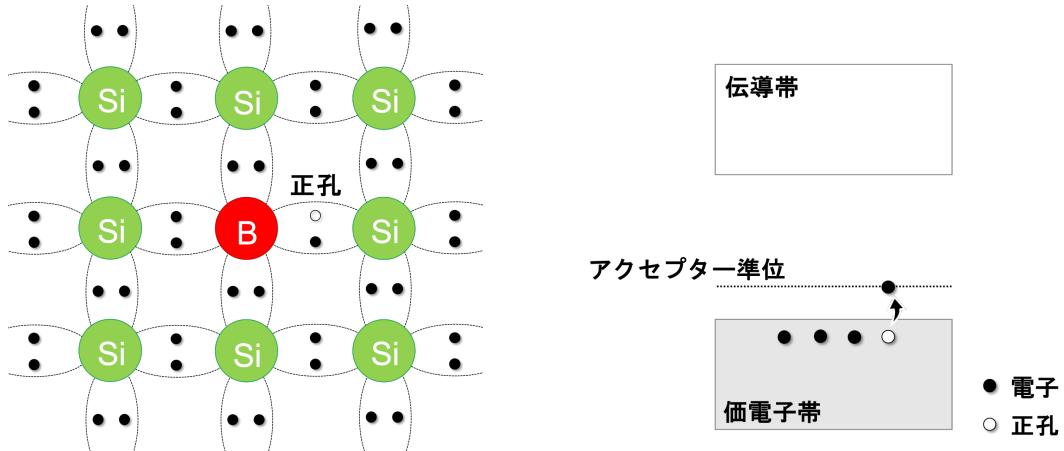


図 2.2 p 型半導体の結晶構造とバンド構造。

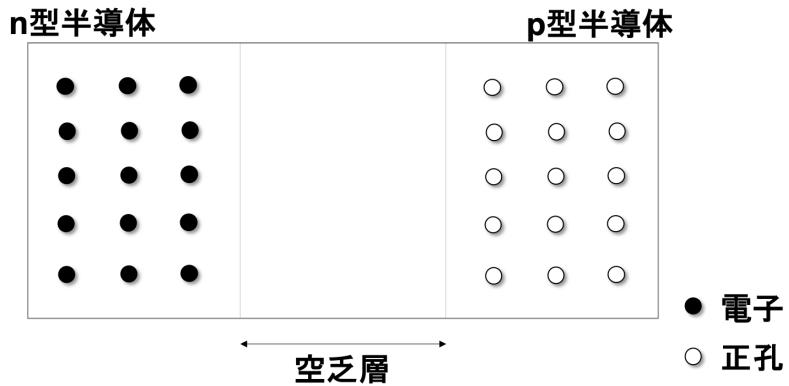


図 2.3 pn 接合の様子。

誘起されることで電流が流れ、信号を生成する。

pn 接合から得られる空乏層幅は数 μm 程度である。さらに、拡散電位が作る電場では電荷収集に不十分であり、半導体検出器を飛跡検出器として使用するためにはより大きな電位と広い空乏層幅が必要である。そこで、空乏層幅を広げるために、半導体に外部電場をかける。

空乏層幅 W とバイアス電圧 V の関係は式 (2.1) で表される。

$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{bi} - V)} \quad (2.1)$$

ここで、 x_n, x_p はそれぞれ n 型および p 型半導体中の空乏層の厚さ、 ε はシリコンの誘電率、 e は素電荷、 V_{bi} は拡散電位である。これより、空乏層の幅 W はバイアス電圧の向きにより変化することがわかる。 $V > 0$ の順バイアス時は空乏層の幅は狭くなり、逆バイアスの時は空乏層の幅が広がる。飛跡検出器としての半導体検出器は、半導体全体を空乏化して使用する。この時、逆バイアス V の絶対値は拡散電位に比べて非常に大きい ($V_{bi} \ll |V|$)。さらに、ドナー濃度とアクセプター濃度が同程度の pn 接合を用いる場合、式 (2.1) は式 (2.2) のように書き直すことができる。

$$W \approx \sqrt{\frac{\varepsilon}{eN} |V|} \quad (2.2)$$

ここで N はドナー濃度およびアクセプタ濃度である。このことから、検出器の空乏層幅は逆バイアス電

圧の平方根に比例することがわかる。

また、荷電粒子が物質を通過した際のエネルギー損失は Bethe-Bloch の公式によって記述される。

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 + \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (2.3)$$

ここで、式 (2.3) における各パラメータは以下の通りである。

$\rho \cdot dE/dx$	単位長さあたりの荷電粒子のエネルギー損失 [MeV · cm ⁻¹] (ρ は物質の密度)
K	$4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.307075$ [MeV · g ⁻¹ · cm ²] (N_A はアボガドロ定数, r_e は古典電子半径)
z	荷電粒子の電荷量 (素電荷 e 単位)
Z	物質の原子番号
A	物質の原子量
$m_e c^2$	電子の静止エネルギー (0.511 [MeV])
β	荷電粒子の速さと光速の比
γ	ローレンツ因子 $1/\sqrt{1-\beta^2}$
W_{\max}	1 度の衝突で物質に与えるエネルギーの最大値
I	物質の平均励起エネルギー
δ	分極による物質の密度補正

この式から、エネルギー損失 dE/dx は β の関数であることがわかる。エネルギー損失 dE/dx と β の関係を図 2.4 に示す。 β が小さい時は、エネルギー損失は $1/\beta^2$ に比例する。 $\beta\gamma \simeq 3$ あたりで、エネルギー損失は最小値に達する。このエネルギー損失が最小となる粒子を MIP(Minimum Ionizing Particle) と言う。 $\beta\gamma \geq 4$ からは、 $\ln \gamma^2$ で緩やかに上昇し、一定値に達する。高エネルギーを持った粒子 ($\beta\gamma > 1$) のエネルギー損失は $1 \text{ MeVg}^{-1}\text{cm}^2$ と $2 \text{ MeVg}^{-1}\text{cm}^2$ の間にあることがわかる。薄いシリコンセンサーの場合、検出器内を通過する荷電粒子は制動放射等の放射損失を無視できることができる。そのため、数百 GeV のエネルギーを持つ粒子まで同程度のエネルギー損失となり、MIP 粒子と見なすことができる。

シリコンの空乏層において、1組の電子正孔対を生成するのに必要なエネルギーは 3.6 eV である。さらに、シリコンの密度は 2.3 g/cm^3 であるため、高エネルギー粒子がシリコン内に通過した時に単位距離当たりに生成される電子正孔対は約 $50 \text{ e}/\mu\text{m}$ となる。

2.2 ピクセルモジュール

ATLAS のシリコンピクセル検出器は、ピクセルモジュールと呼ばれる最小単位を持つ。図 2.5 にピクセルモジュールの模式図を示す。ピクセルモジュールはシリコンセンサー、FE(Front-end) チップ、フレキシブル基板から構成される。この節ではそれぞれについて説明する。

2.2.1 シリコンセンサー

ATLAS に搭載するセンサーの多くはプラナーセンサーと呼ばれる構造を持つ。プラナーセンサーは、図 2.6 の左のようにセンサーのバルク部の表面に n^+ 型半導体と p^+ 型半導体を埋め込んだ構造をしている。 n^+ 型半導体電極はセンサー面において格子状に配列し、それぞれの電極から独立した信号を読み出すことができる。IBL およびピクセル検出器ではバルク部に n 型半導体を用いた、 n^+-in-n 型と呼ばれるものを用いている。 n^+-in-n 型の場合、空乏層は p^+ 型インプラントと n 型バルクの境界から成長する。そのため、荷電粒子が空乏層を通過した際に信号を n^+ 電極において検知するためには、空乏領域を n^+

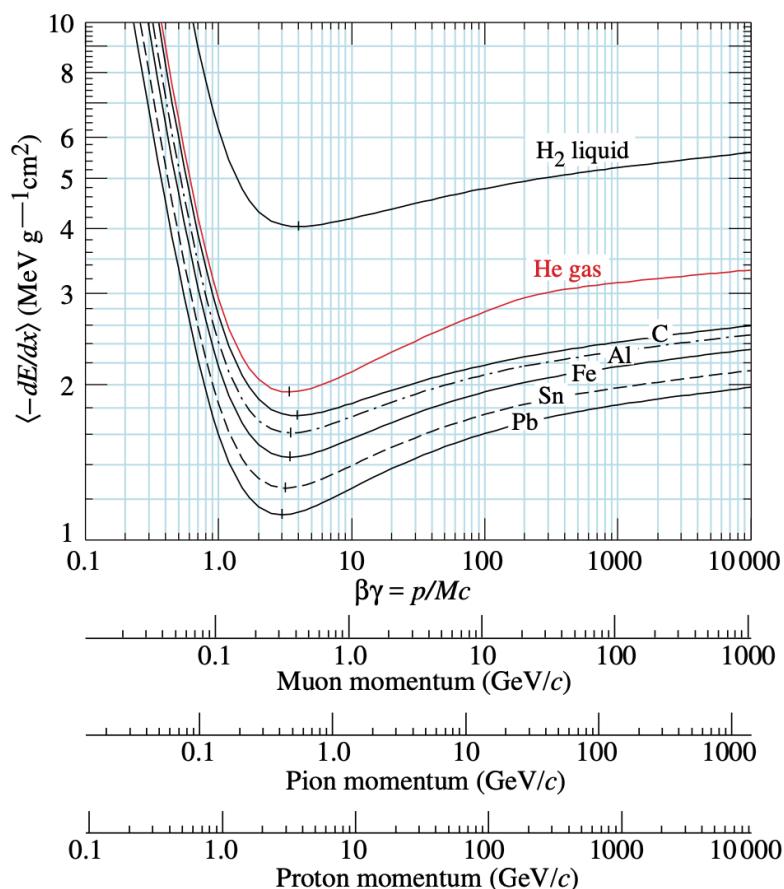
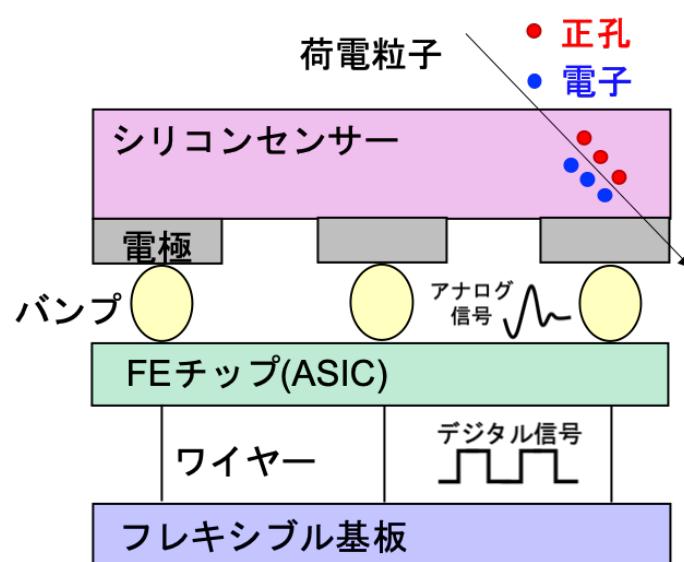
図 2.4 エネルギー損失と β の関係 [22]。

図 2.5 ピクセルモジュールの模式図。

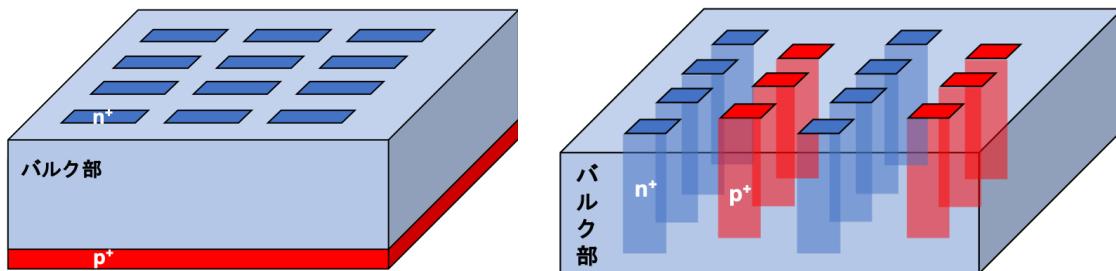


図 2.6 プラナーセンサー(左図)と 3D センサーの構造(右図)。

電極まで広げる必要があり、完全空乏化しなければならない。さらに、バルク部の n 型半導体は放射線損傷により p 型に型変換を起こし、空乏化の挙動が変化する。HL-LHC では放射線損傷の影響がより大きくなることが想定されているため、センサーの挙動変化をさせないように、ITk のピクセル検出器には n⁺-in-p 型のセンサーを用いる。n⁺-in-p 型の場合、空乏領域が n⁺ 電極と p 型バルクの境界から空乏領域が成長するため、完全空乏化しなくとも荷電粒子の通過により生じる電子を検知することができる。p 型半導体は放射線損傷により完全空乏化電圧が大きくなるためより大きな電圧が必要になるが、全空乏化電圧が耐電圧を超えたら部分空乏化による運用が可能である。

さらに、センサーの先端的な技術として 3D センサーがある。3D センサーはセンサー面に対して垂直に柱状の電極インプラン트をしたものである。3D センサーは電極間の距離が短いことから、全空乏化に必要な電圧が小さい。さらに生成した電子正孔対が電極に到達するまでの距離も短いため、格子欠損により生じたホールにトラップされる確率もプランーセンサーに比べて小さい。そのため、3D センサーはプランーセンサーに比べて放射線耐性の高いセンサーである。3D センサーは放射線損傷の影響が大きい IBL の一部のみに実装されており、ITk の最内層にも搭載する予定である。

2.2.2 FE チップ

FE チップは特定用途向けに複数機能を実装した集積回路 (ASIC: Application Specific Integrated Circuit) である。センサーの電極で収集された電荷は、バンプを通って FE チップに送られる。FE チップでは受け取ったアナログ信号を增幅、整形、デジタル処理を行い後段の読み出し基板に信号を送る。

センサーを通過する荷電粒子は、電子正孔対を生成する。シリコンの空乏層で 1 組の電子正孔対を生成するのに必要なエネルギーは 3.6 eV と一定のため、生成される電子正孔対の数はエネルギー損失 dE/dx に比例する。生成されたキャリアが電極付近に収集され、電極の内部電位に影響を与えて電流が流れる。この電流から得られるアナログ信号を FE チップにおいて増幅、整形を行う。アナログ信号はアンプ回路により増幅され、三角波になるよう波形整形が行われる。信号処理されたアナログ信号が Threshold を超えた時間幅を測定し、デジタル信号に変換する。このデジタル信号を **Time over Threshold (ToT)** と呼ぶ。アナログ信号を ToT に変換する概念図を図 2.7 に示す。時間幅は 25 ns 間隔のクロックの数で取得するため、デジタル信号として取得することができ、この信号が後段のフレキシブル基板へ転送される。

また、アナログ回路により信号の立ち上がりから三角波の頂点までにかかる時間は、電荷量に依存せず一定の値となるよう設定されている。そのため、図 2.8 に示すように、小さい電荷量から生成される信号は立ち上がりが遅くなってしまう。時間幅を表すクロックの間隔は 25 ns と短いため、アナログ信号のパルスの立ち上がりから Threshold を超えるまでの時間を表す **タイムウォーク** の効果を考慮する必要があ

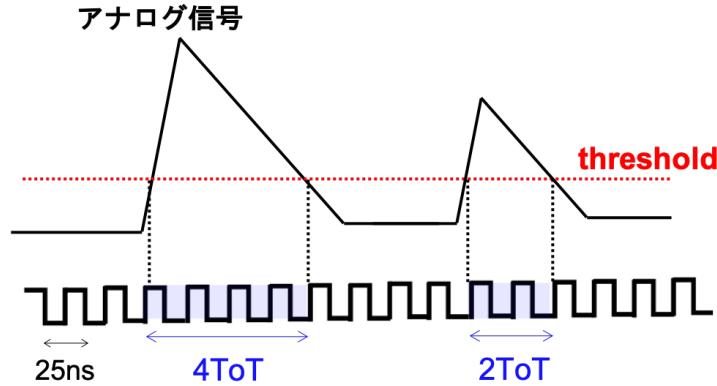


図 2.7 アナログ信号を ToT に変換する概念図。アナログ信号の三角波は Threshold を超えた時間幅に相当する量である ToT に変換される。

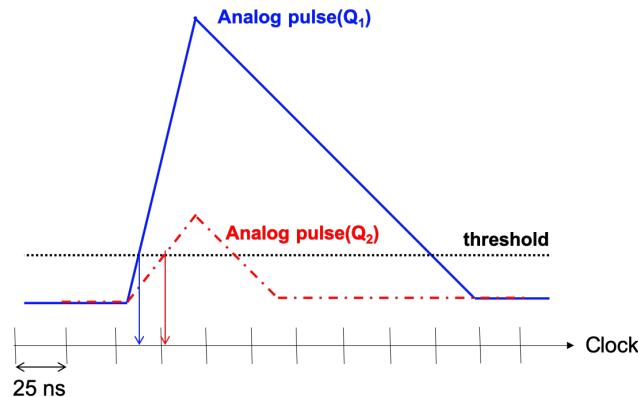


図 2.8 アナログ信号と Threshold を超えるタイミングについての概念図。図中の青線と赤線はある電荷量 ($Q_1 > Q_2$) に対するアナログ信号の概念図である。信号の立ち上がりのタイミングが同時にあっても、電荷量の小さい信号が Threshold を超えるタイミングは信号の立ち上がりよりも後ろのクロックと結び付けられることがある。

る。電荷量とタイムウォークの関係を図 2.9 に示す。電荷量の小さい信号は、タイムウォークの影響が大きくなり、本来とは異なる位置から ToT の測定を開始してしまう恐れがある。ATLAS における陽子衝突は 40 MHz (= 25 ns 周期) で起きているため、タイムウォークの影響が大きくなるものは異なる物理事象と関連付けてしまう可能性がある。そこで、このような影響を抑えるために、**Intime threshold** という新たな閾値を導入する。Intime threshold は、タイムウォークが 25 ns となるアナログ信号の電荷量として定義される。そのため、Intime threshold は Threshold よりも大きい値 (Threshold の値よりも 1500 e 程度大きい値) になるよう決定され、タイムウォークの影響の制御をすることができる。

現行のピクセル検出器 (IBL を除く) では **FE-I3** という FE チップを用いている。さらに読み出し速度等の性能を向上させたものが、IBL に用いられている **FE-I4** である。また、HL-LHC アップグレードに向けて新たな FE チップの開発が進んでいる。ITk に搭載する新型 FE チップは ITk pix v2 と呼ばれており、プロトタイプである RD53A および ITk pix v1 の製作が進んでいる。それぞれの FE チップの主な仕様の比較を表 2.1 に示す。

RD53A は ATLAS および CMS^{*2}が共同で開発を進めている HL-LHC のための試作器であり、試

^{*2} CMS は LHC 上の 4 つの衝突点の 1 つで行われている実験である。

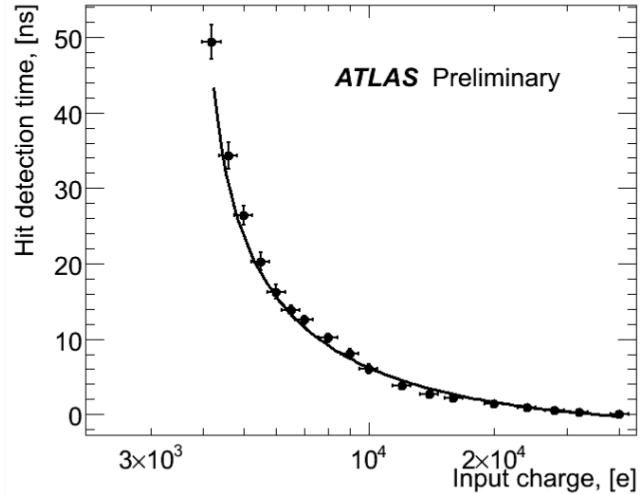


図 2.9 電荷量とタイムウォークの関係 [24]。

表 2.1 各 FE チップの主な仕様 [11]。

項目	FE-I3	FE-I4	ITk pix v2
チップサイズ [mm^2]	7.6×10.8	20.2×19.0	20.0×20.0
ピクセルサイズ [μm^2]	50×400	50×250	50×50
ピクセル数	18×160	80×336	400×384
データ転送速度 [Mbps]	40	160	1280×4
トリガーレート [kHz]	100	300	1000

験・比較のために3種類のアナログ回路を搭載している。3つの回路は Synchronous FE、Linear FE、Differential FE と呼ばれ、それぞれのアナログ信号の処理方法が異なる。各アナログ回路の性能比較の結果、ITk には Differential FE を用いることが決定している。図 2.10 に Differential FE のアナログ回路の概念図および ToT 取得の概念図を示す。Differential FE の主な特徴は、図 2.10 の (d) から (e) における変換のように2つの信号の差分を取ることにより、デジタル信号 (ToT) を生成することである。このように、2つの信号の差分を取ることにより、アナログ回路内部で生じるノイズの一部を相殺することができ、他の FE と比較して電気ノイズが低くなる。その結果、安定動作可能な最低 Threshold 値も小さくすることができる。Differential FE のみを搭載するプロトタイプが ITk pix v1 である。

ITk pix v1 は、外形形状と主な仕様について ITk に搭載される FE チップと同様の構造を持つ試作器である。ITk pix v1 の段階で発見された不具合やバグ等を修正し量産するものが、ITk に搭載する FE チップの **ITk pix v2** である。

2.3 放射線損傷

ATLAS 実験において、シリコンピクセル検出器は、ビーム衝突点のすぐ近くに配置される。そのため、陽子衝突から生成される多数の粒子が検出器中を通過するため、検出器は放射線による損傷を受ける。高放射線環境下で起こる典型的な放射線損傷はバルク損傷と表面損傷の2つに大別される。この節ではそれについて説明する。

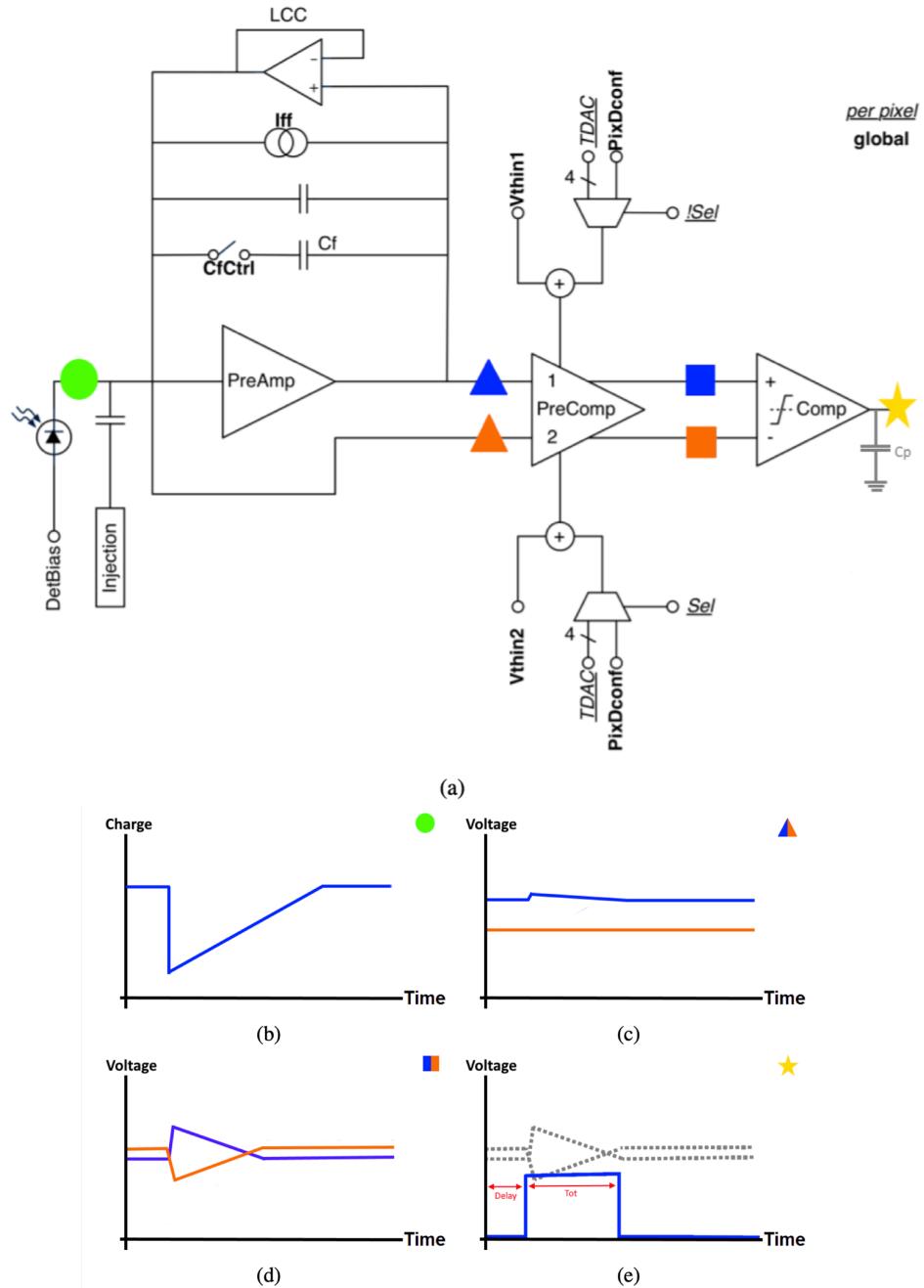


図 2.10 Differential FE のアナログ回路の概念図 (a) [27] と ToT 取得の概念図 (b-e) [28]。(b-e) の右上に記される記号は (a) の回路図における各記号での信号に対応する。(b) はセンサーからのアナログ信号、(c) はプリコンパレータ直前の 2 つの信号を表し、橙線が生信号、青線が生信号を反転増幅したものである。(d) はコンパレータ直前の 2 つの信号を表し、プリコンパレータによって波形整形及びオフセットが調整されている。(e) はコンパレータで変換されたデジタル信号である。2 つの信号の差分に相当する ToT のデジタル信号を取得できる。アナログ回路の Threshold はグローバルレジスタ (V_{thin1} , V_{thin2}) と各ピクセルに対して与える設定値 (TDAC) によって決まるオフセットの差で与えられる。

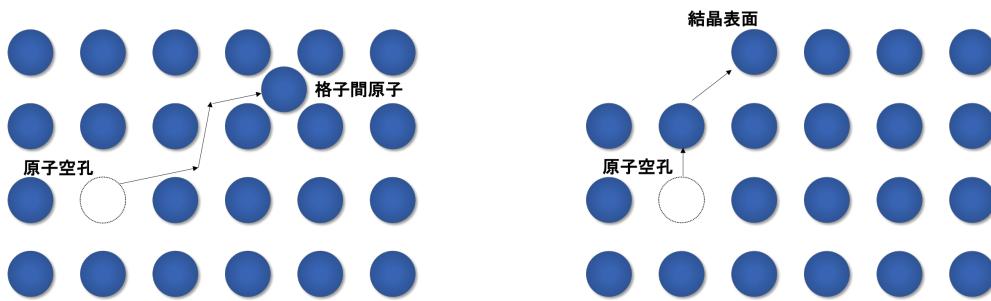


図 2.11 フレンケル欠陥(左図)とショットキ一欠陥(右図)。図中における青丸は原子核を表す。

2.3.1 バルク損傷

バルク損傷とは、放射線が結晶中のシリコン原子と相互作用し、原子が結晶位置から弾き出される現象である。弾き出された原子が格子間に原子となり、格子点ではない場所に入り込むものをフレンケル欠陥と呼ぶ。また、弾き出された原子が格子点を離れて結晶表面に移動し、結晶内に空孔のみが存在してできる欠陥をショットキ一欠陥と呼ぶ。

フレンケル欠陥とショットキ一欠陥はどちらも原子核欠損のため、実行的には p 型不純物として働く。これにより、検出器に以下のような影響を及ぼす。

- 暗電流の増加

格子欠陥は p 型不純物として働くため、バンドギャップ内に新たなエネルギー準位を作る。この準位が自由な正孔を作るため、暗電流が流れる。この電流はバルクが浴びる放射線量に比例して増加する。

- バルクの型変換と全空乏化電圧の増加

格子欠陥は p 型不純物として働くため、アクセプター濃度 N_A が増加させる。n 型半導体に格子欠陥が生じると実効的なドナー濃度 N_D が低下し、やがてアクセプター濃度が損傷前のドナー濃度より大きくなり、p 型半導体のように振る舞う。これを半導体の型変換という。また、p 型半導体に格子欠陥が生じると、実効的なアクセプター濃度 N_A が増大し、全空乏化電圧が大きくなる。放射線損傷による型変換および全空乏化電圧の測定結果を図 2.12 に示す。

2.3.2 表面損傷

表面損傷は、シリコンセンサーの表面を覆う誘電体等が受ける放射線損傷の総称であり、主に 300 keV 以下のエネルギーを持つ光子や荷電粒子によって生じる。表面を覆う SiO_2 層を荷電粒子が通過し、電子正孔対が生成される。電子正孔対は大部分は再結合するが、 SiO_2 内での正孔の移動度は電子の移動度に比べて非常に小さいため、正孔に捕獲されなかった電子は読み出し電極に収集される。再結合しなかった正孔が Si-SiO_2 界面に集まり、正の電場を作る。この電場に電子が引きつけられることにより、電荷収集効率が低下する。

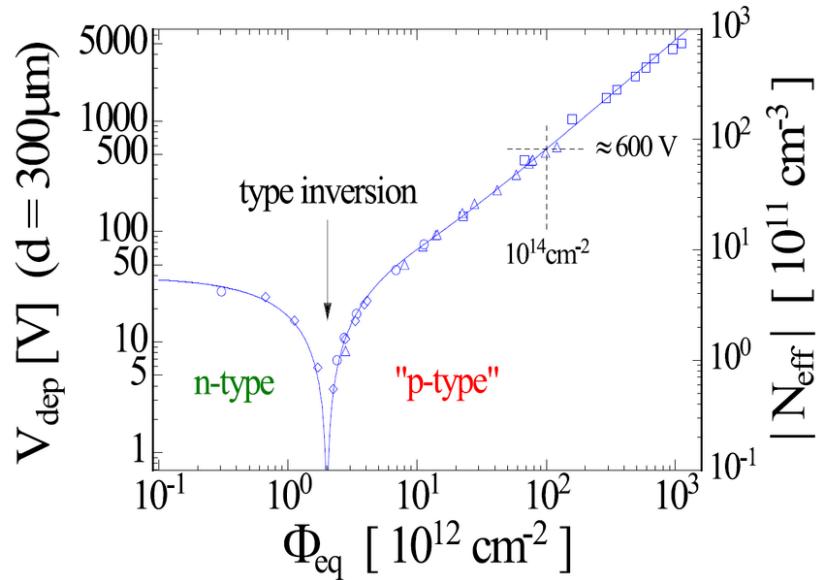


図 2.12 n 型シリコン検出器を用いた放射線損傷による型変換および全空乏化電圧の測定結果 [23]。

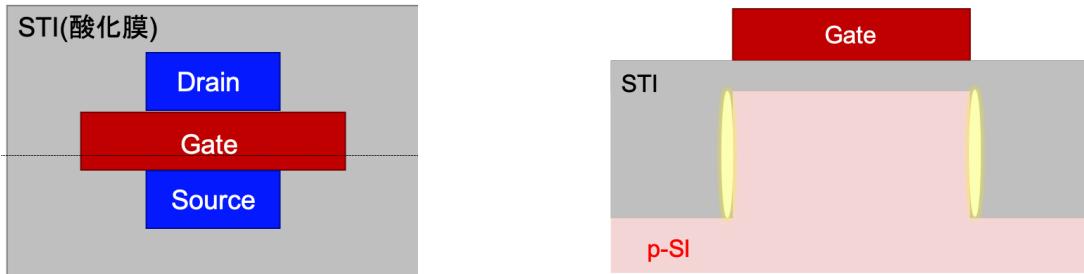


図 2.13 MOS トランジスタの模式図。左図の点線部の断面図が右図に相当する。右図の黄色の領域はトータルドーズ効果により、正に帯電した酸化膜界面を表す。

表面損傷とトータルドーズ効果

ATLAS の FE チップには、回路内に MOS トランジスタが使用されている。MOS トランジスタの模式図を図 2.13 に示す。MOS トランジスタは、ゲートに電圧をかけることにより電荷が誘起され、ソースとドレイン間に電流が流れる仕組みになっている。MOS トランジスタは STI と呼ばれる酸化膜により周囲と絶縁している。しかし、トータルドーズ効果と呼ばれる放射線損傷により、酸化膜がイオン化し、その結果正孔が酸化膜界面に収集される事により、図 2.13 の右図の黄色の領域が正に帯電する。それにより、シリコン内に負の電荷が誘起され、本来絶縁されているはずのソース・ドレイン間に電流が流れやすくなる。

トータルドーズ効果 (TID: Total Ionizing Dose) とは、多量の放射線による電離作用によって引き起こされる。半導体内の電離作用によって生じた正孔が表面の酸化膜にトラップされるなど、半導体の特性に影響を与える効果である。トータルドーズ効果と FE チップ電流の関係を図 2.14 示す。

放射線損傷が少ない場合 ($TID \lesssim 1$ [Mrad])、トータルドーズ効果によって生じた正孔は、Si-SiO₂ 界面に収集され電場を形成する。その電場に電子が引きつけられる事により、本来絶縁されているソース・ドレイン間に電流が流れやすくなってしまう。その結果、FE チップに流れる電流が増加し、回路内のアンプやディスクリミネータなどあらゆる回路の挙動に影響を与える。図 2.15 にトータルドーズ効果と

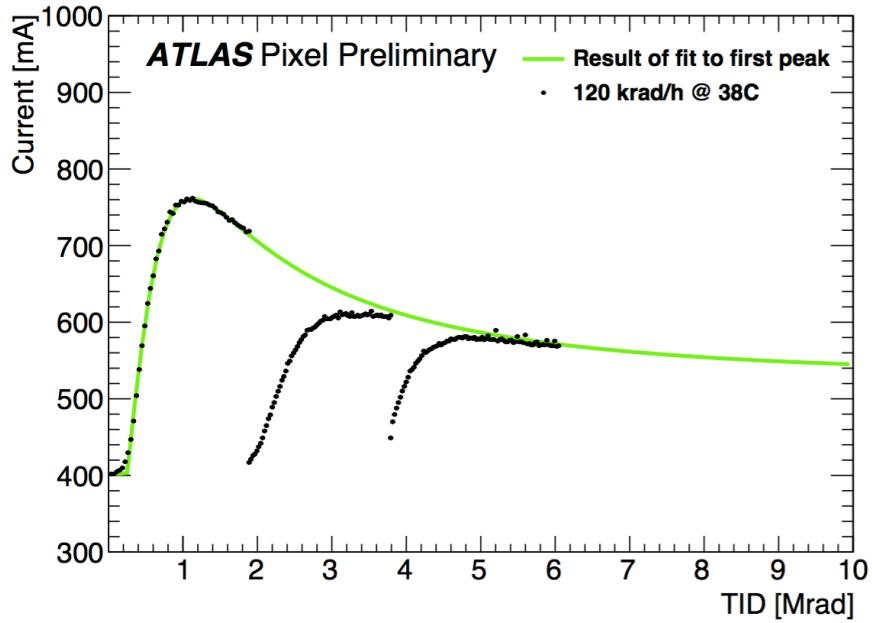


図 2.14 トータルドーズ効果と FE チップ電流の関係 [25]。FE チップの周囲温度 38°C および単位時間あたりの放射線量 120 krad での測定結果である。緑線は最初のピークに対するフィッティング結果である。また、各ピークが最大になった後、FE チップを数時間アニールする事により、部分的に放射線損傷が回復していることがわかる。

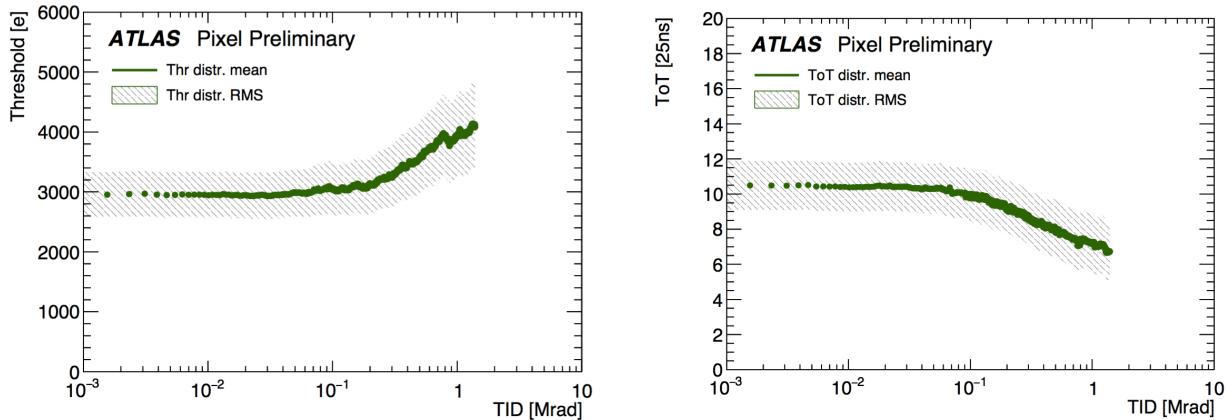


図 2.15 トータルドーズ効果と Threshold および ToT の関係 [25]。測定環境は、FE チップの周囲温度 5°C および単位時間あたりの放射線量 10 krad であり、これは 2016 年における IBL の運用状況と同程度である。

Threshold および ToT の関係を示す。この図から、放射量が増えると Threshold は大きくなり、ToT の値は小さくなることがわかる。

一方で、放射線損傷が大きくなる ($\text{TID} \gtrsim 1 [\text{Mrad}]$) と、正孔付近にも電子が捕獲されるようになり、Si-SiO₂ 界面に収集された正孔による電場が徐々に小さくなる。そのため、リーク電流が小さくなり、Threshold および ToT の値が変化する。この場合については、放射量が増加すると Threshold は小さくなり、ToT は大きくなる。

第3章

現行ピクセルモジュールの電荷較正

FE チップから得られる ToT (Time over Threshold) を荷電粒子がシリコンセンサーに落とす電荷量に較正する必要がある。本章では、電荷較正のための試験電荷生成回路の詳細について説明し、その後に電荷較正手法について述べる。

3.1 アナログ回路

図 3.1 に FE-I3 のアナログ回路の概略図を示す。この図は 1 つのピクセルに対するアナログ回路であり、FE チップ上の 18×160 個のピクセルに対して同様の回路が搭載されている。センサーにおいて生成された電子による信号を FE チップにおいて送信するために、それらはバンプにより接合されている。生成された電子は内部電位によりバンプに向かってドリフトし、その電子により電極表面の内部電位が変化し、バンプに電流が流れる。その電流によるアナログ信号をバンプの接合部から FE チップへ送りプリアンプで整形および増幅を行う。キャパシタ C_F は信号により充電され、電荷量に依らない一定のフィードバック電流によって放電される。図 3.1 の 8 bit の IF DAC によって FE チップ全体のピクセルについてのフィードバック電流の増幅率の調整を行い、3 bit の FDAC を用いてピクセルごとのフィードバック電流の増幅率の調整を行う。これにより、バンプからの信号は図 3.2 のように三角波となり、その波高は入射電荷量によって決定される。整形および増幅された信号を ToT にデジタル変換し、後段のフレキシブル基板へ信号を送る。

一方で、Threshold の測定や電荷較正のために用いる電荷は FE チップ内の回路で生成する。FE チップにおいて試験電荷を生成するために、電圧 V_{cal} を自由に設定できる回路と 2 つのキャパシタ C_{low} , C_{high} が搭載されている。試験電荷生成のために、 $C_{\text{low}} = 8 \text{ fF}$ のキャパシタを用いる場合と、 $C_{\text{low}} + C_{\text{high}} = 40 \text{ fF}$ の合成キャパシタを用いる場合がある。 $C_{\text{low}} + C_{\text{high}}$ の合成キャパシタを用いる場合は生成した試験電荷から得られる ToT が約 10% 小さく出力されることがわかっている。そのため、Threshold の測定や電荷較正を行う際には、 C_{low} のキャパシタを用いて試験電荷の生成を行う。

3.2 電荷較正手法

ピクセルモジュールの出力である ToT を較正し、荷電粒子が落とした電荷量に変換する方法について説明する。各ピクセル間の差異を少なくするために、ToT の較正を行う前に、Threshold や ToT を目標値になるようチューニングを行う必要がある。以下ではチューニングと電荷較正の方法について説明する。

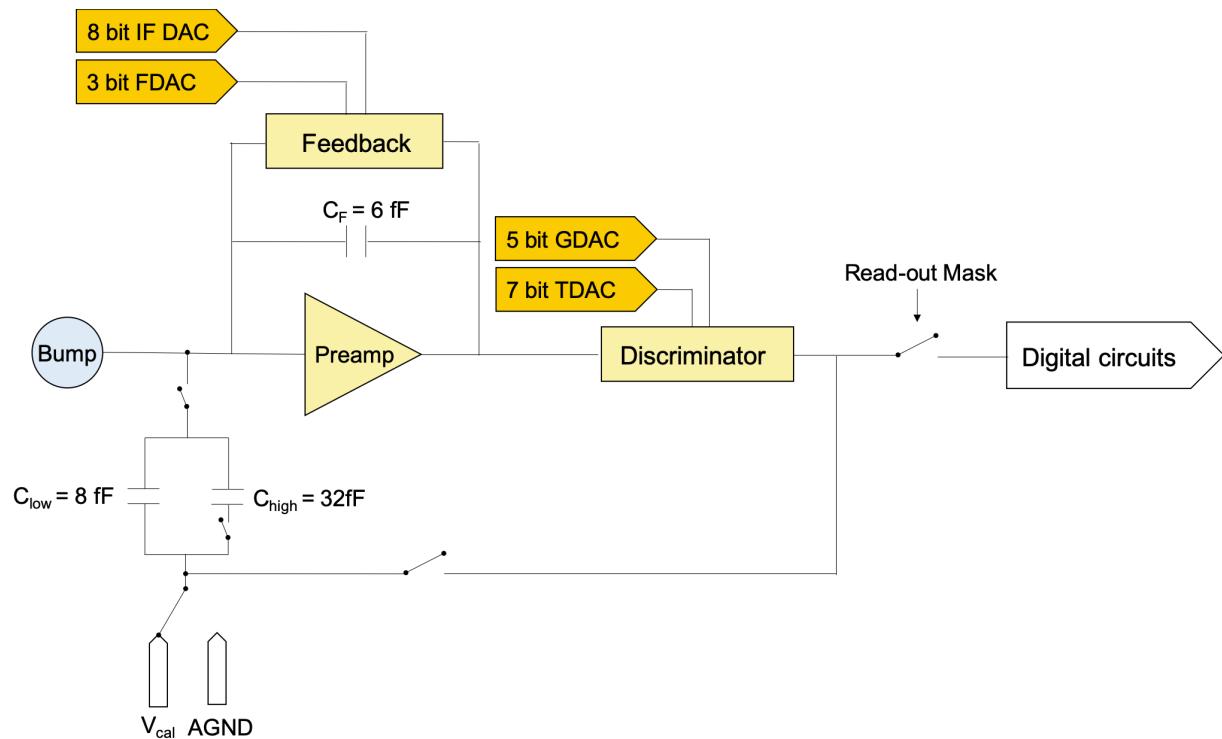


図 3.1 FEI3 アナログ回路の概略図。電荷較正や Threshold スキャンのための試験電荷は V_{cal} とキャパシタ (C_{low} , C_{high}) の組み合わせによって生成される。

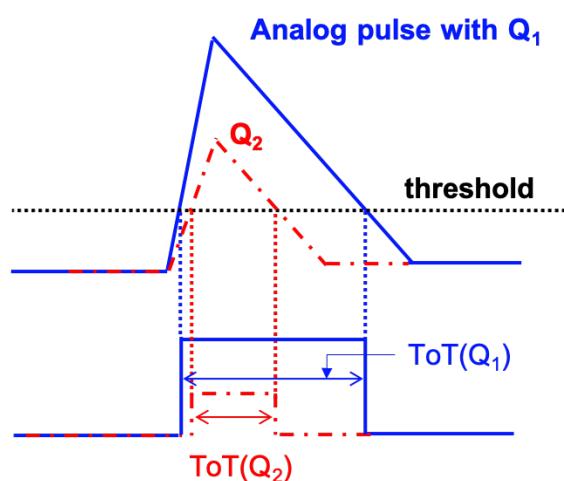


図 3.2 ToT と荷電粒子がシリコンセンサーに落とす電荷量 Q の概念図。図中の青線と赤線はある電荷量 ($Q_1 > Q_2$) が ToT に変換される概念図である。図中上半分の三角波はアナログ回路のフィードバック回路にて整形・増幅された信号であり、その信号が Threshold 値を超える時間である ToT に変換される。三角波立ち上がりはピークまでに約 40 ns になるよう調整されるため電荷量により傾きが異なるが、立ち下がりはフィードバック回路によって制御されるため、電荷量に依存せず一定の傾きである。

表 3.1 各 Layer における Threshold の目標値。1 行目の括弧内の数字は Run2 における積分ルミノシティを表す。

Layer 名	2015 年 (4 fb^{-1})	2016 年 (39 fb^{-1})	2017 年 (50 fb^{-1})	2018 年 (63 fb^{-1})
IBL	2500 e	2500 e	2500 e	2000 e
B-Layer(中央)	3500 e	3500 e	5000 e	4300 e
B-Layer(前方)	3500 e	3500 e	5000 e	5000 e
Layer1	3500 e	3500 e	3500 e	3500 e
Layer2	3500 e	3500 e	3500 e	3500 e
Disk	3500 e	3500 e	4500 e	3500 e

表 3.2 各 Layer における ToT の目標値。1 行目の括弧内の数字は Run2 における積分ルミノシティを表し、それ以降の括弧内は各 ToT に対する電荷量であり、この値は MIP 粒子がセンサーに落とす電荷量を表す。

Layer 名	2015 年 (4 fb^{-1})	2016 年 (39 fb^{-1})	2017 年 (50 fb^{-1})	2018 年 (63 fb^{-1})
IBL	10ToT (16 ke)	8ToT (16 ke)	8ToT (16 ke)	10ToT (16 ke)
B-Layer	30ToT (20 ke)	18ToT (20 ke)	18ToT (20 ke)	18ToT (20 ke)
Layer1	30ToT (20 ke)	30ToT (20 ke)	30ToT (20 ke)	30ToT (20 ke)
Layer2	30ToT (20 ke)	30ToT (20 ke)	30ToT (20 ke)	30ToT (20 ke)
Disk	30ToT (20 ke)	30ToT (20 ke)	30ToT (20 ke)	30ToT (20 ke)

3.2.1 チューニング

各ピクセルにおける Threshold と、ある基準電荷量の信号に対する ToT を任意の値に調整するために FE チップのチューニングを行う。Run2 における Threshold および MIP 相当の参照電荷量に対応する ToT の目標値をそれぞれ表 3.1、表 3.2 に示す。さらに、2022 年 3 月から始まる Run3 では、B-Layer の Threshold の目標値は 3500 e であり、ToT の目標値は MIP 相当の参照電荷量である 20 ke に対して 18 ToT、IBL の Threshold の目標値は 1500 e であり、ToT の目標値は MIP 相当の参照電荷量である 16 ke に対して 10 ToT である。

チューニングには、ある FE チップにおける全ピクセルの Threshold と任意の値に対する ToT を調整するための global チューニングと各ピクセルごとの値を目標値に近づける local チューニングがある。はじめに、global チューニングを行い、図 3.1 における IF DAC および 5 bit の GDAC(**G**lobal **D**AC) の値を調整し全ピクセルの Threshold または ToT を大まかに目標値に合わせる。この段階では、全ピクセルから得られる Threshold 分布および ToT 分布の分散は大きいため、local チューニングにより図 3.1 における FDAC および 7 bit の TDAC (**T**rim **D**AC) の値を調整し、各ピクセルが返す値を目標値にさらに近づける。

チューニングの後、Threshold スキャンや ToT スキャンを行い各ピクセルにおける値を測定する。Threshold スキャンおよび ToT スキャンの方法を以下に述べる。

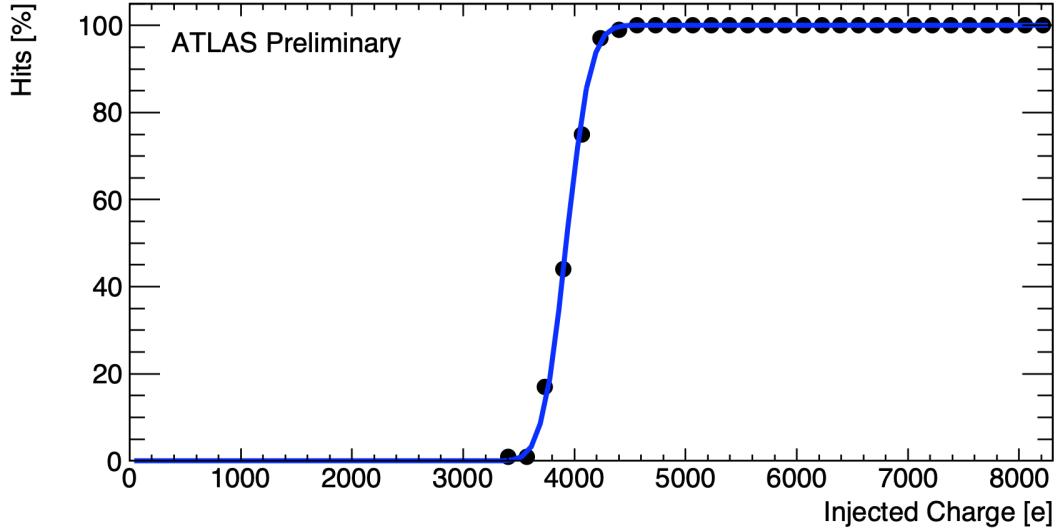


図 3.3 検出効率と試験電荷の関係 [29]。黒点はある試験電荷に対する応答率の測定点であり、青線は式 (3.1) によるフィッティング結果を表す。検出効率が 50% となる試験電荷の値が Threshold であり、検出効率が 16.5% と 83.5% となる試験電荷の幅の半値がノイズである。

Threshold スキャン

Threshold スキャンでは、各ピクセルに試験電荷を入射し Threshold とノイズを測定する。試験電荷を増加させつつ検出効率を測定し、図 3.3 に示すような分布を作成する。この分布は S 字を描くため、S カーブと呼ばれている。図 3.3 中の青線は S カーブのフィッティングであり、式 (3.1) のような誤差関数を用いて定義される。

$$f(x) = 0.5 \times \left[2 - \text{erfc} \left(\frac{x - Q_{\text{threshold}}}{\sigma \times \sqrt{2}} \right) \right] \quad (3.1)$$

S カーブにおいて、検出効率が 50% となる試験電荷の値を Threshold と定義し、検出効率が 16.5% と 83.5% となる試験電荷の幅の半値 (式 (3.1) の σ) をノイズと定義する。

ToT スキャン

ToT スキャンでは、一定の試験電荷を各ピクセルに 100 回入射させ、その試験電荷に対する ToT の値の測定を行う。各ピクセルから得られる ToT の値はデジタル値であるため整数値であるが、100 回のスキャンの平均値をある試験電荷に対する ToT とするため、この値は小数値を取り得る。

3.2.2 電荷較正

2.2.2 節で示した様に、原理的には ToT と荷電粒子がシリコンセンサーに落とす電荷量 Q は線形関係になると予想される。しかし、実際にはタイムウォーク等の二次的な効果を受け、線形関係ではなくくなってしまう。図 3.4 に、タイムウォークの影響が大きくなる小さい電荷量について、パルスの立ち上がり点をずらした際の ToT の変化の様子を示す。タイムウォークの影響が大きくなる電荷量について、パルスの立ち上がり点がずれると Threshold を超えるクロックウィンドウが 1 つ後ろにずれてしまうことが発生しやすくなり、小さい ToT を出力する割合が増える。そのため、小さい電荷量における ToT スキャンでは、原理的に予想される ToT と比べて平均的な ToT が小さくなる。さらに、タイムウォークによりパ

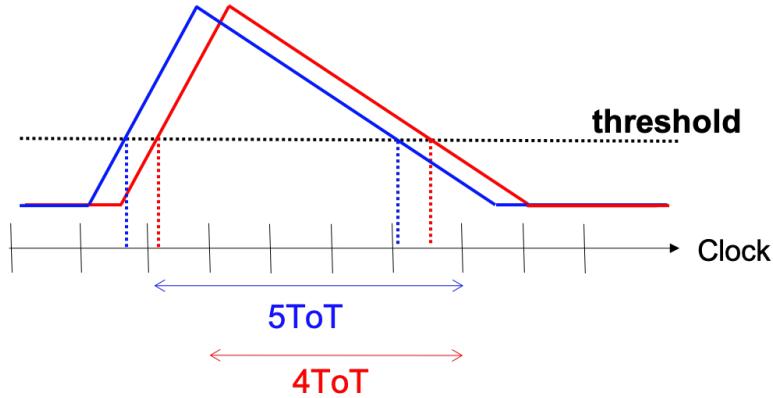


図 3.4 同じ電荷量のアナログ信号においてパルスの立ち上がり点をずらした際の ToT の変化の様子。タイムウォークの影響が大きくなる電荷量に対しては、小さい ToT を出力することが多くなる。

ルスの立ち上がりの傾きが電荷量によって異なることから、小さい電荷量において ToT と電荷量の関係は線形ではなくなると考えられる。

このような二次的な効果を含めた電荷較正式は、式 (3.2) のように表される。

$$\text{ToT} = p_0 \frac{p_1 + Q}{p_2 + Q} \quad (3.2)$$

式 (3.2) に示した 3 つのパラメータを求めるために、図 3.1 に示したアナログ回路の V_{cal} の値を変えることにより電荷量を変化させつつ試験電荷を入射し、ToT の較正を行う。電荷較正は各ピクセルに対してパラメータを求めるのではなく、FE チップごとに一律の値を用いる。そのため、ToT スキャンから得られた ToT の全ピクセルの平均値を用いて FE チップに対する電荷較正を行う。

FE-I3 を用いている現行ピクセル検出器は 16bit の ToT を持つのに対して、FE-I4 を用いている IBL については ToT の出力が 4bit と少ない。このような理由から、Run3 からは IBL は式 (3.2) によるフィッティングは行わず、ToT の値と試験電荷の値の対応情報をフルックアップテーブルを用いて較正を行う。本研究では式 (3.2) を用いた電荷較正手法について取り扱うため、以下では FE-I3 を用いている現行ピクセル検出器の電荷較正のみについて述べる。

3.3 電荷較正結果の履歴

Threshold のチューニングや電荷較正を行った後、それらに関する情報は CERN に設置されているデータベース [32] に保存する必要がある。このデータベースでは電荷較正に関する情報や検出器の配置や温度等の DCS(Data Control System) 情報、さらにトリガー情報等を保管する。これらの情報は、測定におけるイベント選別やモンテカルロシミュレーションのためのイベント作成等に用いられる。

Threshold スキャンおよび ToT スキャンは各ピクセルごとの値を出力するが、データベースへはある FE チップにおける Threshold の平均値および ToT の平均値を用いた電荷較正式 (3.2) のパラメータのみを登録する。また、各ピクセルの大部分は表 2.1 に示した構造をしているが、FE チップの境界付近では不感領域をなるべく少なくするために、構造の異なったピクセルを配置する。FE-I3 の境界付近におけるピクセルの構造を図 3.5 に示す。表 2.1 に示した通常のピクセルのことを normal ピクセル (図中の青の領域) と呼び、黄色の領域のピクセルを long ピクセル、赤色の領域を ganged ピクセルと呼ぶ。normal ピクセルの大きさは $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ であるのに対して、long ピクセルは $50 \times 600 \mu\text{m}^2$ であり、長方形の

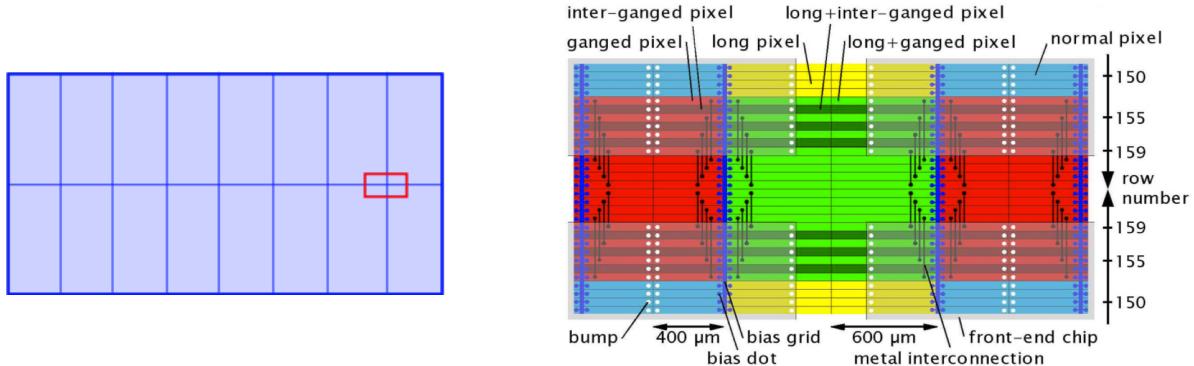


図 3.5 ピクセルモジュール全体の概念図(左図)の FE チップ境界付近のピクセルタイプ(右図) [37]。左図はピクセルモジュール全体の概念図を表し、右図は左図の赤枠の領域を拡大したものである。FE-I3 は 160×18 [行 × 列] のピクセルを持ち、 2×8 [行 × 列] の FE-I3 を並べて 1 つのピクセルモジュールを構成する。FE-I3 の 1 列目および 18 列目が long ピクセル、154, 156, 158, 160 列目が ganged ピクセルと定義される。2 つの ganged ピクセルの間には inter-ganged ピクセルというピクセルが存在するが、ノイズ等の特性は normal ピクセルと同等の値を持つ。

長辺の長さが normal ピクセルの 1.5 倍となっている。また、ganged ピクセルは normal ピクセル 2 つをワイヤーで接続した構造をしている。このような構造の違いから、ノイズ等の特性が異なるため、データベースへはそれぞれの値をアップロードする。

データベースに登録する情報を以下に示す。

- Threshold の平均値
- Threshold の分散
- Threshold のノイズ
- In-time threshold
- 電荷較正式 (3.2) における 3 つのパラメータ
- 電荷較正におけるフィッティングの誤差

これらのパラメータをデータベースに登録するために、電荷較正データを用いて各値を 1 つのファイルにまとめる必要がある。しかし、ピクセルモジュールの電荷較正では正しく結果を出力しない場合があるため、電荷較正結果を適切な値に補完する必要がある。次章において、電荷較正の際に生じる問題とその補完方法について説明する。

第4章

電荷補正の最適化

Threshold、ToT のチューニングおよび電荷較正を行った後、それぞれのパラメータが適切な値を保持していることを確認しデータベースに必要なパラメータ情報の登録を行う。電荷較正では正しく結果を出力しない場合があるため、結果に適切な値を補完しデータベースにアップロードする。ATLAS ピクセル検出器に搭載されている非常に多くの FE チップに対して電荷較正が一括に行われるため、全ての FE チップについての結果に問題が無いかを確認する必要がある。本研究では、電荷較正の際に発生するいくつかの問題に対し例外処理を行い、より適切な値に近い値を補完するアルゴリズムの開発を行った。本章では、電荷較正で発生する問題と、その問題に対する処理方法について説明する。

4.1 電荷較正における補正の概要

電荷較正では、ピクセル検出器および IBL に搭載された計 28400 個の FE チップを同時に操作するため、全てが正常に機能しないことがある。電荷較正における問題は主に以下の 2 つがあげられる。

1. 不適当な電荷を使った電荷較正
2. データの欠損

1 つ目の問題に関して、ピクセルモジュールの電荷較正では FE チップに搭載された回路を用いて試験電荷を生成し、Threshold スキャンや ToT スキャンを行う。電荷生成のための回路のいずれかの部分に故障等の問題があると、誤った試験電荷を生成してしまう。問題がある場合とない場合の試験電荷について、電荷較正式 (3.2) を用いてフィッティングした結果を図 4.1 に示す。図 4.1において、左図は理想的なフィッティング結果を表しており、全ての点がフィット曲線上に乗っていることがわかる。この様に、ToT とセンサーが落とす電荷量は、おおよそ線形関係にあることがわかる。

一方で、右図は電荷生成の回路に問題のある FE チップにおける電荷較正結果であり、電荷量の大きい 3 つの試験電荷について ToT の値がほとんど同じ値になっている。この原因は、試験電荷生成のための回路における電圧 V_{cal} の値が正しくキャパシタに渡されないことにある。 V_{cal} は Plsr DAC と呼ばれる 10 bit の値により決定される。 V_{cal} と Plsr DAC の関係は式 (4.1) のように、1 次式で与えられる。

$$V_{cal} = a + b \text{ (Plsr DAC)} [\text{mV}] \quad (4.1)$$

ここで、 a , b は較正によって決定される定数であり、FE チップごとに個体差がある。ある FE チップに対する V_{cal} と Plsr DAC の関係の測定結果を図 4.2 に示す。この図において、Plsr DAC ≈ 750 までは V_{cal} と Plsr DAC の値が線形となっているが、それ以降の Plsr DAC 値においては V_{cal} が飽和している

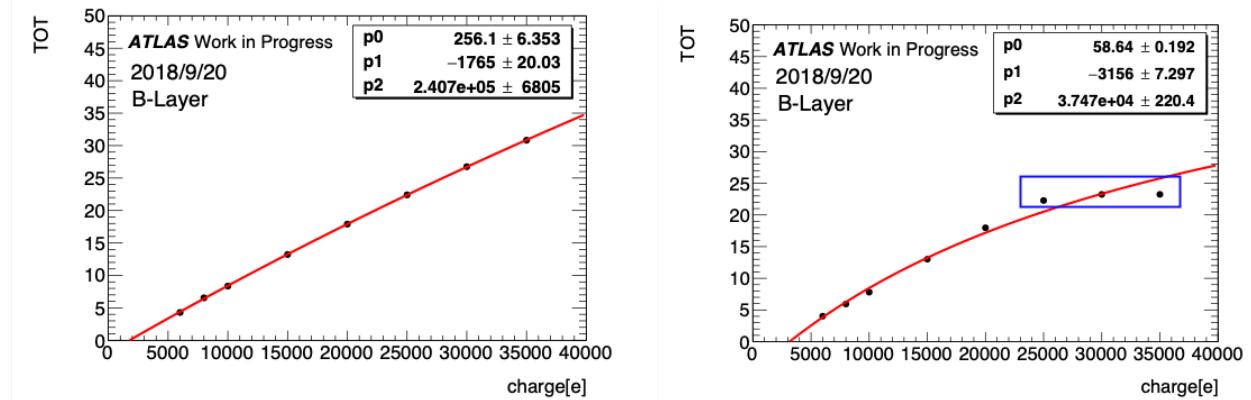


図 4.1 電荷較正式 (3.2) を用いてフィッティングした結果。左図は理想的なフィッティング結果を表しており、右図は正しい ToT が得られていない点を含むフィッティング結果である。

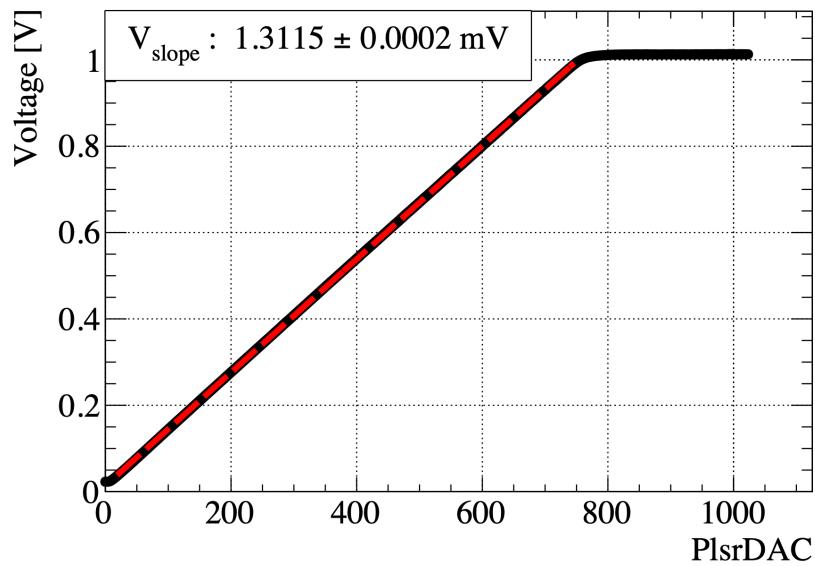


図 4.2 V_{cal} と Plsr DAC の関係の測定結果 [35]。黒点は各 Plsr DAC に対する V_{cal} の測定点を表し、赤線は式 (4.1) を用いたフィッティング結果である。図中における V_{slope} は赤線の傾きであり、式 (4.1) における b に対応する。

ことがわかる。この V_{cal} の飽和は、試験電荷生成回路におけるキャパシタ C_{low} および C_{high} の内、 C_{low} のみを用いて試験電荷を生成した場合に発生しやすいことがわかっている [36]。図 3.1 に示したように、 C_{high} の前に配置されているスイッチを用いる事により使用するキャパシタの選択を行うことができる。電荷較正の際には、 C_{low} のみを用いるためこのスイッチは開放されているが、 V_{cal} の値が大きいときはグランドへのリーク電流が大きくなってしまう。そのため、ある値以上の電荷を持つ試験電荷を正確に取得することができず、正しい電荷較正結果が得られない。 V_{cal} の飽和が起きていると予想される図 4.1 の右図の場合は、電荷較正に使用された試験電荷の内、正しい ToT が得られていない 2 点を取り除き、再較正を行う必要がある。

2 つ目の問題に関して、ある FE チップに対してスキャンが失敗してしまった時にデータが欠損してしまうことがある。例えば、S カーブを用いて Threshold の値を計算するアルゴリズムについて、S カーブのフィッティングが失敗した際には Threshold の値がデフォルトで **0** が出力されるようになっている。そのため、ある FE チップ上の全てのピクセルで S カーブのフィッティングが失敗しているような場合は

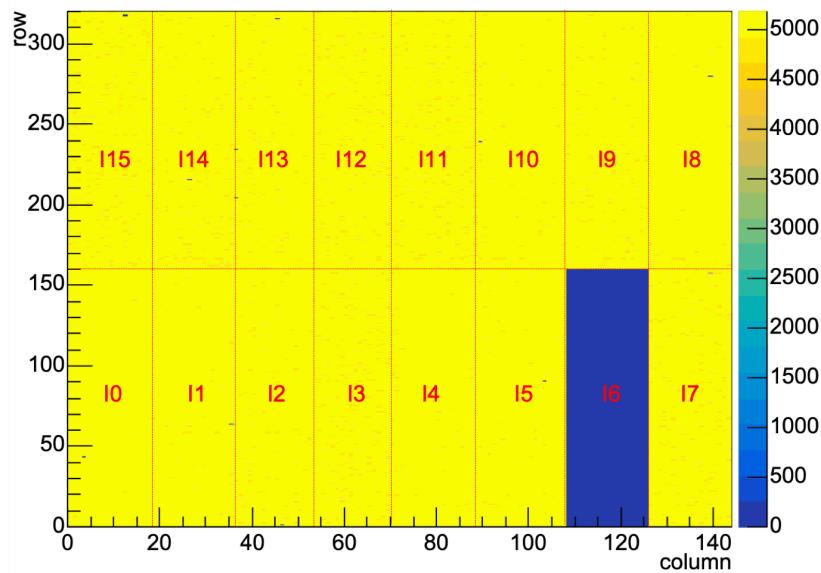


図 4.3 欠損が含まれるピクセルモジュールについての Threshold 分布。赤色の点線は 2×8 [行 × 列] 上に配置された FE-I3 の境界部分を表す。この図のように、Threshold スキャンや ToT スキャンの結果はモジュールごとに出力され、行と列の領域を指定することにより FE チップの識別を行うことができる。

データを失い、図 4.3 の I6 が示す領域のように FE チップ上の全てのピクセルにおいて Threshold の値は 0 を出力する。このように、ある FE チップについて全てのデータが欠損してしまっている場合には、他の電荷較正結果をコピーすることにより補完を行う。あるピクセルモジュールにおいて FE チップの一部の結果が欠損してしまっている場合は最も近い FE チップから値をコピーすることにより補完を行う。図 4.3 のようにあるモジュール上の一FE チップにデータの欠損が見つかった場合は、最も近い FE チップ (図 4.3 の場合は I5, I7, I9 のいずれか 1 つ) から値をコピーすることによって補完作業を行う。一方で、あるモジュールについて全ての FE チップの結果が欠損している場合は、直前に行われた電荷較正結果をコピーすることにより補完を行う。

4.1.1 Run2 の電荷較正の再補正

ATLAS に搭載されたピクセル検出器および IBL のピクセルモジュールについて電荷較正を行うが、測定を行っていると放射線損傷の影響によって、補正值がずれてしまう。図 4.4 に Run2 における IBL の MIP 粒子に対する ToT の推移を示す。この ToT の推移はトータルドーズ効果による放射線損傷 (図 2.14 参照) を受けることによるものである。2015 年の Run2 序盤における放射線損傷が小さい場合 ($TID \leq 1$ [Mrad])、放射線損傷により FE チップ電流は増加する。そのため、実行的な Threshold 値が大きくなり、MIP 粒子に対する ToT は小さくなる (図 4.4 の上図)。一方で、2018 年の Run2 終盤における放射線損傷が大きい場合 ($TID \geq 1$ [Mrad])、放射線損傷により FE チップ電流は小さくなる。そのため、実行的な Threshold 値が小さくなり、ToT の値は大きくなる (図 4.4 の下図)。

このように、放射線損傷を受けることにより ToT の値が目標値である 10 ToT から変化していることがわかる。目標値から大きくずれてしまうと、検出器を通過する荷電粒子がセンサーに落とす電荷量を正確に測定できなくなる。さらに、Threshold や ToT の分散も大きくなることから、信号とノイズの分離が悪くなる可能性がある。目標値からのずれを補正するため、2018 年における電荷較正は 2 週間から 4

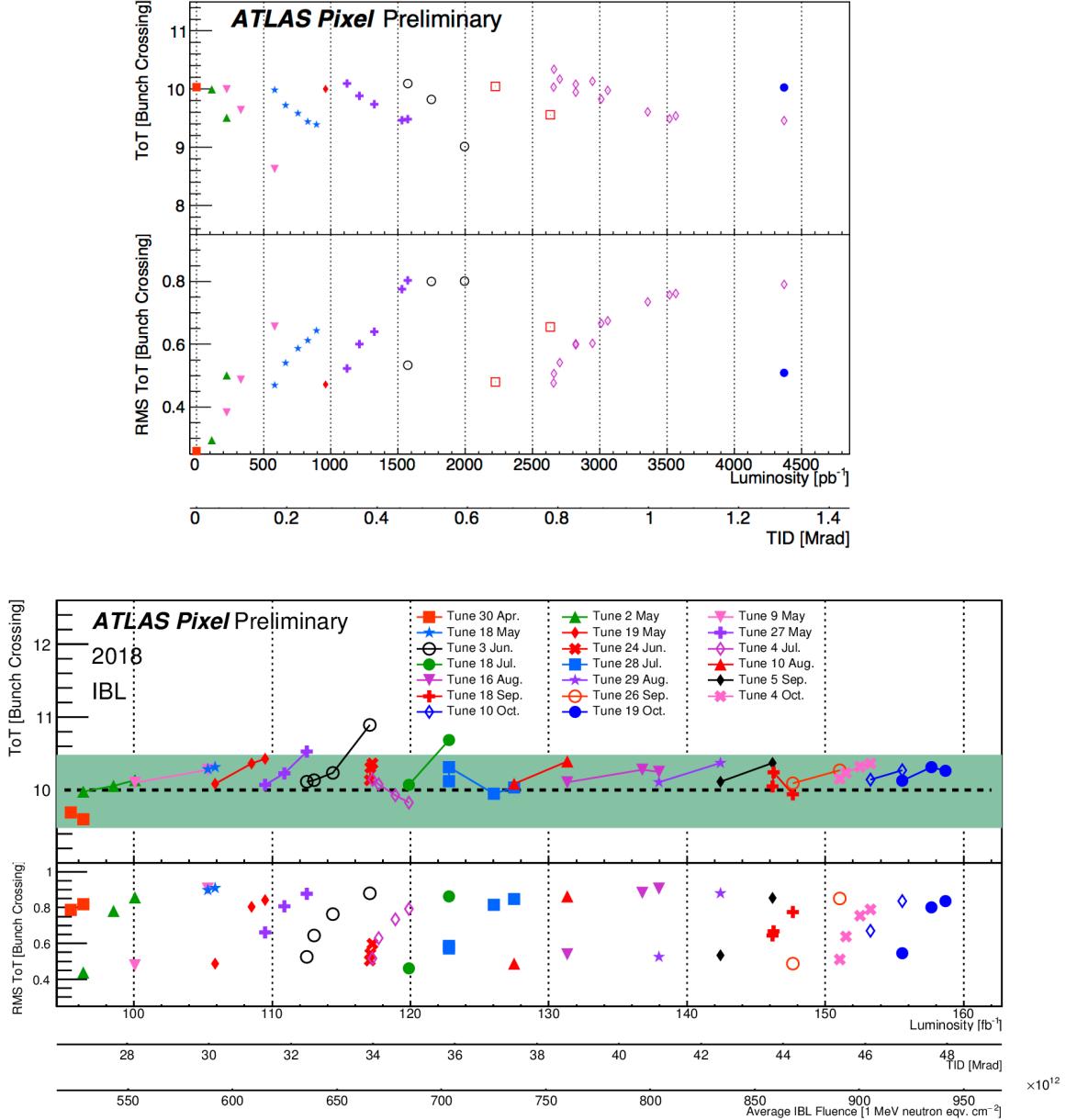


図 4.4 IBL のルミノシティに対する ToT の変化。各マーカーの左端は電荷較正直後の ToT スキャニング結果であり、電荷較正を行う事により放射線損傷によるずれが補正されている様子がわかる。上図は 2015 年における ToT の変化 [33] であり、左端は Run2 開始時を表す。下図は 2018 年における ToT の変化 [34] で右端は Run2 の最後を表す。IBL の ToT の目標値は 16 ke の電荷量に対して 10 ToT であるが、トータルドーズ効果の影響を受け目標値からはずれてしまう。

週間の周期で行い、電荷較正の後には 4.1 節で説明した問題を取り除くため、補完作業を行う必要がある。

これまで、電荷較正後の補完作業は 1 人の担当者による手作業で行われていた。Run3 からは放射線損傷による影響がさらに大きくなることから、電荷較正の頻度が 10 日に 1 度程度になる予定であり、この作業を行うのは非常な労力が伴う。さらに、これまで行っていた補正では手作業による補正であることから、担当者によっては異なる値を補完してしまうことがある。本研究では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の開発を行った。次節からその詳細について説明する。

4.2 電荷較正の補正

図 4.1 の右図に示すように、電荷生成のための回路の個体差により正しい電荷が生成できず、誤った ToT を持つ電荷を用いて電荷較正を行ってしまう場合がある。この様な点を取り除くために、これまで式 (4.2) を用いて電荷較正結果の評価を行っていた。

$$\Delta d = \sum_{i=1}^N \frac{|ToT_{true,i} - ToT_{fit,i}|}{N} \quad (4.2)$$

ここで、 N は電荷較正に使われた試験電荷の数であり、 $ToT_{true,i}$ および $ToT_{fit,i}$ はそれぞれ電荷較正に使用された試験電荷の i 番目の ToT、電荷較正によるフィッティングから得られる i 番目の ToT である。つまり、 Δd は試験電荷から得られる ToT とフィッティングから得られる ToT の絶対差の平均値を計算している。この評価では $\Delta d > 0.5$ の場合、電荷較正に正しく生成されいない試験電荷が存在するとし、そのフィッティング結果を取り出して補正を行う。2018 年 9 月における電荷較正では、約 250 個の正しく電荷が生成されていないフィッティング結果が見つかり、その補正を行った。

電荷較正は一部のデータ点にのみ問題が含まれると予想されるため、式 (4.2) の評価方法は電荷較正に使う試験電荷の数によって大きさが変化するものである。そのため、問題のある試験電荷を取り除いた後の電荷較正結果の評価のための基準値は、0.5 とは別の値を用いる必要がある。しかし自動補正を行う際、電荷再較正を行う度に基準値を変更するのは非常に困難である。そこで、本研究で新たな評価基準を導入し、それを用いた電荷再較正の自動化アルゴリズムの開発を行った。

4.2.1 電荷較正結果の評価方法

電荷較正結果を評価するための新たな基準を以下に示す。

電荷較正データの試験電荷量と式 (3.2) のフィット結果から得られる電荷量の差が、試験電荷量の 5% 以上であれば問題のある試験電荷とみなす

上記の評価基準は、ピクセル検出器における主な測定対象である MIP 粒子の検出感度から決定した。MIP 粒子がピクセル検出器に落とす電荷量の分布を図 4.5 に示す。荷電粒子がシリコンセンサーに落とす電荷の分布は Landau 分布に従う。MIP 粒子がシリコンセンサーに落とす電荷量の測定分解能は 15% 程度である。上記の基準を満たしていれば、電荷較正により得られる電荷量の揺らぎを図 4.5 におけるランダウ分布の揺らぎより十分小さく抑制することができる。

また、この基準は各試験電荷について個別の評価を行っているため、試験電荷の数に依存せず電荷再較正の自動処理により適した評価方法である。図 4.6 に B-Layer の全 FE チップについて計算した試験電荷と電荷較正結果から得られる電荷の差の分布を示す。この分布において、試験電荷とから得られる電荷の差と試験電荷の比が 5% より大きい FE チップについて電荷較正結果の補正を行う。次項において、電荷再較正の処理方法について説明する。

4.2.2 電荷再較正の自動化アルゴリズム

上記の評価基準を用いて電荷再較正を自動で行うツールを作成した。解析処理を行うために、CERN が提供している解析フレームワークである ROOT を使用している。電荷較正のために作成された ROOT

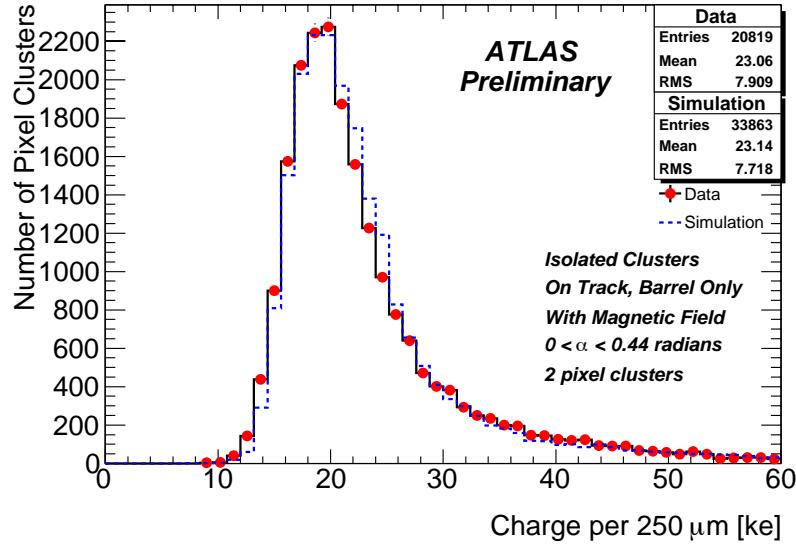


図 4.5 ピクセル検出器の 250 μm あたりのピクセル検出器に MIP 粒子が落とす電荷量。現行ピクセル検出器におけるセンサーの厚みは 250 μm のため、MIP 粒子が落とす電荷量に相当する。クラスターは normal ピクセルのみからつくられるものであり、ピクセルの短方向 ($50 \times 400 \mu\text{m}^2$ [行 × 列] の 50 μm の方向) に 2 つピクセルから構成されるクラスターのみのデータである。

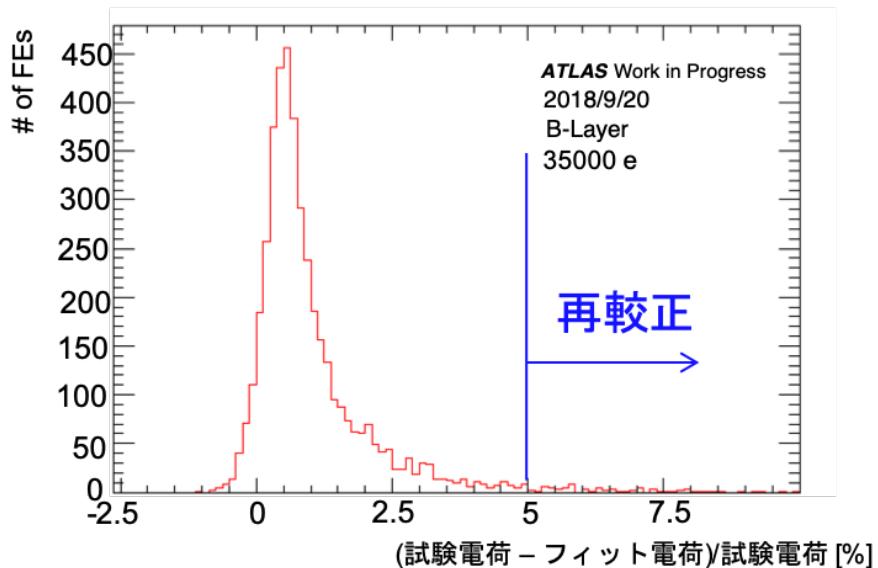


図 4.6 B-Layer の全 FE チップについて計算した試験電荷と電荷較正結果から得られる電荷の差の分布。この図は試験電荷量 35000 e とその試験電荷に相当する ToT を用いてフィット関数式 (3.2) から逆算される電荷量の差の相対比の分布を表す。

の解析ツールを改良し、電荷較正後に結果の評価および再較正を行うプログラムを追加した。作成したツールの処理の流れを図 4.7 に示す。

図 4.7 に示したループの処理で電荷較正から得られる電荷と試験電荷の差の相対比が 5% 以内に収束するまで再較正の処理を行う。これにより問題のある試験電荷を全て取り除いて電荷較正を行うことができる。電荷再較正のアルゴリズムを用いて問題のある試験電荷を取り除き再構成した結果を図 4.8 に示す。この場合、始めのループで 35000 e の試験電荷を取り除き、次のループで 30000 e が取り除かれる。それ

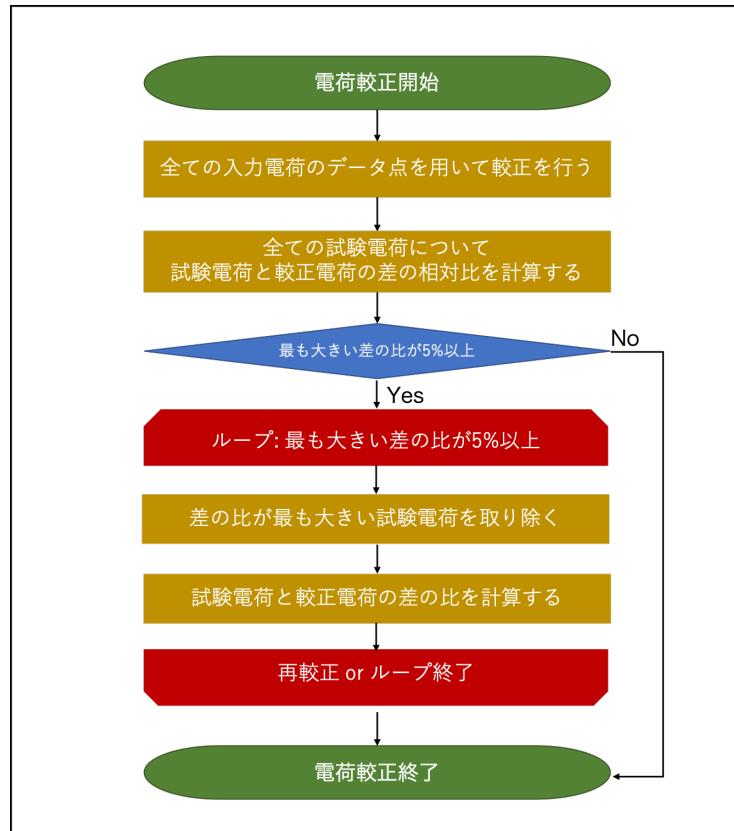


図 4.7 電荷較正結果を再較正するツールの処理の流れ。

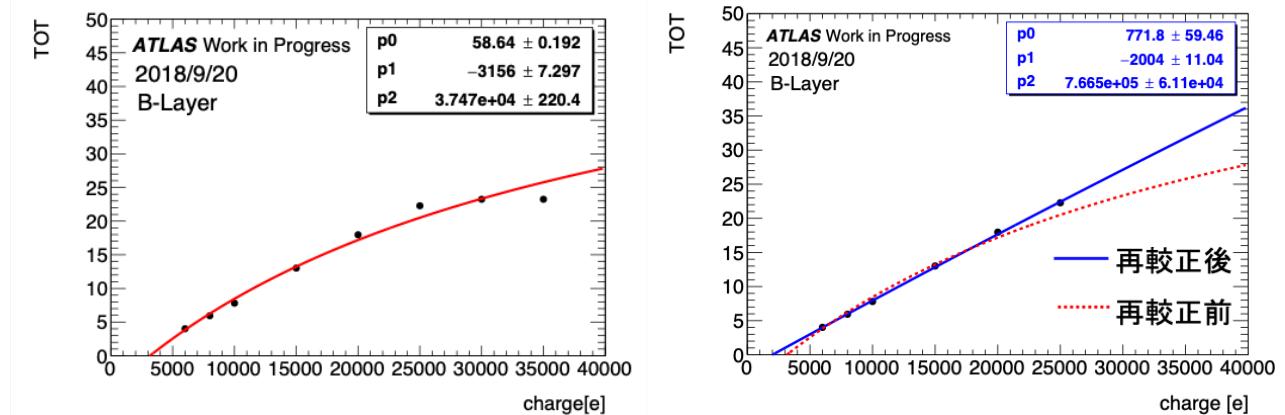


図 4.8 電荷再較正前(左図)と後(右図)のフィッティング結果。

により、電荷較正から得られる電荷と試験電荷の差の相対比が 5% 以内に収束し、正しい電荷再較正結果が得られる。

4.3 データに欠損が含まれる場合の補完

これまでビクセルモジュール内の一FEチップに欠損しているデータがある場合には、最も近いFEチップから値をコピーすることにより補完していた。しかし、現行のビクセル検出器 (IBL を除く)におけるモジュールは近いFEチップは2つまたは3つあるため、どの値を用いて補完を行うかは担当者の裁量によるものであった。結果を一意に決定するために、適切な自動処理を行う必要がある。より適切な

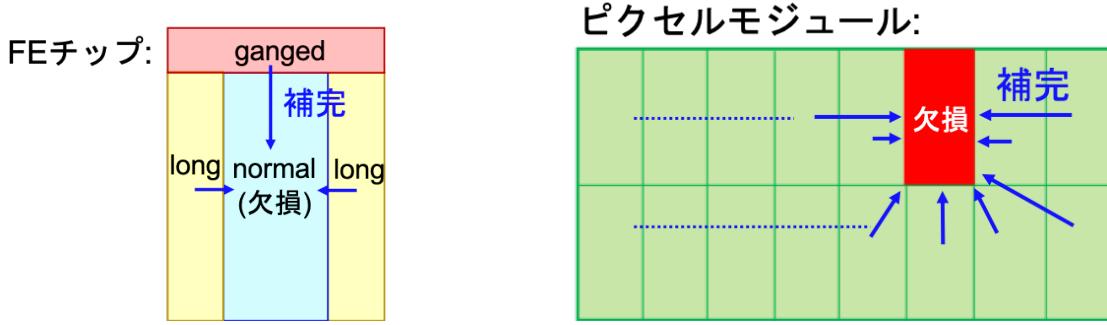


図 4.9 データ欠損の補完方法についての概念図。それぞれの図は”欠損”と書かれている部分のデータが欠けており、青矢印のように補完している。左図は 1 つの FE チップを表し、normal ピクセルの値が欠損している場合に、long および ganged ピクセルの平均値を用いて補完する様子を示す。右図は 1 つのピクセルモジュールを表し、赤色の部分における FE チップの値が欠陥している場合に、異なる FE チップの平均値を用いて補完する様子を示す。

方法を用いて自動処理を行うために、以下の二つの補完方法を導入する。

1. 同一 FE チップ上の他のピクセルタイプの平均値を用いた補完（図 4.9 の左）
2. 欠損している部分を除いた全ての FE チップの平均値を用いた補完（図 4.9 の右）

各パラメータの補完のため、2つの補完方法の内、どちらがより実際の値を再現するかの評価を行った。

4.3.1 評価方法

補完方法の評価のため、電荷較正結果に含まれるパラメータの 1 つが欠損していると仮定し、そのパラメータと補完により得られる値の差を計算し分布の作成を行った。評価を行う際、2018 年 9 月に行われた電荷較正の結果を用いた。IBL およびピクセル検出器の全ての層について評価を行ったが、全ての層について同様の結果が得られたため、以下では B-Layer の結果のみについての議論を行う。

4.3.2 評価結果と考察

前節において説明した方法を用いて、補完方法の評価を行った。図 4.10 は Normal ピクセルにおける Threshold についての評価結果を表す。この結果から、Threshold 値は補完方法 1 の同一 FE チップにおける別のピクセルタイプから得られる平均値を用いて補完した場合の方が、より精度良く補完を行うことがわかる。これは Threshold のチューニング方法によるものだと考えられる。チューニングではある FE チップにおけるピクセル全体に Global チューニングを行った後、各ピクセルごとに Local チューニングを行う。初めに Global チューニングを行うことから、別の FE チップの値を用いて補完するより、同一 FE チップの値を用いて補完する方が実際の値に近い値を用いた補完を行うことができる。

図 4.11 は Normal ピクセルにおける Threshold のノイズについての評価結果を表す。この結果から、ノイズは補完方法 2 の別の FE チップにおける同一ピクセルタイプから得られる平均値を用いて補完した場合の方が、より精度良く補完を行うことができるとわかる。Ganged ピクセルは Normal ピクセル 2 つをワイヤーで接続しているため、Normal ピクセルに比べてノイズが大きくなる。さらに、Long ピクセルは長方形の長辺の長さが Normal ピクセルの 1.5 倍あるため、Normal ピクセルと比べてピクセル間に生じるキャパシタンスが大きくなる。これにより FE チップ内の回路にノイズが加わり、Long ピク

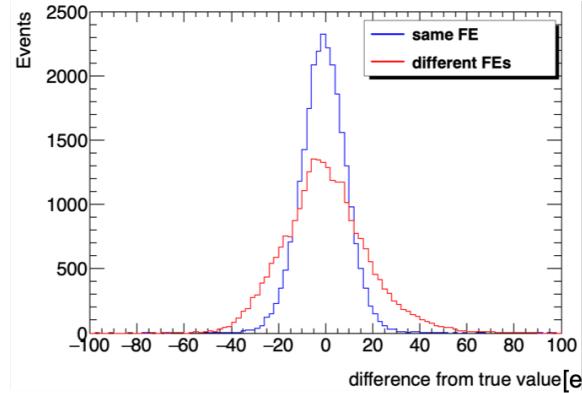


図 4.10 Threshold の評価結果。同一 FE チップにおける平均値の分布(青色)は、異なる FE チップの値の平均値の分布(赤色)よりのピークが鋭くなっている。

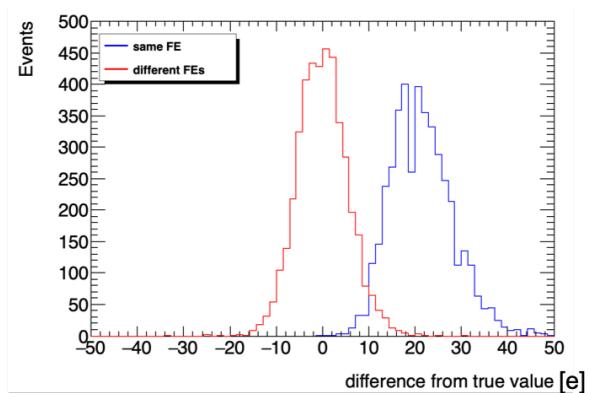


図 4.11 Threshold のノイズの評価結果。同一 FE チップの平均値の分布(青色)は、ピークの中心値がゼロからずれている。

セルのノイズは Normal ピクセルよりもノイズが大きくなる。

他のパラメータについては図 4.11 と同様に、補完方法 1 と 2 の分布のピークの中心値が異なる結果が得られたため、補完方法 2 を用いることにより実際の値に近い値を再現できると考えられる。

4.3.3 欠損補完のための解析ツール

上記の評価結果を用いて、自動で補完処理を行うツールの作成を行った。欠損補完のための処理の流れを以下に示す。

1. 補完結果のファイルを読み込む
2. 結果ファイル内の全てのモジュールについて、補完方法 1 および 2 を用いて値の補完を行う
3. スキャンが行われていないモジュールがあれば、一つ前の電荷較正結果の値をコピーし補完する
4. 補完結果をデータベースにアップロード可能なフォーマットに整形する

電荷較正結果をデータベースにアップロードするためには、電荷較正が行われていないモジュールの結果についても結果ファイル内に書き込む必要がある。そのため、処理の流れの 3 のように、電荷較正が行われていないモジュールについては 1 つ前の電荷較正結果から値をコピーすることにより補完を行う。また、データベースへアップロードするためには補完結果のファイルの中身を整形する必要があり、その処理についても補完処理を行うツールの最後に行う。

4.4 自動補完のための解析ツール

4.2 節および 4.3 節で示した補完方法を用いて自動で補完処理を行う解析ツールの開発を行った。解析ツールが行う処理の流れを以下に示す。

1. 図 4.7 の流れで電荷較正および再較正
2. CERN のデータベースにアクセスし、1 つ前の電荷較正結果の履歴を取得
3. 4.3 節に示した解析ツールを用いて欠損の補完および結果ファイルの整形
4. 補完についてのまとめファイルを出力

処理の流れの4番目に示すように、電荷再較正および欠損の補完を行った後にどのような補完を行ったかについてのまとめファイルを出力する。まとめファイルの例をCode 4.1に示す。まとめファイルのはじめに、どのように補完が行われるかを記し、その後に補完結果が確認できるようにした。

Code 4.1 解析ツールにより出力される補完結果のまとめ。

```
1 #####  
2 ## This file shows the way to recover data loss and calibration failure.  
3 ##  
4 ## How to recover parameters:  
5 ## 1. If there is a data loss in output data:  
6 ## - Case1: Partial loss in a module  
7 ## - Threshold: Recover using average of same FE  
8 ## - Others: Recover using average of different FEs  
9 ## - Case2: All values loss in a module  
10 ## - Previous scan result is used for the recovery  
11 ##  
12 ## 2. If there is a calibration failure:  
13 ## - Remove incorrect injected charge & refitting  
14 ## - Removed charges are listed in order of deletion  
15 ##  
16 ## Example of an output for a module:  
17 ## L0_B08_S1_A6_M2A:  
18 ## I2: [ normal threshold ], [ ] <--- Parameters that become '0' is listed  
19 ## I8: [ ], [ 30000 40000 ] <----- Injected charges that removed is listed  
20 ##  
21 #####  
22  
23 ~~~~~ Summary for the recovery ~~~~~~  
24 1. Number of parameters that were 0  
25 Number of FEs with all values zero: 11  
26 normal threshold: 11  
27 normal noise: 11  
28 normal sigma: 11  
29 normal intime: 27  
30 fit_normal A: 11  
31 fit_normal E: 11  
32 fit_normal C: 11  
33 quality/unused unused: 11  
34 quality/unused fit_quality: 11  
35  
36 2. Number of FEs that had bad fits  
37 B-Layer: 0  
38 Layer1: 0  
39 Layer2: 0  
40 Disk: 5  
41  
42 3. Number of modules that were not scanned
```

表 4.1 RUN3 に向けた電荷較正補完のまとめ。次節に示すように、電荷較正および再較正はデータ取得に大きく影響を与えると考えられる電荷量の領域 (> 5000 e) のみを用いて行った。

補完項目	B-Layer	Layer1	Layer2	Disk
スキャンされなかったモジュール数	14	18	40	6
欠損していた FE チップの数	18	46	38	11
部分的に 0 となっていたパラメータ数	0	6	8	3
再較正を行なった FE チップの数	179	1	9	5

```

43 B-Layer: 286
44 Layer1: 494
45 Layer2: 676
46 Disk: 6
47 ~~~~~
48
49 D1A_B01_S1_M1:
50 IO [ normal threshold ], [ ]
51 D1A_B01_S1_M2:
52 D1A_B01_S1_M3:
53 I8: [ ], [ 30000, 40000 ]

```

4.5 解析ツールの運用

Run3 における ATLAS 実験のためのモンテカルロシミュレーションのサンプル作成のために、2021 年 9 月に電荷較正のためのデータ取得が行われた。電荷較正結果をデータベースにアップロードするために、本研究で作成した解析ツールを用いて電荷較正結果を作成した。以下では、電荷較正における補完結果をまとめることとする。

4.5.1 補完のまとめ

電荷較正結果と同時に出力されるファイルを用いて、補完内容の確認を行なった。表 4.1 に補完結果のまとめを示す。この結果から、各モジュールに存在した欠損を取り除き、値の再現ができたと考えられる。表中に示すように、B-Layer における再較正を行なった FE チップの数は他の層と比較して非常に多くなった。これについて次節にて説明する。

4.5.2 Run3 に向けた電荷較正結果の再較正

2021 年 9 月に行われた電荷較正で用いた試験電荷の最小値は 3000 e であり、10000 e までは 500 e ずつ電荷量を変更させて ToT スキャンを行い、それ以降は 12000, 14000, 16000, 18000, 20000, 25000 e の試験電荷を用いて ToT スキャンを行う。全ての試験電荷を用いて電荷較正およびその再較正を行なった結果を図 4.12 に示す。左図は全ての点を用いて電荷較正を行なった結果であり、右図はその再較正結果である。再較正では 5000 e 以下の試験電荷を全て取り除くことにより再較正が完了する。

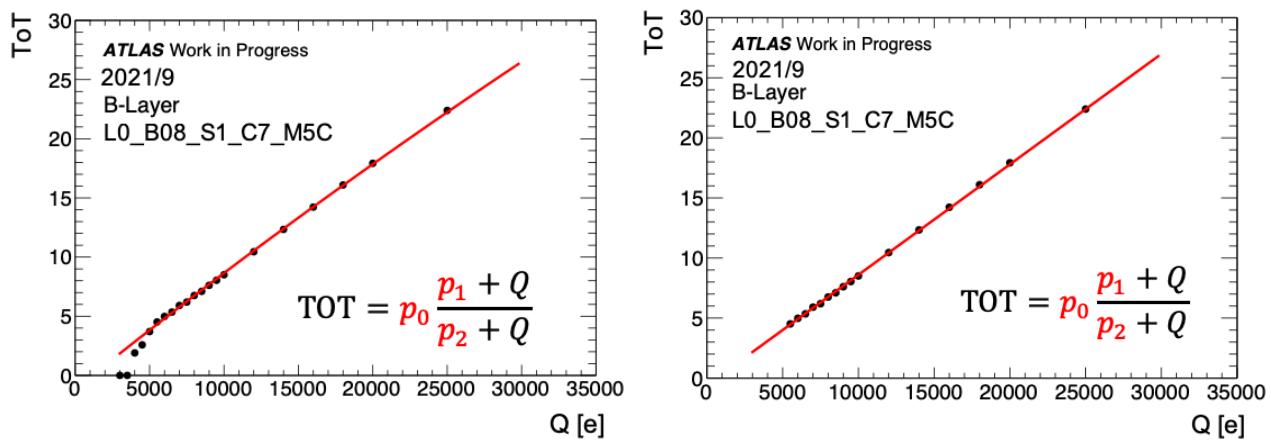


図 4.12 2021 年 9 月に行われた B-Layer についての電荷再較正結果。左図は再較正前のフィット結果であり、右図は基準を満たさない点を取り除き再較正を行った後の結果である。

表 4.2 Run3 における電荷較正での各 Layer における Threshold の値、ToT の閾値および MIP 粒子に相当する ToT の目標値。

Layer 名	Threshold	ToT の閾値	MIP 粒子に相当する ToT
B-Layer	3500 e	3 ToT	18 ToT (20 ke)
Layer1	3500 e	5 ToT	30 ToT (20 ke)
Layer2	3500 e	5 ToT	30 ToT (20 ke)
Disk	3500 e	5 ToT	30 ToT (20 ke)

この電荷較正における Threshold の値は 3500 e であり、タイムウォーク (2.2.2 節参照) が 25 ns となる電荷量は 5000 e 程度である。そのため、5000 e 以下の点はタイムウォークの影響が大きくなることから、本来予想される ToT よりも小さい ToT を出力してしまうと考えられる。電荷較正式 (3.2) は二次的な効果も含めた較正式であるが、このような効果を完全に再現できずにフィット結果がデータ点からずれてしまうと考えられる。

Run2 までの電荷較正では Threshold に近い電荷量を持つ試験電荷について 2000 e ずつ電荷量を変化させていたが、Run3 に向けた電荷較正では 500 e ずつ電荷量を変化させ、ToT スキャンを行った。その結果、Threshold 付近の ToT と電荷量の関係がよく見えるようになり、小さい電荷量を持つ点を除く電荷再較正を行うようになった。この電荷再較正は全ての FE チップにおいて行われるため、補正結果のまとめファイルでは全ての FE チップに正しくない電荷が含まれるという出力が得られた。しかし、全ての FE チップに正しくないという結果は、図 4.8 のような大きい電荷量で ToT が飽和するような問題等をまとめファイルから見つけることが困難になってしまった。そこで、特出して悪い試験電荷が含まれる電荷較正結果のみを抽出できるように 5000 e より大きい試験電荷のみを用いて電荷較正を行った。その結果のまとめが表 4.1 である。

表 4.1 に示した電荷再較正を行った FE チップについて、再較正で取り除いた点は 5500 e のみであり、図 4.8 のような大きい電荷量で ToT が飽和するような問題は確認されなかった。Run3 に向けた電荷較正では試験電荷の最大値が 25000 e であり最大電荷量が Run2 までの電荷較正より 10000 e 小さくなつたことから、図 4.8 の原因である V_{cal} の飽和が発生しなかったと考えられる。また、B-Layer における

再較正を行った FE チップの数は他の層と比較して非常に多くなった。これは B-Layer が他の層よりも MIP 粒子に相当する ToT が小さいことが原因だと考えられる。表 4.2 に示すように、B-Layer において MIP 粒子に相当する ToT は 18 であるのに対して、他の層では 30 である。そのため、B-Layer における FE チップ内のアナログ信号のパルスは他の層と比べて波高が低いものとなり、5500 e 付近においてもタイムウォークによる影響が無視できず、B-Layer における再較正を行った FE チップの数が他の層より多くなると考えられる。

4.5.3 小さい ToT に対する電荷較正

Run3 に向けた電荷較正では Threshold 付近の電荷量を持つ試験電荷をより細かく生成した。電荷較正結果の再較正では 5000 e 以下の試験電荷を全て取り除くことにより再較正が完了するため、ToT = 5 以上の点は正しく電荷較正することが可能だが、それより小さい ToT については電荷較正のフィッティング結果と試験電荷の間に差異が現れた。この差異がデータ取得時の電荷較正にもたらす影響について本節で説明する。

ピクセル検出器におけるデータ取得では、タイムウォークの影響を抑えるために Intime threshold を用いており、1 つのピクセルに対して電荷量が Intime threshold 以下となる場合にはピクセルのヒット情報は記録されない。Run3 に向けた電荷較正では、Intime threshld は約 4500 e となっており、Intime threshold 以下の電荷量に相当する ToT である $ToT \leq 3$ についてはヒット情報は記録されない。よって、小さい ToT における電荷較正の差異がデータに影響を与えるのは $ToT = 4$ のみである。

$ToT = 4$ における電荷較正を評価するために、図 4.13 に示すように B-Layer の全 FE チップについて電荷較正に用いたデータから $3.5 < ToT < 4.5$ となる点を取り出し、その電荷量と電荷較正式 (3.2) から得られる電荷量の比を計算した。その結果を図 4.14 に示す。この図に示すように、データの電荷量と電荷較正式 (3.2) から得られる電荷量の比の分布には 2 つのピークが確認できた。これは、図 4.15 のように電荷較正結果のフィッティングには 2 つの構造があることだと考えられる。左の図の場合は、電荷較正結果が $ToT = 4$ までデータ点を正しく再現できるものである。そのため、図 4.14 において、データの電荷量と電荷較正式 (3.2) から得られる電荷量の比は 1 に近い値を持つ。一方で、図 4.15 の右図は、電荷較正結果が $ToT = 4$ までデータ点を正しく再現できるものである。そのため、データの電荷量と電荷較正式 (3.2) から得られる電荷量の比は 1.2 に対応するものであり、この電荷較正結果がデータを再現するためにはフィッティング結果から得られる電荷量を 1.2 倍する必要がある。

以上のことから、B-Layer についての電荷較正では、一部の FE チップについて $ToT = 4$ の電荷較正結果を正確にデータ点を再現するためには、ToT から変換して得られる電荷量を約 1.2 倍する必要があることがわかった。しかし、以下の 2 つの理由から $ToT = 4$ から得られる小さい電荷量の補正は行わないことに決定した。

- MIP 粒子に対する影響が大きないと予想される

荷電粒子が複数のピクセルにまたがりセンサーを通過すると、荷電粒子がセンサーに落とす電荷は複数のピクセルに分割される。そのため、荷電粒子の通過情報はヒットがあるピクセルのクラスターをつくることにより記録される。MIP 粒子に相当する参考電荷量 (20000 e) に対応する ToT は 18 であるため、 $ToT = 4$ はクラスターの境界付近に現れる。 $ToT = 4$ に対する電荷量は約 20% ずれるため 1000 e 程度の違いが現れるが、この電荷量は MIP 粒子がシリコンセンサーに落とす電荷量のゆらぎ (図 4.5 参照) よりも十分小さい。そのため、 $ToT = 4$ から得られる小さい電荷の補

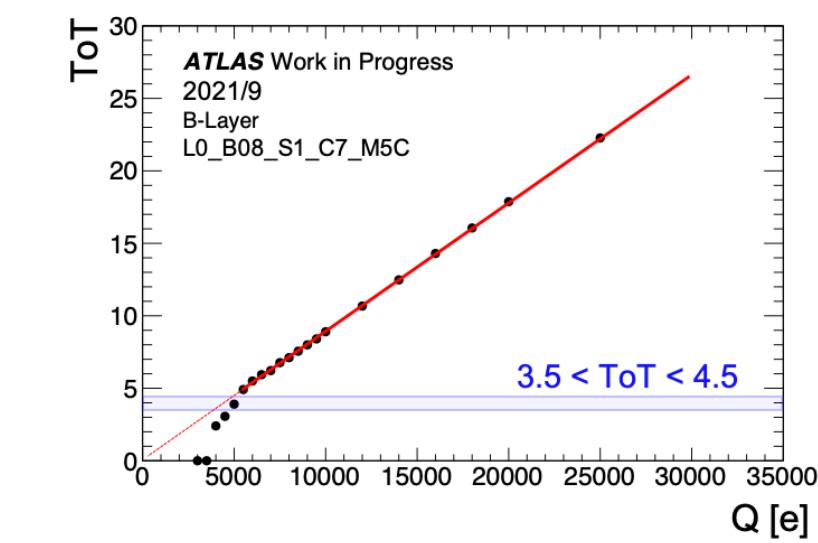


図 4.13 $ToT = 4$ における電荷較正の評価方法。黒点は試験電荷のデータ点、赤線は 5500 e^- 以上のデータ点を用いて作成したフィット結果を表す。青の領域は $3.5 < ToT < 4.5$ を表し、 $ToT = 4$ における電荷較正結果の評価のためにこの領域内の試験電荷のデータ点を取り出す。その試験電荷量とフィット結果から逆算される電荷量の比を計算することにより評価を行う。

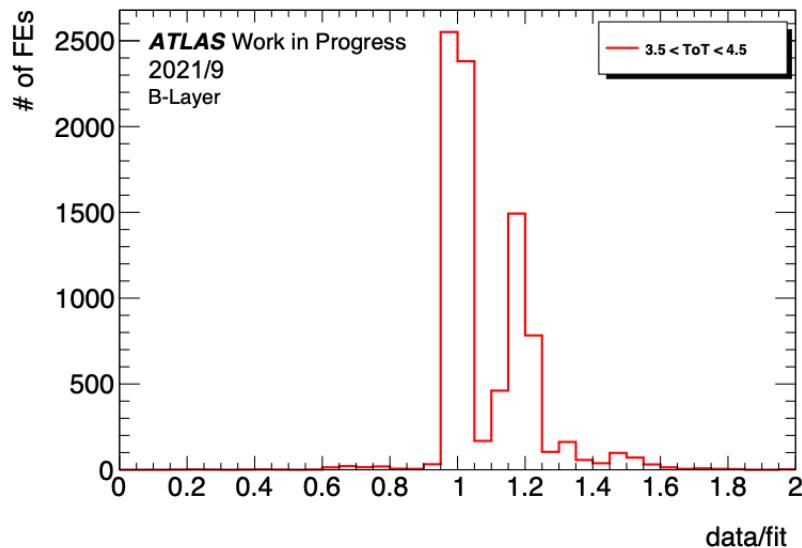


図 4.14 $ToT = 4$ における電荷較正の評価結果。横軸はデータの電荷量と電荷較正式 (3.2) から得られる電荷量の比を表し、縦軸は FE チップの数を表す。

正をしなくとも、クラスターに対する影響は小さいと予想される。

- データベースを圧迫する

全ての FE チップについて一律の倍率をかけることにより補正するのではなく、特定の FE チップにズレがあるため、その FE チップのみに対して補正を行う必要がある。しかし、データベースにアップロードするパラメータの数は既に保存できる限界の量であり、これ以上増やすことができない。そのため、各 FE チップに対して補正に必要な値を保存しておくことができず、小さい電荷を補正する値を保存しておくことができない。

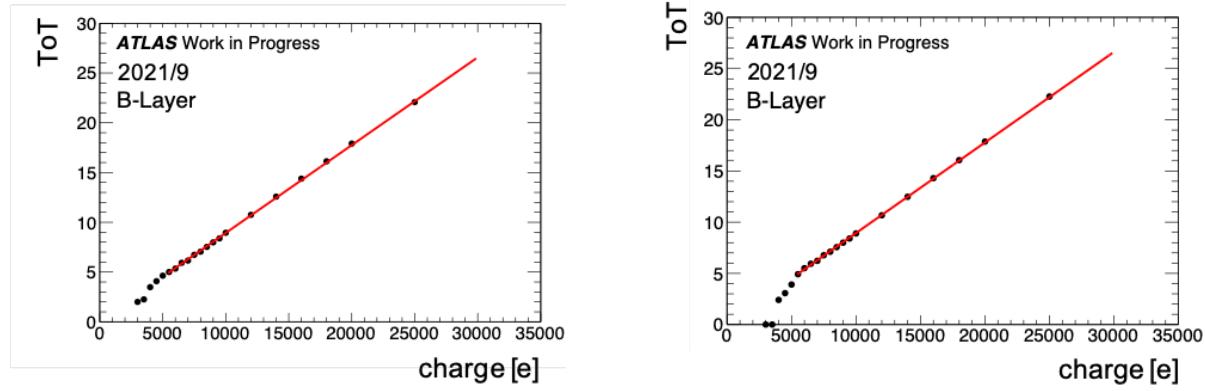


図 4.15 B-Layer の電荷較正結果における 2 つの異なる構造。左図は電荷較正結果が $ToT = 4$ までデータ点を正しく再現できるものであり、右図は $ToT = 5$ までデータ点を正しく再現できるものである。

4.6 本章のまとめ

本章では、電荷較正結果を確認し補完を行う解析ツールの概要を説明した。電荷較正の際に発生しうる問題は 2 種類ある。1 つ目の問題は、電荷較正を行う際に正しい試験電荷が生成できないことである。この問題を検知するために電荷較正結果の新たな評価方法を導入し、問題のある試験電荷を順に取り除くアルゴリズムを開発した。2 つ目の問題は、電荷較正結果に含まれるパラメータの欠損である。これまでの補完方法は最も近い FE チップから値をコピーするという方法であり、担当者により異なる値による補完を行ってしまうことがある。そのため、本研究においてパラメータの最適な補完方法の評価を行った。その結果、Threshold 値については同一 FE チップにおける異なるピクセルタイプの平均、他のパラメータについては異なる FE チップにおける同一ピクセルタイプの平均を用いることにより、より実際の値に近い値を再現できるという結果が得られた。この結果を利用し、電荷較正結果に含まれるパラメータの欠損を自動補完する解析ツールの開発を行った。

2021 年 9 月に Run3 モンテカルロシミュレーションサンプル作成のための電荷較正データの取得が ATLAS において行われた。このデータに対して本研究で開発した解析ツールを電荷構成データに使用し、電荷較正結果の作成した。この電荷較正結果を用いて、2021 年末に Run3 における検出器環境のモンテカルロシミュレーションサンプル作成が行われた。

Run3 に向けた電荷較正では Threshold 付近の電荷量を持つ試験電荷をより細かく生成した。そのため、Run2 終了時では確認できなかった小さい電荷量について、データの電荷量と電荷較正式によるフィット結果から得られる電荷量に差異が確認された。その差異がデータ取得時にどの程度影響を与えるかの評価を行った。その結果、MIP 粒子に対する影響が大きくないと予想されること、および FE チップごとに補正のためのパラメータの値が異なり、補正を行うようにパラメータを管理するとデータベースを圧迫してしまうことから、 $ToT = 4$ から得られる小さい電荷量について補正を行わないことに決定した。

第5章

次世代ピクセルモジュールの量産

RUN3 に向けた現行ピクセルモジュールの測定準備に加え、ATLAS では 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、次世代ピクセルモジュールの開発が進められている。現在、ITk に搭載するピクセルモジュール量産の各組み立て工程における試験やそのシステム確立のため、試作器を用いたデモンストレーションが行われている。

日本では次世代器量産の際に約 2000 個のモジュールを生産する予定である。次世代ピクセルモジュールの量産の際に、効率の良い量産と統合されたピクセル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となる。

本章において、ITk に搭載する次世代ピクセルモジュールの生産の流れおよび品質試験の概要を説明し、6 章および 7 章において本研究における開発項目である品質試験データ管理システムについて説明する。

5.1 次世代ピクセルモジュールの組み立て部品

ITk に搭載するピクセルモジュールは以下の 3 種類を予定している。

- ステー用 Triplet モジュール
- リング用 Triplet モジュール
- Quad モジュール

図 5.1 にそれぞれの種類のピクセルモジュールの配置を示す。Triplet モジュールはシリコンセンサー 1 つ、FE チップ 1 枚から構成される Single ベアモジュールを 3 つ搭載する。一方で、Quad モジュールはシリコンセンサー 1 つ、FE チップ 4 枚から構成される Quad ベアモジュールを 1 つ搭載する。先述のように日本では約 2000 個のモジュールを生産する予定であるが、これは全て Quad モジュールである。

ピクセルモジュールの模式図を図 5.2 に示す。量産工程は、各組み立て機関に届いたセンサーと FE チップから作られるベアモジュールとフレキシブル基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。

5.1.1 ベアモジュール

ベアモジュールはセンサーと FE チップをバンプ接合することにより作られる。Quad モジュールではセンサー 1 枚に対して FE チップ 4 枚、Triplet モジュールではセンサー 1 枚に対して FE チップ 1 枚か

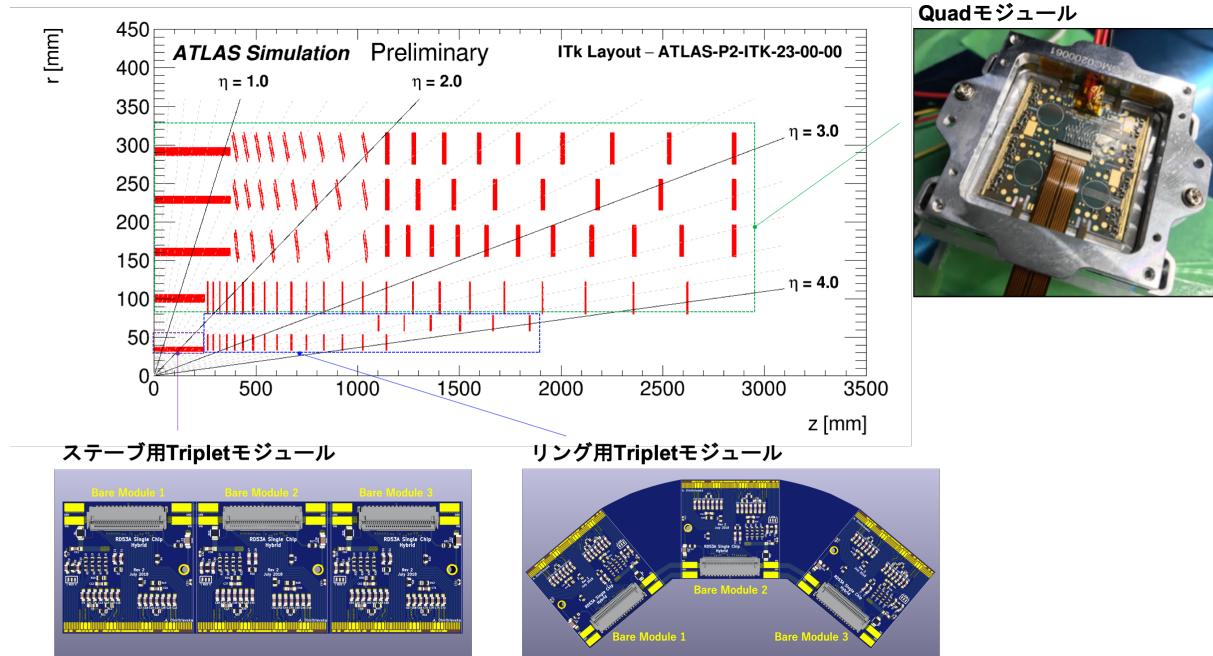


図 5.1 Triplet モジュールおよび Quad モジュールの配置 [14]。原点は ITk の中心であり、 z 軸はビーム軸方向、 r はビーム軸と垂直な半径を表す。最内層は Triplet モジュールであり、 $|z| < 261$ mm である図中の紫色の四角内にステープ用 Triplet モジュール（合計 288 個）、 $|z| > 261$ mm である図中の青色の四角内はリング用 Triplet モジュール（合計 900 個）を搭載する。最内層以外は Quad モジュール（合計 7976 個）を搭載する。

ピクセルモジュール(Quad)

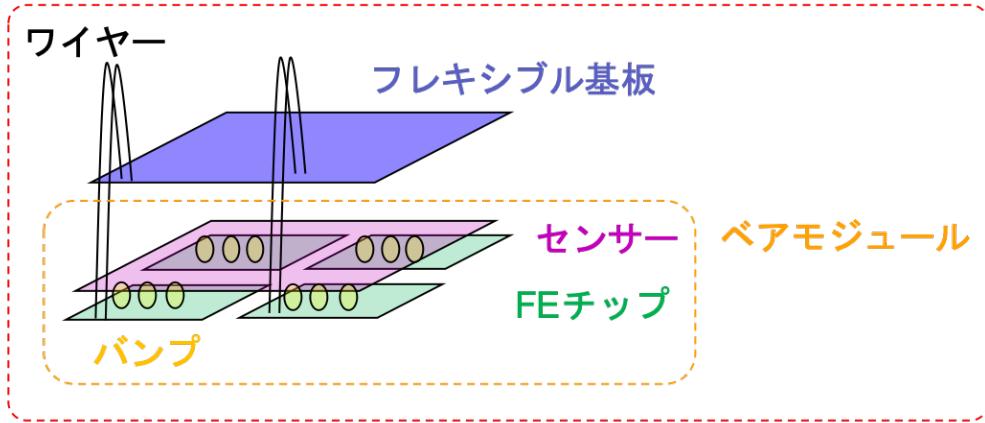


図 5.2 ピクセルモジュールの模式図。この図は Quad モジュールの構成を表したものである。ピクセルモジュールはベアモジュールとフレキシブル基板を貼り付けることで作られる。

ら構成される。ベアモジュールは通過する粒子を検出する。センサーを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 FE チップを用いて増幅・整形を行う。その後、デジタル処理を行い ToT を出力する。



図 5.3 フレキシブル基板の全体図 [11]。

5.1.2 フレキシブル基板

フレキシブル基板はセンサーの裏側に接着、およびワイヤー配線により FE チップと電気的に接続される。フレキシブル基板の全体図を図 5.3 に示す。フレキシブル基板は、以下の 3 つの役割を持つ。

- FE チップからの信号輸送

センサーから得られた信号は FE チップで増幅・整形およびデジタル処理が行われ、フレキシブル基板に送られてくる。フレキシブル基板は送られてきた信号を後段の読み出しバックエンドへ送る。

- 電源の供給

外部からの電源を、センサーと FE チップに供給する。空乏領域を増加させるため、プラナーセンサーには 100 V 程度、3D センサーには数 V の HV(High Voltage) をかける。FE チップには、電源供給のために 5.6 V 程度の LV(Low Voltage) を印加する。

- 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(図 5.1 の Quad モジュールの銀色部分)。組み立てられたモジュールは FE チップ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

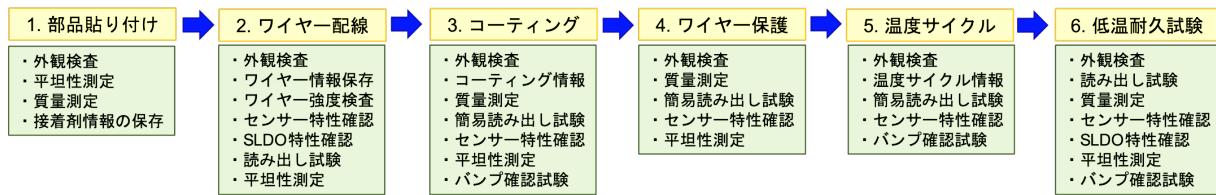


図 5.4 ピクセルモジュールの組み立て工程。

置^{*1}を用いて最低 $-55\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ までモジュールの周囲温度を下げる。その際、ピクセルモジュールに結露が発生すると損傷のリスクを伴う。そのため、キャリア内に乾燥空気を流し込むことで氷点下におけるピクセルモジュールへの結露を防いでいる。

5.2 次世代ピクセルモジュールの組み立て工程

次世代ピクセルモジュールの組み立て工程を図 5.4 に示す。組み立て工程はフレキシブル基板とベアモ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。

ベアモジュール・フレキシブル基板の接合

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ら始まる。輸送された各部品の受け取り時の品質試験を行った後、ベアモジュールとフレキシブル基板の接合を行う。専用治具を用いて行うことにより、フレックス基板の位置の交差は $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$ 、平面度は $25\text{ }\mu\text{m}$ の精度で接合を行うことができる。

ワイヤー配線

フレキシブル基板と FE チップを電気的に接合し、電源の供給や、FE チップからの信号を読み出すため、フレキシブル基板と FE チップ間をワイヤーで接続する。この組み立て工程をワイヤー配線と呼ぶ。ワイヤーは直径 $25\text{ }\mu\text{m}$ でのアルミ製であり、1 モジュールに対して約 500 本用いられる。ワイヤー配線後からは、モジュールの電気的な読み出しが行うことができるため、これ以降の全ての組み立て工程では読み出し試験を行い正常に動作するかの確認を行う。

パリレンコーティング

モジュールのセンサーと FE チップ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耐性も併せ持つ。

^{*1} KEK における次世代ピクセルモジュールの量産では、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。

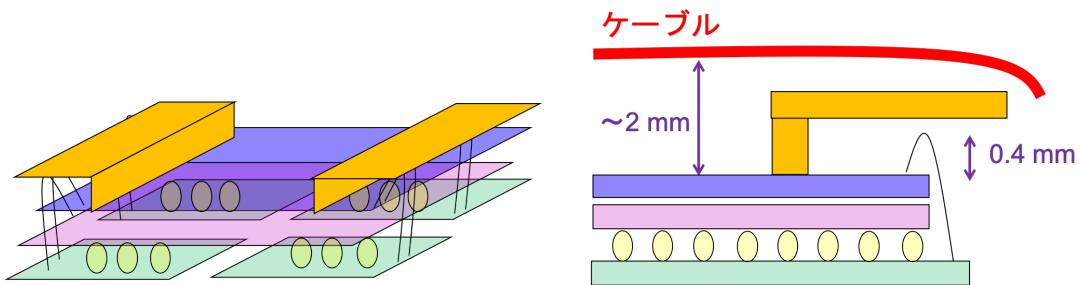


図 5.5 ワイヤー保護用の構造体。左図はワイヤー保護用の構造体を付けたモジュール全体の模式図、右図はモジュール側面から見た断面図を表す。炭素系の素材である CFRP を用いて構造体を作成する。図中において、緑色は FE チップ、黄色はバンプ、桃色はセンサー、紫色はフレキシブル基板、オレンジはワイヤー保護用の構造体を表す。

ワイヤー保護

ワイヤーは直径 25 μm と非常に細いため、力が加わると損傷してしまう可能性がある。ITk を実装する際、モジュールとケーブルの距離は 2 mm 程度のため、モジュールのワイヤーがケーブルに触れてしまい読み出しが正常にできなくなる恐れがある。このような問題を避けるため、図 5.5 に示すような構造体を用いて、ワイヤーを保護する。

温度サイクル

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を想定した温度サイクルを行い、その後もモ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、モジュールの部品間の熱膨張の違いにより熱応力が生じ、それが原因でバンプ接合部に剥がれが生じてしまうことがある。このような温度サイクルによるモジュールの損傷がないことを確認する必要がある。

ITk の運転の切り替えが年間 10 回以上あるため、10 年間の運転を想定すると 100 回以上の熱サイクルにさらされる。量産における温度サイクル試験では、動作温度範囲 $-45^{\circ}\text{C} < T < 40^{\circ}\text{C}$ の温度サイクルを 10 回、 $-55^{\circ}\text{C} < T < 60^{\circ}\text{C}$ の温度サイクルを 1 回を行う。この 10 + 1 回のサイクルでは顕著な損傷は出ないと考えられるが、バンプ接合が非常に不良なものを取り除くことができる。これらの温度サイクルの後にモジュールが正常に動作するかを確認するため、FE チップ回路読み出し試験等を行う。温度サイクルにおけるモジュールの周囲温度の変更は、恒温槽を用いて制御する予定である。

低温耐久試験

ITk 運転におけるピクセルモジュールの周囲温度は $-15^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$ 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。低温耐久試験では、図 5.6 に示すような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 FE チップの回路読み出し試験を行う。読み出し試験は 1 時間に 1 度行われる。

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、温度制御筐体の遠隔監視等の技術が必要となる。

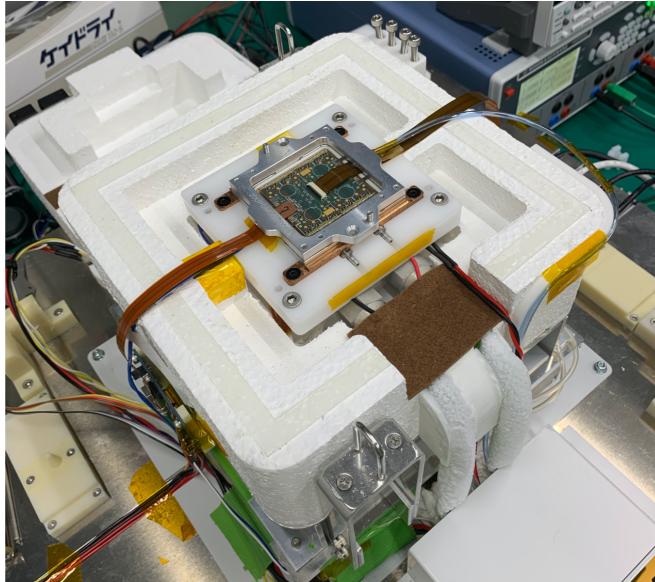


図 5.6 読み出し試験のセットアップ。この図は、温度制御筐体の蓋を開けた状態であり、測定時には蓋を閉めてモジュールの周囲を密閉し測定を行う。銀色のフレームがモジュールキャリアであり、その中にモジュールが設置されている。

5.3 品質試験

モジュールの各組み立て工程の後に、モジュールが正常に動作するかを確認するために品質試験を行う。図 5.4 に示したように、モジュールの外観検査は全ての工程で行われ、FE チップの回路読み出し試験はワイヤー配線後の全ての工程で行われる。本節では、各品質試験項目の詳細を以下に示す。

5.3.1 外観検査

モジュールの表面（フレックス基板側）をカメラを用いて撮影し、モジュールに損傷や汚れ等がないことを目視で確認する。特に、FE チップとフレックス基板を電気的に接合するためのワイヤーの接着位置が正しいか、断線がないかを確認することが重要である。目視で確認する際は、モジュール全体の高解像度画像を 36(縦横 6×6) 分割して得られる拡大画像を用いて細かく検査を行う。また、ワイヤー部分については約 500 本のワイヤーを目視で漏れなく検査することは困難且つ労力を伴うため、ワイヤーの断線や接続部分のずれを自動で検知するアルゴリズムの開発が進んでいる。

5.3.2 平坦性測定

モジュール上の 3 次元位置座標を取得することにより、歪み具合や接着剤の厚み等を計算することができる。これにより、接着時のずれや接着剤の厚み等を測定することができる。

5.3.3 質量測定

質量測定では、モジュール全体の質量を測定する。各工程における質量の差を計算することにより、接着剤の質量やワイヤーの合計質量等を取得することができる。

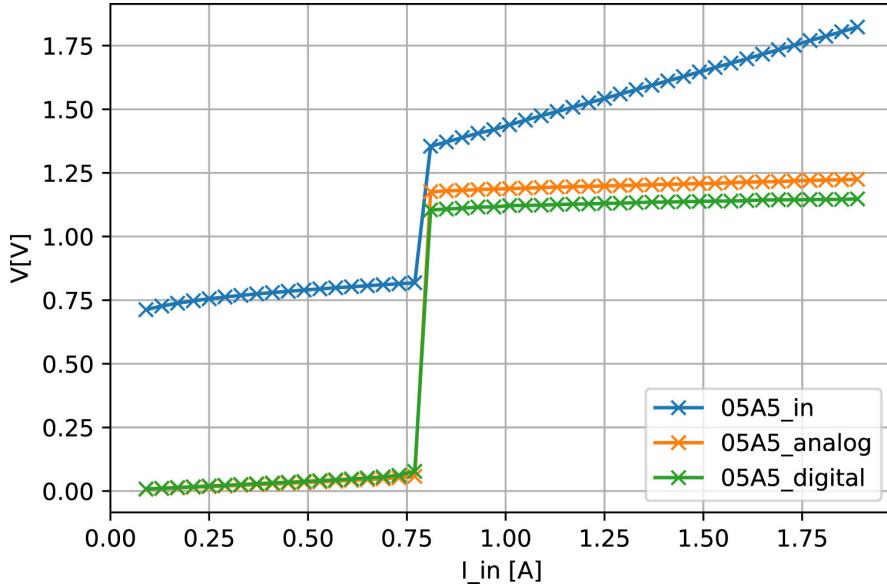


図 5.7 FE チップへの電流と、入力電圧 V_{in} 、アナログ回路の出力電圧 V_{analog} およびデジタル回路の出力電圧 $V_{digital}$ の関係 [43]。

5.3.4 ワイヤー強度検査

ワイヤー配線により接続したワイヤーの強度を調べるため、専用の機械を用いてワイヤー部分に負荷を与える。

5.3.5 センサー IV 特性

センサーの電流-電圧特性を調べることにより、モジュール製造工程におけるセンサーの損傷や HV のショートを確認することができる。プラナーセンサーでは、漏れ電流が 80 V で 2 μ A、降伏電圧が 120 V、3D センサーについては漏れ電流が 25 V で 2 μ A、降伏電圧が 35 V 程度となるのが想定される結果である。また、測定は FE チップからの消費電力による発熱を避けるため、FE チップへの LV を切った状態で行われる。

5.3.6 SLDO VI 特性

ITk 実装時には、モジュールを直列に並べて電源の供給を行う。そのため、各モジュールに対する電源は定電圧ではなく、供給電圧はつなげるモジュールの数に依存してしまう。FE チップ回路内部で一定の電圧を供給するために、SLDO(Shunt Low Drop Out) という制御回路を用いる。SLDO 制御回路が供給電流の一部を用いてデジタル回路、アナログ回路の動作電圧を生成し、余剰電流はグランドに捨てられる。FE チップには二つの SLDO 制御回路が搭載されている。1つはデジタル回路用、もう1つはアナログ回路用に用いる。図 5.7 に FE チップへの電流と、入力電圧 V_{in} 、アナログ回路の出力電圧 V_{analog} およびデジタル回路の出力電圧 $V_{digital}$ の例を示す。この結果から、SLDO 回路によりアナログ回路およびデジタル回路からの出力電圧は一定であり、制御回路が正常に動作していることがわかる。

さらに、SLDO VI 特性についての品質試験を行う際には、FE チップが低温においても正常に動作するかの試験も行う。モジュールの周囲温度を -35°C にし、デジタル回路の読み出し試験を行いモジュ

表 5.1 モジュール起動温度に対する階級値。

温度 [°C]	階級値
-35	1
$-35 < T \leq -20$	2
$-20 < T \leq -5$	3
$-5 < T \leq 10$	4
$10 < T$	5

ルが低温環境で動作することを確認する。正常に動作しない場合は 15 °C ずつ温度を上げて再び試験を行い、正常に動作を始める温度を記録する。温度を記録する際には、表 5.1 に示すように各温度に対する階級を表す数値を用いて値の入力を行う。

5.3.7 読み出し試験

モジュールに通電し、正常に読み出しができるか確認する。読み出し試験は ITk 運転時の温度環境を想定し、モジュールの周囲温度を変えつつ試験を行う。そのため、読み出し試験の際には低温耐久試験と同様に図 5.6 の温度制御筐体を用いて試験を行う。設定温度は、低温におけるモジュール起動試験では -35 °C (正常に起動できない場合は 15 °C ずつ温度を上げて試験)、Threshold 測定や ToT 測定等の通常の読み出し試験では -20 °C, 20 °C である。

読み出し試験に用いる DAQ(Data Acquisition) として、YARR(Yet Another Rapid Readout) を使用する。YARR とはピクセルモジュール用に開発された、PCI Express(PCIe) 接続を用いた読み出しシステムである。YARR を用いて行う、モジュールの読み出し試験の項目を以下に示す。

- Digital スキャン

各ピクセルについてのデジタル回路の応答を確認する。デジタル回路に試験用パルスを入射し、信号の応答数を測定する。

- Analog スキャン

各ピクセルについてのアナログ回路の応答を確認する。アナログ回路に試験電荷を入射し、信号の応答数を測定する。

- Threshold スキャン

各ピクセルの Threshold を確認する。試験電荷を用いて S カーブのフィッティング (3.2.1 節における Threshold スキャンと同様の手法) を行い、Threshold 値やノイズを測定する。

- ToT スキャン

一定の試験電荷を各ピクセルに 100 回入射させ、その試験電荷に対する ToT の値の測定を行う。

- Noise スキャン

各ピクセルのノイズを確認する。試験電荷を用いず、クロックによるトリガーで t [sec] の測定を行い、応答率を求める。Noise スキャンの応答率 NoiseOccupancy は、取得信号数 n_0 を用いて式 (5.1) で定義される。

$$\text{NoiseOccupancy} = \frac{n_0}{t \text{ [sec]}} \times 2.5 \text{ [nsec]} \quad (5.1)$$

- Source スキャン

表 5.2 ピクセル解析の評価基準一覧 [41]。表中の Occupancy は入射信号数を n_i 、取得信号数を n_0 としたとき、 $n_i/n_0 \times 100\%$ で表される値である。これらの基準一覧は不良ピクセルの評価であり、全ての基準に当てはまらないピクセルが良好と判断される。

評価名	読み出し試験項目	評価基準
Digital Dead	Digital Scan	Occupancy < 1% of injections
Digital Bad	Digital Scan	Occupancy < 98% or Occupancy > 102% of injections
Merged Bump	Analog Scan	Occupancy < 1% of injections
	Crosstalk Scan	Occupancy < 80% of 25 ke injections
Analog Dead	Analog Scan	Occupancy < 1% of injections
Analog Bad	Analog Scan	Occupancy < 98% or Occupancy > 102% of injections
Tuning Failed	Threshold Scan	S カーブのフィットが失敗
	ToT Test	ToT = 0 or 14
Noisy	Noise Scan	NoiseOccupancy < 10^{-6}
Disconnected Bump	Source Scan	Occupancy < 1% of mean Occupancy
High Crosstalk	Crosstalk Scan	Occupancy > 0 with 25 ke injection

放射線を照射し、各ピクセルの応答を確認する。これにより、シリコンセンサーと FE チップ間の接続の不具合等も確認することができる。

また、これらのスキャン項目に加え、ピクセルのチューニングも行うことがある。チューニングすることにより、各ピクセルの Threshold 値、および基準電荷量に対する ToT の値を目標値に近づけることができる。チューニングに関するスキャン項目を以下に示す。

- Global threshold チューニング
FE チップ全体のピクセルにおける Threshold を一括チューニングする。
- Pixel threshold チューニング
各ピクセル毎に Threshold の値をチューニングする。
- Global ToT チューニング
FE チップ全体のピクセルにおける ToT 値を一括チューニングする。
- Pixel ToT チューニング
各ピクセル毎に ToT 値をチューニングする。

読み出し試験の測定後、各ピクセルが正常に応答しているかを判断する必要がある。そのために決定された評価基準を表 5.2 に示す。試験結果の解析の際には、あるピクセルモジュールにおける不良ピクセルの分布および合計不良ピクセル数が記録される。

5.3.8 モジュール特性

モジュールの特性として、以下のようのものが定義されている。

- FE チップの種類

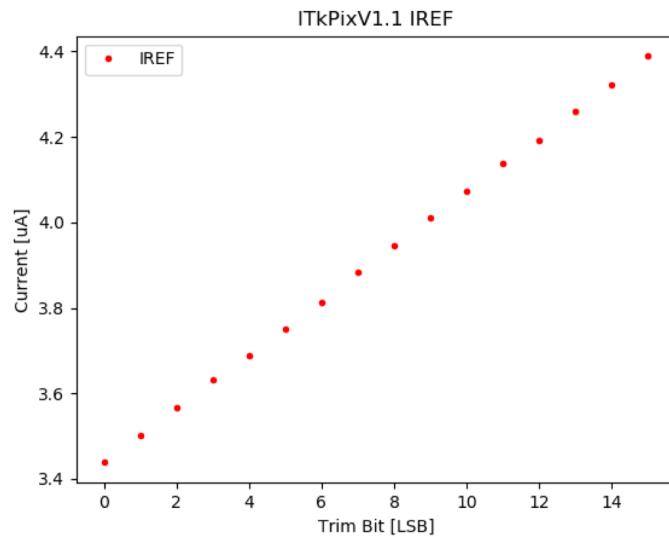


図 5.8 Iref 値と電流の関係 [44]。Iref 値は 4 bit で与えられ、その値により電流値が決まる。Iref 値により電流値を $4 \mu\text{A}$ に制御することが目標のため、この図の場合は Iref 値を 9 にするのが良い。

モジュールの部品となっている FE チップの種類を入力する。現在行っている試作器は RD53A であり、ITk に向けたモジュール量産では ITkpix_v2 を用いる予定である。

- Thickness

センサーの厚さの情報を入力する。この特性に入力する値としては”thin”と”thick”があり、それぞれセンサーの厚みが $150 \mu\text{m}$ と $300 \mu\text{m}$ である。

- Roof

モジュールのワイヤー部を保護する構造体の有無を記録する。

- IrefTrim 値

全ての DAC^{*2}(Digital Analog Converter) は”IREF”と呼ばれるグローバルなレファレンスから $4 \mu\text{A}$ の電流を生成する。Iref の値はワイヤー配線の際に 4bit の値で決定され、図 5.8 のように Iref 値を変更することにより SLDO 制御回路により出力される電流値が変化する。ワイヤー配線と Iref 値の関係を図 5.9 に示す。

- プルアップ抵抗値

プルアップ抵抗とは、電子回路の入力端子に接続される抵抗であり、スイッチがオフの状態の時に電圧が一定の値を安定して維持できるようにするためのものである。アナログ回路への電源 VDDA とプルアップ抵抗値についての関係を表 5.3 に示す。

- ベアモジュールとフレキシブル基板の向き

ベアモジュールとフレキシブル基板の向きが正しいことを保証する。

上記に示したモジュールの特性のうち、FE チップの種類等の情報はモジュールの組み立てを始めると同時に決まるものである。しかし、Iref 値やプルアップ抵抗値についての特性はワイヤー配線後に初めて確認できるものであるため、品質試験を行う際に並行して確認する必要がある。

また、ベアモジュールの見た目は、 180° 回転対称になっている。そのため、フレックス基板とベアモ

^{*2} D/A コンバーターとも呼ぶ。

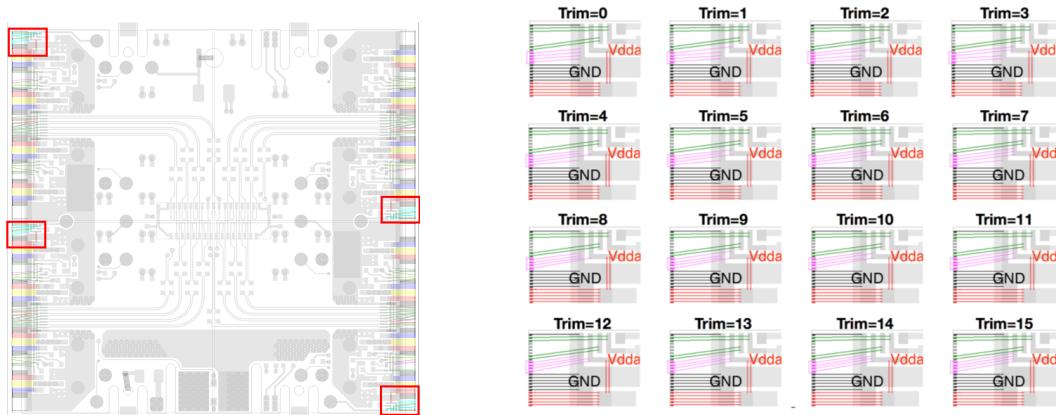


図 5.9 クアッドモジュールの IrefTrim 部分を表す部分 (左図) とワイヤーの配線と Iref 値の関係 (右図)[41]。ピンク色のワイヤーの配置により 4bit の Iref 値を表すことができる。

表 5.3 プルアップ抵抗値と電源の関係。

VDDA [V]	Pull-up Resistor が必要か	Pull-up Resistor の値 [Ω]	VDDA の増加量
$VDDA \leq 1.09$	必要	150	0.1
$1.09 < VDDA \leq 1.14$	必要	300	0.05
$1.14 > VDDA$	不要	n/a	n/a

モジュールの貼り付け工程で誤って 180° 回転した状態で接合してしまうことがある。この誤りは、ワイヤー配線後に行う読み出し試験の際に初めて確認される。そのため、ペアモジュールとフレックス基板の向きが正しいことを再確認する必要がある。

5.4 量産における試験結果管理

ITk のために世界各地の組み立て機関においてモジュールの量産およびそのための品質管理試験を行う。各組み立て機関では $\mathcal{O}(100) \sim \mathcal{O}(1000)$ のモジュールの量産を行う予定であり、最も量産数が多いのは日本の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) における約 2000 個のモジュールの量産である。各モジュールに対して、各組み立て工程および温度耐性についての合計 30 個程度の品質試験を行い結果を管理する。さらに、ワイヤー配線後に確認できるモジュール特性についてのデータも適切に管理する必要がある。

ITk の製造に関するモジュール情報や品質試験の結果は、チェコに設置されている中央のデータベースに保存する必要がある。そのため、各研究機関においてモジュール情報と品質試験結果を統一的に管理する必要がある。しかし、各モジュールにおいて合計 30 個程度の試験項目がありデータの形式が異なること、さらに各研究機関で組み立てるモジュール数が多いことから、各研究機関独自のシステムを用いてデータ管理すると以下の問題が想定される。

- データの不整合

各研究機関において独自のシステムを用いると、試験結果の管理方法が異なることから他の機関との結果の比較が困難になる。モジュールを他研究機関に送った際に、輸送中にモジュールに損傷がないことを確認するために受け取り試験 (レセプション試験) を行う。輸送前後の試験結果を比較

を行うが、その際に試験結果の形式が異なると比較前に結果を整形する必要があり、試験機関の数だけ整形しなければならないため非常に面倒である。試験結果の各パラメータや試験項目が全ての研究機関において共通となるために、統合的なシステムが必要となる。

- データの重複

試験結果やモジュール情報を共有した際、既にそのデータが存在すると使用しているPCのディレクトリ構造の違いにより別のデータと認識してしまいデータの重複が発生してしまう可能性がある。そのため、別の研究機関や異なるサーバーでデータを共有する際に、適切に管理する必要がある。

上記の問題を解決するために、各モジュール組み立て機関において適切にデータ管理を行うことを目的として、データベースシステムの開発を行っている。本研究では、これまで読み出し試験用に開発されていたデータベースシステムを改良し、次世代モジュール量産におけるデータ管理を全てをサポートできるよう諸機能の開発を行った。次章からデータベースシステムを説明する。

第6章

モジュール量産におけるデータベースシステム

前章に示したように、次世代モジュールの量産の時にデータを適切に管理するためにデータベースシステムを開発している。

本章ではデータベースシステムの全体像について説明する。

6.1 量産に用いるデータベースの概要

量産に用いるデータベースは、ITk の製造に関する情報を全てを記録するために開発されている中央データベースと、各研究機関でモジュール量産を管理するためのローカルデータベースがある。中央データベースとローカルデータベースの設置位置を図 6.1 に示す。本節ではそれについての概要を示す。



図 6.1 中央データベースとローカルデータベースの設置位置。ローカルデータベースは全てのモジュール組み立て機関に設置される。

6.1.1 中央データベース

中央データベースは ITk に実装するためのピクセルモジュール・ストリップ検出器の量産についてのデータを管理することを目的として開発されている。ユニコーン大学^{*1}が中心に開発を行っており、チェコにデータベースサーバーが設置されている。

ITk に実装される検出器とその構成部品は 50 万個程度であり、中央データベースではそれら全ての量産についてのデータを管理する。量産の組み立て工程で行われる試験結果は全てを記録するのではなく、ある品質管理試験における本結果を一つのみ保存しておく。

中央データベースに保存されたデータは、ITk に搭載するピクセルモジュールの選別に用いられる。 $|\eta|$ が小さい領域は通過する粒子の密度が高くなることが想定されるため、高い放射線量が予想される。そのため、ITk に搭載する際にはなるべく品質の良いモジュールを搭載する予定である。また、品質の悪いモジュールを配置する領域が固まると、その領域を通過する飛跡の再構成が難しくなり、物理解析の際に不良データと判別されてしまうことがある。そこで、品質の悪いモジュールの領域が固まらないように配置する必要がある。この選別に用いる参考値として、中央データベースに保存されているデータを用いる予定である。

また、運転前後で検出器に損傷が起きていないかを確認するためにも中央データベースに保存したデータを用いる。運転前後の読み出し試験やその他の試験の結果の比較を行うことにより、センサーへの放射線損傷や不良ピクセルの推移等を確認することができる。ITk は約 10 年間の運転が予定されており、少なくとも 20 年間は検出器についてのデータが利用できるようにしておく予定である。

6.1.2 ローカルデータベース

ローカルデータベースは各研究機関に設置され、モジュールの組み立て工程における品質試験結果を管理するためのシステムである。ローカルデータベースは各研究機関におけるモジュールの品質試験結果を全て記録しておくという点で中央データベースとは異なる。

先述したように、モジュールの組み立て工程およびそれぞれの工程の際に行われる品質試験の数は非常に多く、それぞれのモジュールに対して適切に試験を管理する必要がある。モジュールの量産は各研究機関において $\mathcal{O}(100) \sim \mathcal{O}(1000)$ 個であり、1 つのモジュールについて 30 項目程度の品質試験を行うため、 $\mathcal{O}(10000)$ 個の試験結果を適切に管理する必要がある。各組み立て機関において、適切にデータを管理し、かつピクセルモジュールの量産を円滑に行うことができるようサポートするためにローカルデータベースというシステムを開発している。ローカルデータベースに対する要求は以下のようなものである。

- 検出器情報や試験結果の情報を他研究機関との整合性を保ちつつ管理すること
- ピクセルモジュールの量産を円滑に行うことができるようサポートすること
- 中央のデータベースにモジュール量産に関わるデータを同期すること

以上の目標を達成するために、東工大を中心にローカルデータベースの開発が進められている。次節において、ローカルデータベースの構造と、先行研究における開発項目について示す。

^{*1} ユニコーン大学 (Unicorn University) はチェコ共和国の首都プラハにある私立大学 [45]。

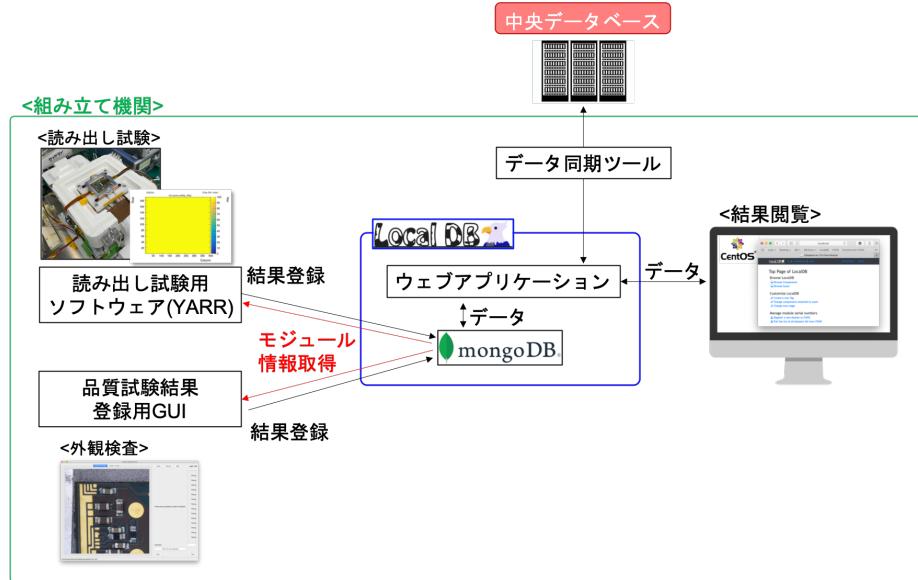


図 6.2 ローカルデータベースの全体像。ローカルデータベースは MongoDB とウェブアプリケーションから構成され、品質試験結果を管理するための複合的な機能を持つ。

6.2 ローカルデータベースの構造

ローカルデータベースの構造の全体像を図 6.2 に示す。ローカルデータベースは品質試験結果を保有しておくためのデータベースである **MongoDB**(6.2.1 節参照) と、データベースに保存されたデータを操作および閲覧するためのウェブアプリケーションから構成される。MongoDB への試験結果の登録は、読み出し試験については専用のソフトウェアである YARR を用いて行い、それ以外の品質試験については大阪大学および都立大学によって開発が進められている品質試験結果登録用 GUI を用いて行う。本節では、MongoDB とローカルデータベースのウェブアプリケーションについて説明する。

6.2.1 MongoDB[46]

MongoDB はアプリケーションの開発や拡張を簡単に行うことができるよう設計されている、オープンソースのドキュメントデータベースである。ドキュメントデータベースは、非リレーションナルデータベース (NoSQL) の一種であり、1 つのデータをドキュメントと呼び、具体的にはデータを JSON^{*2} のようなドキュメントとして保存する。MongoDB では、**BSON** という、JSON に非常によく似た形式のデータを扱い、binary 表記したデータを持つため JSON よりも多くのデータの型を保存することができる。

MongoDB では、データベース、コレクション、ドキュメント（オブジェクト）の概念を用いてデータを管理する。各ドキュメントはコレクションという枠の中に格納され、さらに各コレクションはデータベースによって包括される。各コレクション間の関係を自由に定義することができ、データベースを構造化し、階層的な性質を持たせてデータを管理することができる。

各ドキュメントは **オブジェクト ID** という 12 byte の ID によって管理される。オブジェクト ID はデータ生成時の時間情報によって決まる値 (4 byte)、データベースマシンによってランダムに生成され

^{*2} JSON とは JavaScript Object Notation の略で、データ記述言語の一種である。ある key と value を対応させることにより、データを取り出すことができる。ウェブアプリケーションでデータを転送する場合に使われることが多い。

る値 (5 byte)、データベースマシンのカウンターによって生成される値 (3 byte) により自動生成される。そのため、複数のドキュメントが同一のオブジェクト ID を持つことはなく、これにより識別を行うことができる。また、オブジェクト ID を用いることにより、異なるコレクションにおけるドキュメント間の関連付けを行い、データベース内の構造を柔軟に設計することができる。

Code 6.1 MongoDB のドキュメントの例

```

1  {
2    {
3      "_id": ObjectId("6038c960b9a87924947df638"),
4      "year": 2015,
5      "title": "The_Big_New_Movie",
6      "info": {
7        "plot": "Nothing_happens_at_all.",
8        "rating": 0
9      }
10    }
11  }

```

ローカルデータベースシステムの開発において、MongoDB を使う利点を以下に示す。

- スキーマレスで、ドキュメント構造を動的に変更することができる。

品質管理試験は、試験項目により保存するパラメータが異なる。格納形式に柔軟性のある NoSQL の MongoDB を用いることにより、同一コレクションに異なる形式の試験結果を保管しておくことができる。また、現在は試作器を用いて、次世代器の品質試験に向けた実験装置の準備や試験のレビューを行っている。そのため、最終的にデータベースに残る結果が変わることがある。この際、NoSQL の MongoDB では変更点が最小に抑えることができるので、開発スピードを早くできることが多い。

- ObjectId により、中央データベースとの整合性を保ちやすい。

中央データベースで管理するデータは 12 byte の ID を保持している。そのため、中央データベースにおける ID とローカルデータベースの MongoDB における ObjectId を関連付けて管理することが可能になる。

これらの利点から、MongoDB を用いてローカルデータベースの開発を行っている。ローカルデータベースにおけるモジュール情報および品質管理に用いるコレクションを表 6.1 に示す。ローカルデータベースにおいて、**localdb** と **localdbtool** の 2 つのデータベースを準備している。**localdb** はピクセルモジュール情報および品質管理試験結果等の各組み立て機関から中央データベースに共有する情報を保有し、**localdbtool** はユーザー情報、中央データベースからダウンロードした組み立て機関のリストやピクセルモジュールの構成要素等の中央データベースに共有しない情報や組み立て機関に依存しない情報を保有する。各コレクション間の関係を図 6.3 に示す。このように各コレクションに保存する情報を関連付けて管理することにより、品質試験結果やそれに関する情報をデータベースから取り出しやすくなる。

6.2.2 ウェブアプリケーション

各研究機関において、ローカルデータベースを使用するために、試験者がデータベースに保存されている品質試験結果を閲覧および管理を簡単にできる必要がある。しかし、MongoDB はデータ構造が柔軟で

表 6.1 ローカルデータベースのコレクション一覧。

データベース名	コレクション名	保存情報
localdb	component	モジュール情報、FE チップ情報
	childParentRelation	FE チップとモジュールの関係性
	testRun	読み出し試験結果
	componentTestRun	component と testRun の関係性
	user	読み出し試験実施者
	institute	読み出し試験実施場所
	comments	部品、試験結果についてのコメント情報
	QC.module.status	各モジュールに対する組み立て工程及び選択された試験結果
	QC.result	品質試験結果
	QC.prop.status	ワイヤー配線の後に決まるモジュール特性の書き換え情報
localdbtools	QC.module.prop	モジュール特性の情報
	QC.status	組み立て工程及び試験項目
	QC.module.types	モジュールの構成部品
	viewer.user	ローカルデータベースのユーザ情報
	viewer.query	読み出し結果キーワード、検索機能実行時に使用
	viewer.tag.docs	モジュールや試験結果に付けるタグの情報

あり、使用用途に基づき多様なデータベース構造が考えられるため、データベース内のデータを表示・処理するインターフェースは提供されておらず、必要に応じて適宜インターフェースを開発する必要がある。ローカルデータベースシステムでは、多様な利用者がデータベース内のデータを閲覧、操作を実現できることを目標として、Python のウェブアプリケーションフレームワークである Flask を導入している。

ウェブアプリケーションの処理を図 6.4 に示す。利用者が見るウェブブラウザのインターフェイスは html で表示し、ボタンを押したら Python のバックエンド側にパラメータが送信される。受信したパラメータをもとに Flask で処理を返し、html 側で表示を行う。Flask が受け取った処理を行う際、MongoDB に保存するデータを操作するために、Python のパッケージである PyMongo を用いている。また、ウェブブラウザにおいて、動的な処理を行う際には JavaScript を利用している。この流れにより、ウェブブラウザから、データベースに保存されているデータを簡単に取り扱うことができるよう設計している。

6.3 モジュールの品質試験に必要な開発項目

東工大を中心開発が進められており、これまで読み出し試験を中心に開発が進められている。モジュールの品質管理に必要な開発項目および開発状況を以下に示す。

1. データベース構造の設計

図 6.3 に示したように、MongoDB におけるコレクションを定義し、データを取り出しやすく工夫している。読み出し試験についてのデータベース構造は先行研究 [39, 40] によって定義され、その

LocalDB Structure

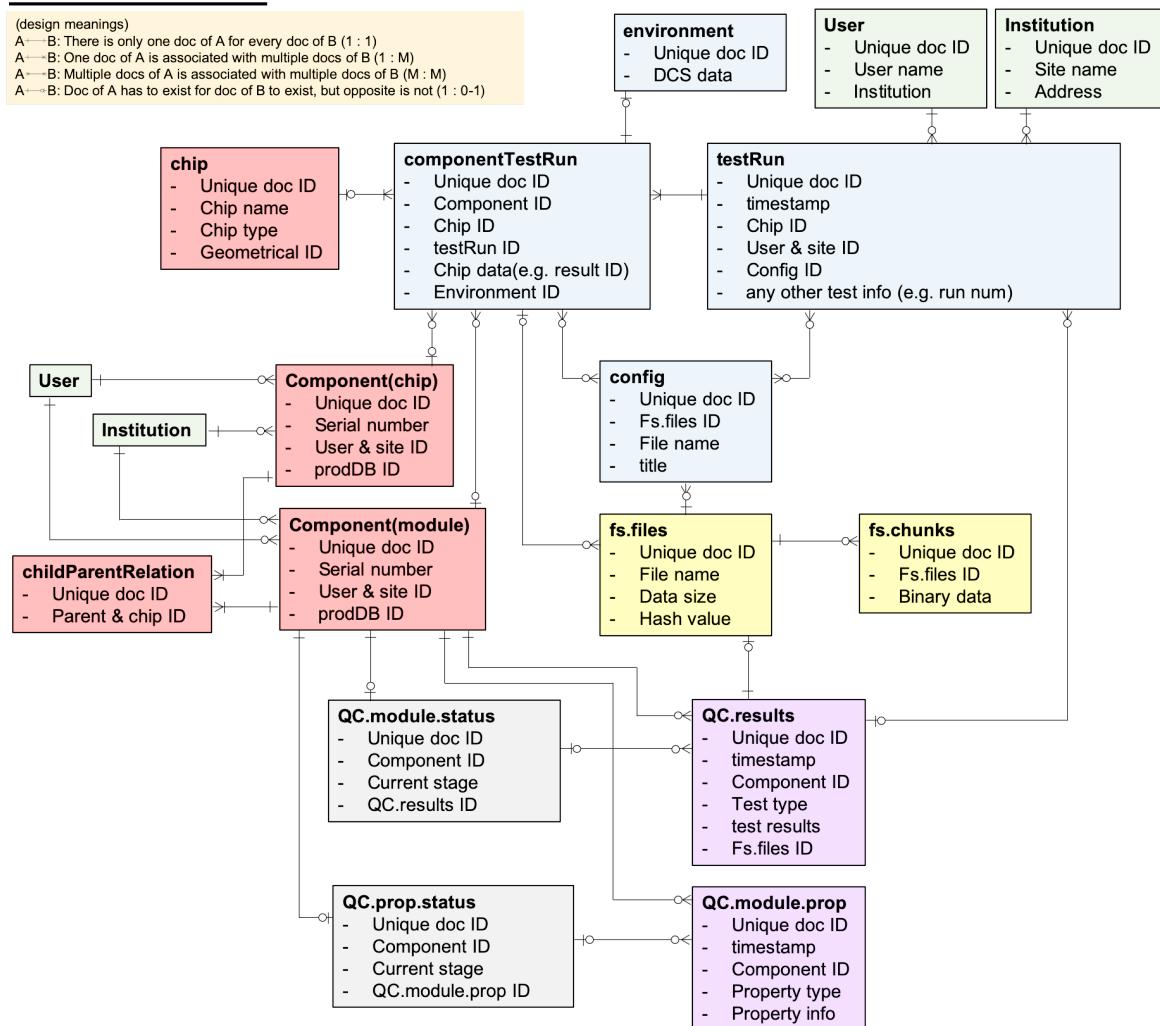


図 6.3 ローカルデータベースの構造。それぞれの四角はコレクションを表しており、緑色は使用ユーザーに関する情報、赤色は部品についての情報、青色はYARRを用いて登録した読み出し試験結果、紫は品質試験結果登録用 GUI を用いて登録した結果についてのものである。また、灰色はモジュールの組み立て工程を管理するためのコレクションであり、黄色は読み出し試験データや画像データを管理するファイルシステムに関するコレクションである。直線はオブジェクト ID によるドキュメント間の関連付けを表しており、直線が十字になっている場合は 1 つのドキュメントとの関連付け、分岐しているものは複数本のドキュメントと関連付け、丸印は関連付けされていない可能性があることを表している。

<ウェブブラウザ>

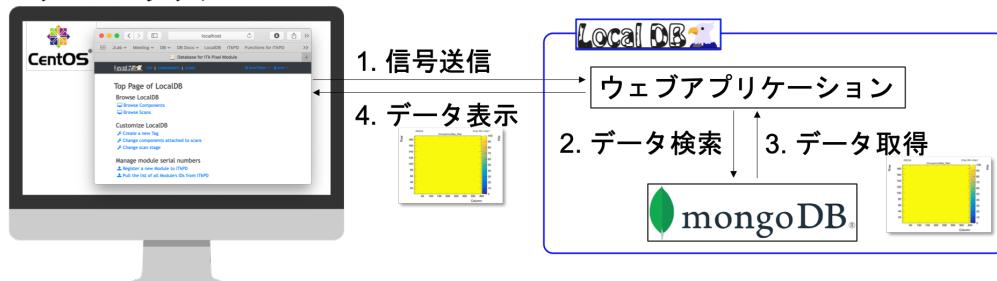


図 6.4 ウェブアプリケーションの処理の概念図。図中の数字は処理の順序を表し、ウェブブラウザから送信した信号に基づきウェブアプリケーション内で処理を行う。

他の試験項目の結果およびモジュールの組み立て工程を管理するためのデータベース構造は先行研究 [38] を行った奥山氏と私が開発を行った。

2. 試験結果管理機能

2-1. 読み出し試験

読み出し試験の結果の閲覧および解析機能は先行研究 [38, 39] によって開発が行われた。読み出し試験はピクセルの読み出し性能の不良判定するのに重要な試験であり、各組み立て工程で品質に変化がないこと、あるいは不良ピクセルが発生した際にどの工程で問題があったかを発見することが重要である。本研究では、各組み立て工程間で評価できる機能を追加した。これについて 7.1 に示す。

2-2. 読み出し試験以外の項目試験

読み出し試験以外の項目について、試験結果の閲覧機能はこれまで未開発であり本研究においてこの機能を実装した。閲覧機能について、7.1 節に示す。

3. モジュール組み立て工程管理機能

各組み立て機関で $\mathcal{O}(100) \sim \mathcal{O}(1000)$ 個のモジュールを量産するため、それぞれのモジュールについて品質試験が適切に行われたこと、各工程で全ての結果が揃っていることを担保する必要がある。この機能は先行研究 [38] によって開発が行われたが、モジュール特性の結果管理についてまだ未開発であった。これについて 7.2 節に示す。

4. 中央データベースとの同期機能

これまで、モジュールを中央データベースからダウンロードする機能、および読み出し試験の結果を中央データベースと同期する機能の開発が先行研究 [38] によって行われてきた。しかし、モジュールを中央データベースへ登録、読み出し試験以外の結果およびモジュールの組み立て工程を中央データベースと同期する機能については未開発であった。これについて、7.3.2 節に示す。

第7章

試験結果データ管理システムの開発

本研究では、これまで読み出し試験用に開発されていたシステムの他に、ピクセルモジュールの品質管理の流れの全てをサポートできるよう新たな諸機能の作成を行った。本研究において開発した項目を以下に示す。

1. 品質試験結果の表示機能 (7.1 節)
 - 品質試験結果の閲覧機能
 - ピクセルモジュール特性の閲覧機能
 - 読み出し試験結果比較機能
2. 品質試験結果の管理機能 (7.2 節)
 - ピクセルモジュール特性の選択機能
3. 中央データベースとローカルデータベースの同期機能 (7.3 節)
 - ピクセルモジュール情報の登録機能
 - 品質試験結果のアップロード機能
 - 品質試験結果のダウンロード機能

以下、これらの項目を順番に説明する。

7.1 品質試験結果の表示機能

前章で示したように、多様な利用者がデータベース内のデータを閲覧、操作を実現できることを目標としてウェブアプリケーションの開発を行った。これまで読み出し試験に特化した開発が行われていたが、その他の品質試験結果を表示する機能は未実装であった。本研究では、品質試験結果登録用 GUI の開発者と協力し、ローカルデータベース内でのデータの保管方法と結果の閲覧機能の開発を行った。さらに、先行研究で開発された読み出し試験結果の解析機能を拡張し、別の試験結果と比較する機能の開発を行った。

本節では、それぞれの機能の概要と各品質試験項目についての結果の閲覧機能について説明する。

7.1.1 試験結果閲覧機能の概要

これまで読み出し試験結果についての開発を中心に行われており、その他の品質試験結果を表示する機能は未実装であった。ピクセルモジュール次世代器量産における品質試験を管理するためには、読み出

し試験以外の試験項目についても結果を管理する機能が必要である。本研究では、試験結果登録用 GUI の開発者と協力し、ローカルデータベース内でのデータの管理方法と結果の閲覧機能の開発を行った。以下に詳細を示す。

表 6.1 に示したように、品質試験結果は MongoDB の QC.results というコレクションに保存される。MongoDB に登録される試験結果の例を以下に示す。

Code 7.1 品質試験結果を表すドキュメントの例。以下は質量測定結果の一つを表している。

```

1  {
2      "_id" : ObjectId("6131a0532e16df12955d9c6d"),
3      "component" : "60b9dc51d978dc000b9232fc",
4      "user" : "kinoshita",
5      "address" : "Tokyo\u2014Institute\u2014of\u2014Technology",
6      "currentStage" : "MODULETOPCB",
7      "testType" : "MASS",
8      "sys" : {
9          "cts" : ISODate("2021-09-03T04:10:57.338Z"),
10         "mts" : ISODate("2021-09-03T04:10:57.338Z"),
11         "rev" : 0
12     },
13     "results" : {
14         "property" : {
15             "Scale_accuracy" : 0.5,
16             "Scale_accuracy_unit" : "g"
17         },
18         "mass_value" : 1,
19         "mass_unit" : "g",
20         "comment" : "hoge"
21     },
22     "dbVersion" : 1.01
23 }
```

先述したように読み出し試験以外の試験項目の結果は試験結果登録用 GUI によって MongoDB に登録される。全ての品質試験結果では上記のドキュメントの **results** を除く値を共通要素として持ち、品質試験項目により results に格納するパラメータが異なる。

また、画像や JSON file 等のファイルデータについては results 内に直接書き込みず、別のコレクションに分割保存を行う。その後、results 内にオブジェクト ID を記録することにより試験結果とデータの関連付けを行う。この分割保存のために GridFS [46] と呼ばれるインターフェースが使用される。GridFS はサイズの大きいファイルの実体を 255 kB サイズのドキュメントに分割して保存する使用である。GridFS は、**fs.files** と **fs.chunks** というコレクションを用いてファイルデータを管理する。**fs.chunks** にファイルを分割して書き込み、**fs.files** にファイルのメタデータ（ファイル名、サイズ、**fs.chunks** における分割数等）が書き込まれる。外観検査における高画素画像やワイヤー配線のためのデータファイルは GridFS によって保存し、QC.result のドキュメントに **fs.files** ドキュメントファイルのオブジェクト ID を記録することによって、品質試験結果とデータの関連付けを行っている。

The figure consists of two side-by-side screenshots of a web-based experimental results management system.

Left Screenshot (Main Component Page):

- Header:** TOP | COMPONENTS | SCANS, Asia/Tokyo, kinoshita
- Component Information:**
 - Component: 20UPGR10099999
 - Current Stage: MODULETOPCB
 - Actions: Change Stage, Upload/Download QC-test results
- Table:** Shows component details like Serial Number (20UPGR10099999), Type (module), FE type (RD53A), and Children (20UPGFC9999995, 20UPGFC9999996, 20UPGFC9999997, 20UPGFC9999998).
- Comments:** A table for adding comments with columns: Comment, componentType, Name, Institution, Date.
- Current Stage Status:** Locally sign-off QC results for this stage. A table showing QC test results for various types:

Test Type	Result
OPTICAL	61117b73837eb41cc260ea2
GLUE_MODULE_FLEX_ATTACH	61117b73837eb41cc260ea3
MASS	612357447d856e03038a189
METROLOGY	61117b3fe74625bd6ae78b
- QC Test:** A large table listing individual QC test results with columns: Link, Test Name, Stage, Inspector, Date, QC Test.

Right Screenshot (Detailed View):

- Header:** TOP | COMPONENTS | SCANS, Asia/Tokyo, kinoshita
- Component Information:** Same as the left screen.
- Table:** Shows component details like Serial Number (20UPGR10099999), Type (module), FE type (RD53A), and Children (20UPGFC9999995, 20UPGFC9999996, 20UPGFC9999997, 20UPGFC9999998).
- Comments:** A table for adding comments with columns: Comment, componentType, Name, Institution, Date.
- Section:** » TestType:OPTICAL
- Virtual Inspection:** A table showing inspection details:

Key	Data
component_id	612f9e2ab595d5000a4fd21c
current_stage	MODULEWIREBONDING
test_type	OPTICAL
institute	Tokyo Institute of Technology
user	kinoshita
- Pictures of Visual Inspection:** Two images showing a close-up of a circuit board with anomalies. Labels include "comment only" and "hoge".
- Buttons:** View Entire Module, Re-arrange Chips.

図 7.1 ローカルデータベースのあるモジュールに関する試験結果のトップページ(左図)とそのモジュールについての試験結果のブラウザ出力(右図)。部品についてのページ下部にある表はその部品について登録された品質試験結果であり、リンクをクリックすることにより試験結果を表示することができる。右図は外観検査の結果を表す。

7.1.2 試験結果閲覧機能

本研究において開発した試験結果のウェブブラウザ出力を図 7.1 に示す。試験結果をウェブブラウザから閲覧できるように、各ピクセルモジュールのページ(図 7.1 の左)の下部に登録した品質試験結果の一覧を表示する。この一覧は、閲覧開始時は試験日時について昇順に表示しているが、必要に応じて別の項目におけるソートを可能にするため、JavaScript を利用し動的に処理できるようにした。項目名をクリックするとソートすることが可能であり、クリックする毎に昇順、降順、ソート解除(試験日時について昇順)となる。

試験結果の表示のため、ブラウザから受け取った信号をもとにデータベース内データの抽出処理を行い、試験結果を適切な形に整形しブラウザに表示する。Code 7.1 に示すように、試験日時や試験場所等を表す試験結果の基本要素を全ての試験項目について共通要素としてもち、"results" の値のみ試験項目で個別の形式を持つ。そこで、共通項目としては全試験項目について共通の表を出力、品質試験結果については適切な形に整形しブラウザに表示するようにした。図 7.1 の右図は外観検査についてのウェブブラウザ表示であり、外観検査において問題があると判定された部分の拡大写真の GridFS から抽出し、コメントと共に表示している。その他の品質試験結果の表示画面については付録 A.1 にまとめる。

7.1.3 ピクセルモジュール特性閲覧機能

ピクセルモジュールの基本特性について、Iref 値や Pull-up 抵抗値はワイヤー配線後に初めて確認できる。そのため、組み立て工程の途中で情報を更新する必要があり、ローカルデータベースへの基本特性の更新情報は試験結果登録用 GUI を用いて行われる。Code 7.2 に基本特性を管理するドキュメントを示す。基本特性に関する情報は MongoDB の **QC.module.prop** というコレクションに保存される。このコレクションは品質試験結果を表すコレクションである QC.results と同じ構造になるよう定義し、品質試験結果を表すウェブページと同様の処理を行い特性情報を閲覧することができるようになった。基本特性の表示画面については付録 A.2 にまとめる。

Code 7.2 ピクセルモジュールの基本特性更新情報を表すドキュメント。

```

1  {
2      "_id" : ObjectId("613ec032f5194763373ddad1"),
3      "component" : "6138924058c2e3000a0db59d",
4      "user" : "kinoshita",
5      "address" : "Tokyo\u2022Institute\u2022of\u2022Technology",
6      "currentStage" : "MODULEWIREBONDING",
7      "testType" : "IREFTRIM_FE",
8      "sys" : {
9          "cts" : ISODate("2021-09-13T03:06:25.499Z"),
10         "mts" : ISODate("2021-09-13T03:06:25.499Z"),
11         "rev" : 0
12     },
13     "results" : {
14         "value" : {
15             "chip1" : "1000",
16             "chip2" : "1000",
17             "chip3" : "1000",
18             "chip4" : "1000"
19         },
20         "comment" : "hoge"
21     },
22     "dbVersion" : 1.01
23 }
```

7.1.4 読み出し試験結果比較機能

読み出し試験は組み立てたピクセルモジュールの性能を評価する上で重要な品質試験であり、各ピクセルが正常に動作していることを確認する必要がある。表 5.2 に基づいたピクセル応答評価機能は先行研究 [38] によって開発された。ピクセル応答評価機能は以下の流れで処理が行われる。

1. データベースから解析するためのデータファイルを取得し、キャッシュディレクトリに保存
2. 作成したファイルを読み込み、ピクセル解析を実行し、結果値やプロットを after_analysis.root と言う名前のファイルにまとめる

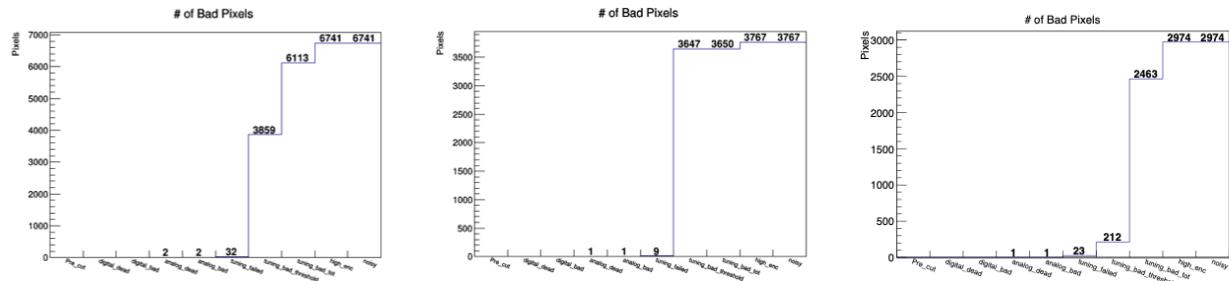


図 7.2 ピクセル応答評価機能を用いて作成したピクセル解析結果(左・中央)と2つの差分を用いた比較結果(右図)。横軸は評価基準、縦軸は該当する不良ピクセル数を表す。

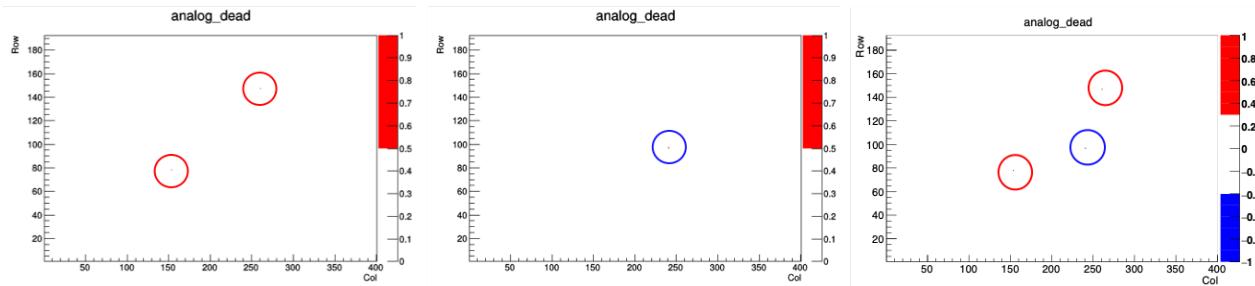


図 7.3 ピクセル解析結果における不良ピクセルの分布(左・中央)と2つの差分を用いた比較結果(右図)。各図は二次元ヒストограмであり、横軸はASICにおける各ピクセルの列番号、縦軸は行番号を示している。

3. after_analysis.root にまとめられた結果を PNG の画像に変換し出力

ピクセル応答評価機能を応用し、二つの結果を比較できる機能の開発を行った。ピクセル解析を行うために CERN が提供している解析フレームワークである ROOT を使用している。ROOT を用いて作成した after_analysis.root においてピクセルごとに解析結果がまとめられており、このファイルを利用することにより 2 つの結果を比較することができる。ピクセル解析結果を図 7.2 に示し、各評価基準における不良ピクセルの分布を図 7.3 に示す。

この機能を用いることにより、温度サイクル試験におけるモジュールへの熱応力により発生するバンプ部の剥がれが発生した際に、1 つ前の組み立て工程でバンプ剥がれが見られるかを確認することに役に立つ。バンプ剥がれが発生したピクセルモジュールについての読み出し試験結果を図 7.4 に示す。図 7.4 は X 線を用いて行った Source スキャンについての分布である。この図の二次元ヒストограмの左上の領域にヒット数が無いことから、この部分のバンプが剥がれてしまっていると予想される。このような構造が見つかった際に 1 つ前の組み立て工程における試験結果と比較し、温度サイクル試験によりバンプ剥がれが生じたかを確認することができる。

しかし、先行研究において開発されたピクセル応答評価機能は Source スキャンを含むバンプ確認試験に対応していない。そのため、ピクセル応答評価機能を改良し、バンプの接続確認のために必要な解析機能を今後ローカルデータベースに実装する必要がある。

7.2 品質試験結果の管理機能

ローカルデータベースの中でピクセルモジュールの組み立て工程の管理及び各工程に対応する品質試験の選択機能が先行研究 [38] によって開発された。本機能は各ピクセルモジュールが中央データベースで

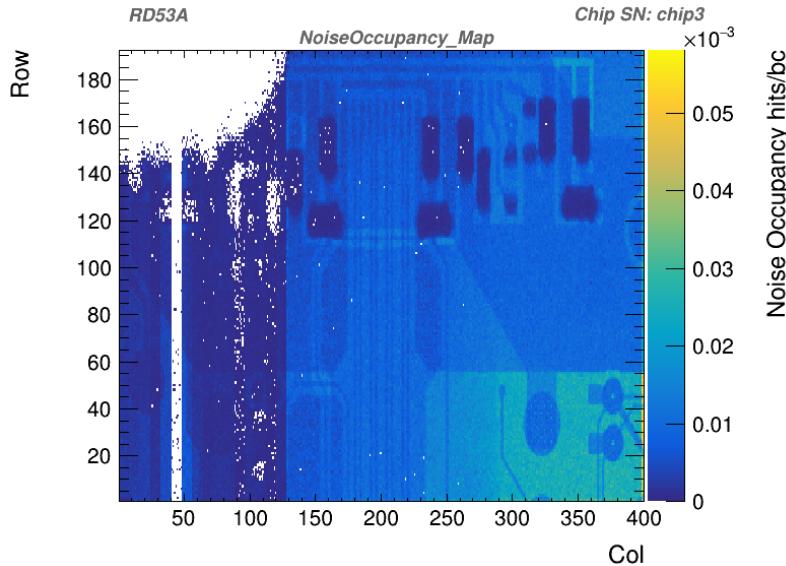


図 7.4 バンプ剥がれが発生したピクセルモジュールについての読み出し試験結果。左上の領域にヒット数が無いことから、この部分のバンプが剥がれてしまっていることがわかる。

定義された枠組みに準拠して、組み立て工程および品質試験を適切に行うことを目指し開発が進められている。さらに、測定の失敗などでローカルデータベースに保存された不要な品質試験結果を中央データベースに同期しないために、本結果を1つ選択する必要がある。このような機能も先行研究によって開発が進められてきた。先行研究において開発されたピクセルモジュールの組み立て工程に対して結果を選択する機能の流れを図 7.5 に示す。

MongoDB の **QC.module.status** というコレクションを用いて、ピクセルモジュールの組み立て工程の情報が管理される。あるピクセルモジュールの組み立て工程を管理するためのドキュメントの一部を以下に示す。

Code 7.3 ピクセルモジュールの組み立て工程を管理するためのドキュメントの一部。

```

1  {
2      "component": "5fa79114e615fa000a1a5976",
3      "currentStage" : "MODULEWIREBONDPROTECTION",
4      "QC_results" : {
5          "MODULETOPCB" : {
6              "OPTICAL" : "6111f7b73837eb41ce260ea2",
7              "GLUE_MODULE_FLEX_ATTACH" : "6111f7f63837eb41ce260ea3",
8              "MASS" : "612357447d856be03b38a189",
9              "METROLOGY" : "6111f8d36e74625bdf6ae78b"
10         },
11         "MODULEWIREBONDING" : {
12             "WIREBONDING" : "613efde160bd9bd2e7b55baf",
13             "WIREBOND" : "61440cdcbd8ead3bffe1eee9",
14             "OPTICAL" : "6112039ac94f52b6bffe6193",
15             "SENSOR_IV_30_DEGREE" : "611c8b3c6d8576d04476a345",
16             "SENSOR_IV_20_DEGREE" : "61272573ff1e5897417740be",
17             "SENSOR_IV_min15_DEGREE" : "6127248dc2768e0d8b9a1e62",
18             "SLDO_VI" : "61120852ccc38bbac041823c",

```



図 7.5 結果選択画面及び組み立て工程表示の例。図の上部で組み立て工程が “MODULETOPCB” である。図の中部において品質試験結果選択処理を行なっており、各試験項目についての本試験結果を選択している。この時、ローカルデータベース内部では選択された結果にタグ付けがなされる。これらの結果は中央データベースと同期される。また結果選択後は組み立て工程が自動的に更新される。図の下部では” MODULEWIREBONDING ” になっていることが分かる。

```

19     "PIXEL_FAILURE_TEST_30_DEGREE" : "619b4461a77fcabe31d3bbd3",
20     "PIXEL_FAILURE_TEST_20_DEGREE" : "6111fe09eef9e1d67e00943a",
21     "PIXEL_FAILURE_TEST_min15_DEGREE" : "61120415e8df6613c5393f0c"
22 },
23     "MODULEWIREBONDPROTECTION" : {
24         "POTTING" : "-1",
25         "OPTICAL" : "-1",
26         "MASS" : "-1",
27         "SENSOR_IV" : "-1",

```

```

28     "REGISTER_TEST" : "-1",
29     "READOUT_IN_BASIC_ELECTRICAL_TEST" : "-1"
30   }
31 }
32 }
```

`QC.module.status` のドキュメントはピクセルモジュールごとに作成される。ドキュメント内の”`currentStage`”にそのピクセルモジュールの現在の工程についての情報を保持し、図 7.5 で選択した結果は”`QC_results`”にそのドキュメントを表すオブジェクト ID を記録することによって、品質試験結果との関連付けを行っている。

この機能は品質試験結果のみに対応しており、ワイヤー配線後に更新を行うピクセルモジュール特性についての管理機能は未実装であった。先行研究で開発された選択機能を改良し、ピクセルモジュール特性を選択する機能の開発を行った。本研究で開発した機能を以下に示す。

7.2.1 ピクセルモジュール特性の選択機能

ワイヤー配線後に決まるピクセルモジュールの基本特性を管理するために、MongoDB 内に新たなコレクションを定義した。基本特性の本結果を管理するコレクションとして `QC.prop.status` を定義し、Code 7.4 に示すようなドキュメントを作成、保存する。”`QC_properties`”にそれぞれの特性項目とその結果を表すオブジェクト ID を記録することにより、特性結果が管理されている `QC.module.prop` のドキュメントとの関連付けを行う。

Code 7.4 ピクセルモジュールの組み立て工程を管理するためのドキュメントの一部。

```

1 {
2   "_id" : ObjectId("611a1c039c1b5786d950a17c"),
3   "proddbVersion" : 1.02,
4   "component" : "60d426d8b33600000af63e5b",
5   "currentStage" : "MODULEWIREBONDING",
6   "status" : "created",
7   "QC_properties" : {
8     "RD53A_PULL-UP_RESISTOR" : "61120d26ccc38bbac0418240",
9     "IREFTRIM_FE" : "61120c00ccc38bbac041823e",
10    "ORIENTATION" : "61120c0fccc38bbac041823f"
11  }
12}
```

図 7.5 に示した各組み立て工程に対して本結果を選択する機能に加え、組み立て工程がワイヤー配線であれば基本特性の測定結果を選択できるようにした。基本特性を選択するウェブブラウザ上の表示を図 7.6 に示す。この機能を用いて選択した基本特性結果の ID が Code 7.4 の”`QC_properties`”の各特性項目の欄に記録される機能となっている。ここで記録された結果が、ワイヤー配線工程における品質試験結果と同時に中央データベースへ同期される。

RD53A_PULL-UP_RESISTOR									
Test Data									
Module Name	Stage	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag	Select	
20UPGR10099999	MODULEWIREBONDING	RD53A_PULL-UP_RESISTOR	kinoshita	Tokyo Institute of Technology	2021/08/10 14:17:30	result page		<input type="radio"/>	
20UPGR10099999	MODULEWIREBONDING	RD53A_PULL-UP_RESISTOR	kinoshita	Tokyo Institute of Technology	2021/08/10 14:22:45	result page		<input checked="" type="radio"/>	

IREFTRIM_FE									
Test Data									
Module Name	Stage	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag	Select	
20UPGR10099999	MODULEWIREBONDING	IREFTRIM_FE	kinoshita	Tokyo Institute of Technology	2021/09/13 12:06:25	result page		<input checked="" type="radio"/>	

ORIENTATION									
Test Data									
Module Name	Stage	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag	Select	
20UPGR10099999	MODULEWIREBONDING	ORIENTATION	kinoshita	Tokyo Institute of Technology	2021/08/10 14:18:01	result page		<input checked="" type="radio"/>	

[Proceed](#)

図 7.6 ピクセルモジュールの基本特性選択画面。組み立て工程がワイヤー配線の時、図 7.5 の下にこれら表が表示される。選択された基本特性結果は本結果として記録され、同期機能により中央データベースへ同期される。

7.3 中央データベースとローカルデータベースの同期機能

中央データベースにおいてピクセルモジュールの構成部品情報や品質試験結果を管理するために、中央データベースにそれらについての構造を定義する必要がある。中央データベースにおける構造の定義、および実装の大部分は先行研究 [38] によって行われた。現在行われている試作器 (RD53A) を用いた組み立て工程の試験を通して、定義された構造の見直しが行われている。構造の再定義のために、ピクセルモジュール開発グループ内で国際的に議論を行いながら、構造の実装を行った。

ピクセルモジュールの情報や品質試験結果を中央データベースに共有するために、中央データベースとローカルデータベース間のデータ共有機能を開発する必要がある。中央データベースとの通信のために、中央データベースが開発、提供している Python パッケージを用いた。

本研究では以下の機能を実装した。

- ピクセルモジュール情報の登録機能
- 品質試験結果の同期機能

7.3.1 ピクセルモジュール情報の登録

ピクセルモジュールの品質試験結果を管理するために、ピクセルモジュール情報を中央データベース、ローカルデータベースに登録する必要がある。本研究では、ピクセルモジュール情報を中央データベースに登録およびローカルデータベースに同期する機能の開発を行った。ピクセルモジュールの構成部品であるベアモジュールおよびフレキシブル基板は、それぞれについての品質管理を行う機関で登録される。

ピクセルモジュールについても各組み立て機関において、組み立てるピクセルモジュールを登録する予定であり、登録用のシステムを開発する必要がある。本研究で開発したピクセルモジュールの登録機能の詳細を以下に示す。

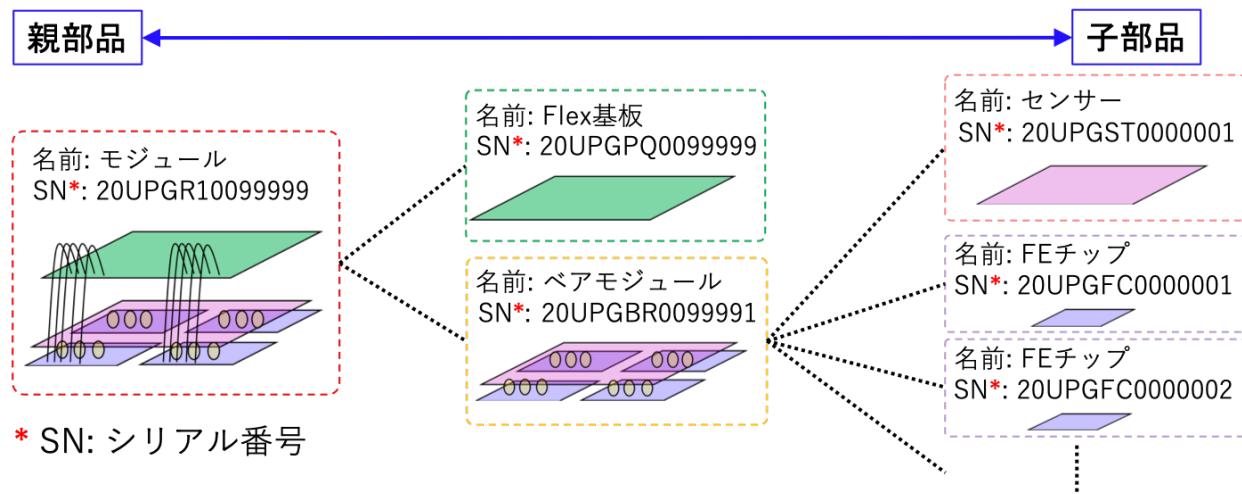


図 7.7 ピクセルモジュールの親子関係。この図では、Quad モジュールを例にピクセルモジュールの親子関係を示している。

ピクセルモジュール情報の管理方法

ピクセルモジュールの構成部品との関係を図 7.7 に示す。ピクセルモジュールと構成部品は**親子関係**を定義することにより、部品構造の定義を行う。親子関係により部品構造を定義することにより、それぞれの部品の情報を関連付けて管理することができる。ピクセルモジュールの組み立てにおいて、読み出し試験結果は各 FE チップ毎の結果が得られるため、ピクセルモジュールに対して行った試験結果を各 FE チップと関連付けて管理する必要がある。そのために親子関係を辿ることにより、ピクセルモジュールの情報から 4 枚の FE チップの情報を漏れなく得ることができる。

また、中央データベースでは FE チップが 4 枚搭載された Quad モジュールだけではなく、3 枚の FE チップが搭載されている Triplet モジュールの情報も取り扱う。Quad モジュールに搭載される BEAM モジュールは、センサー 1 枚と FE チップ 4 枚から構成されるのに対して、Triplet モジュールに搭載される BEAM モジュールはセンサー 1 枚と FE チップ 1 枚で構成される。また、読み出し試験のテスト用に開発された、センサーが搭載されていないピクセルモジュール (Digital モジュール) の情報についても中央データベースに登録する。そのため、ピクセルモジュールはいくつかの種類を持ち、それぞれに対して構成する BEAM モジュールおよびフレキシブル基板の種類が異なる。親子関係を定義する際に、あるピクセルモジュールがどの種類の子部品を持つか定義することにより、データベース上で間違った組み合わせでピクセルモジュールの組み立てをすることを防ぐことができる。あるピクセルモジュールのタイプと組み立て可能な BEAM モジュールおよびフレキシブル基板の関係を表 7.1 に示す。

ピクセルモジュールはシリアルナンバー (製造番号) を用いて管理される。ITk に搭載されるピクセルモジュールや構成部品に用いられるシリアルナンバーは「20 U xxxx nnnnnnnn」のように 14 桁で定義される。「20」は ATLAS を構成する部品であることを表し、「U」は ITk アップグレードに関連する部品であることを表す。さらに、「xxxx」において各部品の種類の識別を行うことができ、「nnnnnnnn」は各部品を特定するための 7 桁の通し番号である。さらに、ピクセルモジュールのシリアルナンバーの 7 桁の通し番号の 1 桁目は FE チップの種類を表し、2 桁目はセンサーの厚みを表す。通し番号の 1 桁目、2 桁目の数字と FE チップの種類、センサーの厚みの対応を表 7.2 に示す。また、ピクセルモジュールとフレキシブル基板は 1 対 1 の対応をすることから、最後の 5 桁はフレキシブル基板と同じになるようにシリアル

表 7.1 あるピクセルモジュールのタイプと組み立て可能なペアモジュールおよびフレキシブル基板の関係。識別 ID の項目は、各部品についての種類を識別するためにシリアルナンバーに含まれる 4 桁の英数字である。

ペアモジュール	識別 ID	フレキシブル基板	識別 ID	ピクセルモジュール	識別 ID
Single bare module	PGB1	Triplet L0 Stave PCB	PIPT	Triplet L0 Stave module	PIMS
		Triplet L0 R0 PCB	PIP0	Triplet L0 Ring0 module	PIM0
		Triplet L0 R0.5 PCB	PIP5	Triplet L0 Ring0.5 module	PIM5
Dual bare module	PGB2	Dual PCB	PGPD	Dual chip module	PGR2
Quad bare module	PGB4	Quad PCB	PGPQ	L1 quad module	PIM1
				Outer system quad module	PGM2
Digital single bare module	PGBS	Triplet L0 Stave PCB	PIPT	Digital triplet L0 stave module	PIR6
		Triplet L0 R0 PCB	PIP0	Digital triplet L0 Ring0 module	PIR7
		Triplet L0 R0.5 PCB	PIP5	Digital triplet L0 Ring0.5 module	PIR8
Digital quad bare module	PGBQ	Quad PCB	PGPQ	Digital L1 quad module	PIR9
				Digital quad module	PGRB
Dummy single bare module	PGBT	Triplet L0 Stave PCB	PIPT	Dummy triplet L0 stave module	PIR3
		Triplet L0 R0 PCB	PIP0	Dummy triplet L0 Ring0 module	PIR4
		Triplet L0 R0.5 PCB	PIP5	Dummy triplet L0 Ring0.5 module	PIR5
Dummy quad bare module	PGBR	Quad PCB	PGPQ	Dummy L1 quad module	PIR1
				Dummy quad module	PGRA

表 7.2 ピクセルモジュールのシリアルナンバーと ASIC およびセンサーの関係。

1 桁目の数字	FE チップの種類	2 桁目の数字	センサーの厚み
0	RD53A	0	Thin(150 μm)
1	ITkpix_v1	1	Thick(300 μm)
2	ITkpix_v1.1		
3	ITkpix_v2		
9	No ASIC		

ナンバーが決定される。

ピクセルモジュール情報の登録機能の開発

表 7.1 に示したように、中央データベースに定義した構造を用いて、ピクセルモジュール情報を登録する機能の開発を行った。登録の際に必要な流れは以下の通りである。

- 表 7.1 のように定義されたピクセルモジュールの構造を中央データベースから取得
- ピクセルモジュールの登録に必要な情報の入力
- 中央データベースと通信し、ピクセルモジュールを登録および構成部品を登録

i. ピクセルモジュールの構造を中央データベースから取得

ピクセルモジュールを中央データベースに登録する際、表 7.1 に示されている組み合わせに基づいて構成部品の情報を登録する必要がある。ローカルデータベースのウェブブラウザからピクセルモジュールの登録を行うために、登録するピクセルモジュールの種類に対して、適切な種類のペアモジュールおよびフレキシブル基板が使用されているかを確認する必要がある。

ローカルデータベースにおいて、適切な種類のペアモジュールとフレキシブル基板が使用されていることを確認するために、Code7.5 に示すドキュメントを QC.module.types のコレクションに作成する。Code 7.5 は中央データベースからピクセルモジュールの構造についてのデータをダウンロードし、必要な情報を抽出することにより作成される。このドキュメントは全てのピクセルモジュールについて共通のドキュメントであり、他組み立て機関においても同様の構造を持つことから、QC.module.types は localdbtools のデータベースにおいて管理する。Code 7.5 は以下の情報を保持する。ここで、以下の括弧内は Code 7.5 におけるキー値を表している。

- ドキュメント作成時のデータベースのバージョン情報 (dbVersion)
- ピクセルモジュールを ITk に実装する際の大まかな位置情報 (subprojects)
- ピクセルモジュールの種類と識別コード (types)
- ピクセルモジュールの子部品情報 (children)

Code 7.5 ピクセルモジュールの種類と各部品の親子関係を管理するためのドキュメント。

```
1  {
2      "_id" : ObjectId("5bb1e1bef981520009c54bc5"),
3      "dbVersion" : 1.01,
4      "code" : "MODULE",
5      "name" : "Module",
6      "project" : {
7          "code" : "P",
8          "name" : "Pixels"
9      },
10     "subprojects" : [
11         {
12             "code" : "PI",
13             "name" : "Inner\u2225pixels"
14         },
15         {
16             "code" : "PB",
17             "name" : "Outer\u2225pixel\u2225barrel"
18         },
19         {
20             "code" : "PE",
21             "name" : "Pixel\u2225endcaps"
22         },
23         {
24             "code" : "PG",
25             "name" : "Pixel\u2225general"
```

```

26     }
27   ],
28   "types" : [
29     {
30       "code" : "TRIPLET_LO_STAVE_MODULE",
31       "name" : "Triplet_L0_stave_module",
32       "subprojects" : [
33         {
34           "code" : "PI",
35           "name" : "Inner_pixels"
36         }
37       ],
38       "snComponentIdentifier" : "MS"
39     },
40     ...
41   ],
42   "children" : {
43     "TRIPLET_LO_STAVE_MODULE" : {
44       "BARE_MODULE" : "PGB1",
45       "PCB" : "PIPT"
46     },
47     ...
48   }
49 }
```

ii. ピクセルモジュールの登録に必要な情報の入力

ピクセルモジュールを中央データベースに登録する際に入力が必須となる情報を表 7.3 に示す。ピクセルモジュールを登録する際には、これらの情報を中央データベースに送信する必要があるが、入力項目が多いことから入力ミスが発生する可能性ある。一般的に人がルーティーンタスクにおいて入力ミスをする確率は 0.3% であることが知られている [47]。各ピクセルモジュールに必要な入力項目は 11 項目であり、日本においてはこの作業を約 2200 回（ピクセルモジュールの数）繰り返すため、最大 60 個程度のピクセルモジュールに対して誤った情報が記録されてしまうと予想される。さらに、表 7.3 に示した入力情報は、データベースの構造を熟知した人であれば項目から入力する内容を直ちに理解することができるが、品質試験を行う試験者はデータベースについて詳しいとは限らない。

そこで、ローカルデータベースにおけるピクセルモジュールの登録機能では、入力ミスを防ぐために入力パラメータを必要最低限に削減し、入力フォーマットを簡略化するように設計した。入力パラメータを削減するために、別のパラメータから情報を抽出する手法を導入した。ピクセルモジュール登録のための入力パラメータと削減したパラメータを以下に示す。

- 入力パラメータ
 - ピクセルモジュールの種類情報
 - ベアモジュールのシリアルナンバー
 - フレキシブル基板のシリアルナンバー
 - モジュールキャリアのシリアルナンバー

表 7.3 ピクセルモジュール登録に必要な入力情報。

ピクセルモジュール 基本情報	project	ピクセルモジュールの場合は”P”を入力
	subproject	ITk に搭載する際の大まかな位置情報
	institution	登録者の所属機関
	componentType	ピクセルモジュールの場合は”MODULE”を入力
	type	ピクセルモジュールの種類
	ATLAS Serial Number	14桁のシリアルナンバー
ピクセルモジュール 特性情報	FE chip version	搭載される FE チップの種類
	Thickness	搭載されるセンサーの厚み情報
組み立て部品 情報	ベアモジュール	14桁のシリアルナンバー
	フレキシブル基板	14桁のシリアルナンバー
	モジュールキャリア	14桁のシリアルナンバー

● 削減したパラメータ

- project: 本機能ではピクセルモジュールのみであるから”P”で固定
- subproject: ピクセルモジュールの種類情報から抽出
- institution: 中央データベースにアクセスする際のユーザー情報から抽出
- componentType: 本機能ではピクセルモジュールのみであるから”MODULE”で固定
- ATLAS Serial Number: ベアモジュールおよびフレキシブル基板のシリアルナンバーから自動生成
- FE chip version: ベアモジュール情報から抽出
- Thickness: ベアモジュール情報から抽出

この手法を導入することにより、ピクセルモジュールの登録の際に必要な入力パラメータを半数以下に減らすことができる。ローカルデータベースのウェブページにおけるピクセルモジュールの登録画面を図 7.8 に示す。入力ミスを防ぐために、ピクセルモジュールの種類はプルダウンから選択するようにし、各部品のシリアルナンバーを入力する欄は、14桁の英数字のみ入力できるものとした。

また、Triplet モジュールはフレキシブル基板 1枚とベアモジュール 3つから構成される。そのため、図 7.8 に示したピクセルモジュール登録画面において、Triplet モジュールである種類のモジュールが選択された場合には、ベアモジュールについての入力欄を 3つに増やすようにした。

iii. 中央データベースと通信し、ピクセルモジュールを登録および構成部品を登録

入力した情報を用いて中央データベースと通信し、ピクセルモジュールの登録およびデータベース上において構成部品の組み立てを行う。図 7.9 にピクセルモジュール登録機能による処理の流れを示す。図 7.8 において入力した情報と、中央データベースへのログインパスワードを用いてピクセルモジュールの登録を行う。登録の際に、各部品が中央データベース上に存在すること、データベース上で組み立て可能であることを確認する。これにより、本来とは異なる部品によるピクセルモジュールの登録を一部防ぐことができる。

The screenshot shows a web application titled "LocalDBX" with a navigation bar for "TOP | COMPONENTS | SCANS". The user is logged in as "kinoshita" in Asia/Tokyo. The current page is "Top Page > Register a Module to ITkPD". The main content is a form titled "Register a Module to ITkPD" with the instruction "Please enter the Information about the Module." It includes fields for "Module Type*" (dropdown menu with placeholder "*** choose Module Type ***"), "Bare Module serial number*" (text input field containing "Bare Module serial number 1"), "PCB serial number*" (text input field containing "PCB serial number"), and "Module Carrier serial number*" (text input field containing "Module Carrier serial number"). A blue "Confirm" button is at the bottom, and a link "Back to Top Page" is at the very bottom.

図 7.8 ローカルデータベースを用いたピクセルモジュール登録画面。ピクセルモジュールの種類はプルダウンから選択、各部品のシリアルナンバーを入力する欄は、14桁の英数字のみ入力可能。また、Triplet モジュールはベアモジュールを 3つ必要とするため、プルダウンから Triplet モジュールが選択された時にベアモジュールの入力欄が 3つに拡張される。

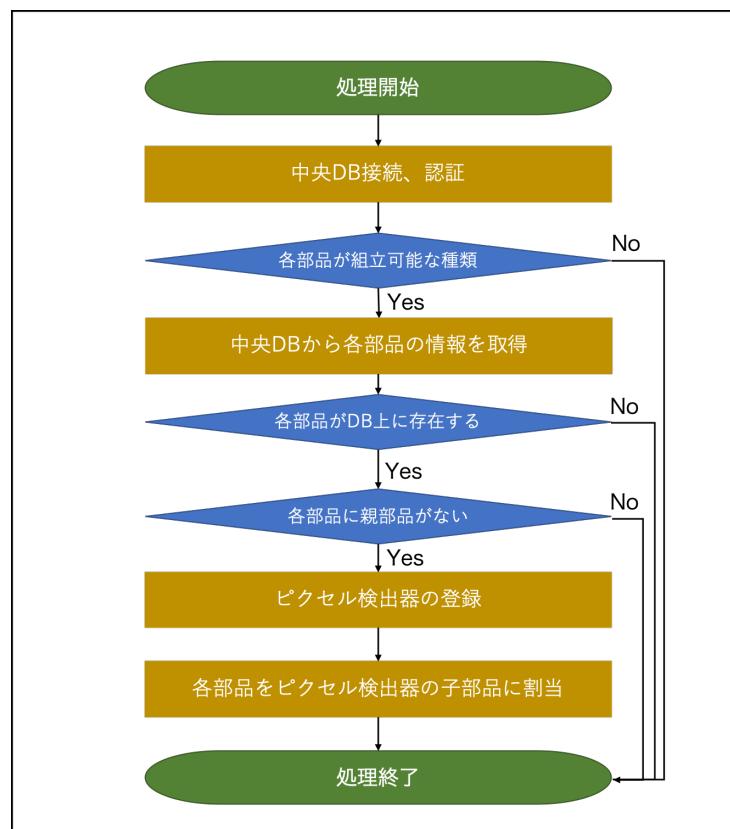


図 7.9 ピクセルモジュール登録機能による処理の流れ。

7.3.2 品質試験結果の同期機能

第6章で示したように、ピクセルモジュールを複数機関で組み立てを行う場合や、品質試験を終えてCERNに送った際に、ピクセルモジュールの受け取り先の機関において輸送中にピクセルモジュールに損傷がないことを確認するため、品質管理試験を行う。そのために、輸送前後の品質試験結果を比較することや輸送前の設定値を用いて読み出し試験を行う必要がある。

本研究において、先行研究[38]で開発された読み出し試験結果を中央データベースにアップロードする機能を拡張し、全ての品質管理試験結果およびピクセルモジュールの組み立て工程を中央データベースと同期する機能の開発を行った。

中央データベースにおける品質試験結果の管理方法

先行研究において、中央データベースにおけるピクセルモジュールの組み立て工程と付随する品質管理試験項目の実装が行われた。各品質試験項目について、アップロードする情報を以下に示す。

- ピクセルモジュールのシリアルナンバー
 - 試験日時
 - 試験機関
 - コメント
 - ローカルデータベースを再現するためのファイル
- ※ 品質試験結果
- ※ 品質試験特性(周囲温度や測定機器の設置値等)

上記において、「・」で記した情報は全ての試験項目において共通であり、「※」で記した情報は各試験項目で固有の値を持つ。ローカルデータベースはNoSQLのMongoDBを用いて品質試験結果を管理しているため、品質試験結果に含まれるパラメータを定義することなく柔軟に管理できるが、中央データベースにおいては各試験項目について、アップロードするパラメータの枠を定義し、その枠に従った形の情報のみを管理することができる。読み出し試験を以外の試験項目について、中央データベースに定義したアップロードに必要なパラメータの枠を表7.4に示す。

品質試験結果のアップロード機能

表7.4のように中央データベースに定義した品質試験のパラメータを用いて、品質試験結果をアップロードする機能の開発を行った。各品質試験結果をアップロードするための処理を以下に示す。

1. 中央データベースからアップロードするパラメータの枠を取得
2. ローカルデータベースから試験結果を抽出し、各パラメータの枠に値を埋める
3. 作成した結果を中央データベースへアップロード
4. アップロードした結果にデータファイルを添付

4番目の処理の際に、読み出し試験における試験結果のJSON fileや外観検査についての画像ファイルの添付を行う。さらに、ローカルデータベースの各品質試験結果を表すドキュメントについてもJSONファイルに変換し添付する。このJSONファイルをダウンロードすることにより、別の組み立て機関に設置したローカルデータベースにおいて試験結果の再現を行うことができるよう設計した。

表 7.4 中央データベースに定義した各試験項目のパラメータ

品質試験項目	種類	パラメータの種類	パラメータのタイプ
質量測定	結果	質量	float
	特性	測定精度	float
質量測定	結果	全体画像	image
平坦性測定	結果	平坦性測定結果	1次元の list
センサー IV 特性	結果	電流値	1次元の list
		電流の分散値	1次元の list
		電圧	1次元の list
		温度	1次元の list
		湿度	1次元の list
		時間	1次元の list
	特性	室温	float
SLDO VI 特性	結果	電流値	1次元の list
		電圧	1次元の list
		電圧の分散値	1次元の list
		温度	1次元の list
		湿度	1次元の list
		時間	1次元の list
	特性	室温	float
ワイヤボンド強度測定	結果	平均負荷値	float
		負荷の分散値	float
		最大負荷値	float
		最小負荷値	float
		ワイヤボンド部の損傷割合	float
	特性	使用した機械の名前	string
		試験者の名前	string
		テストのスピード	float
		ボンド部の高さ	float
		負荷のテスト値	float
ワイヤボンド情報	結果	温度	float
		湿度	float
	特性	使用した機械の名前	string
		試験者の名前	string
		ワイヤーボンドに用いたジグ	string
		ワイヤーボンドのプログラム	string
		ワイヤーボンドのバッチ数	string
ベアモジュールと フレキシブル基板の 接着情報	結果	室温	float
		湿度	float
	特性	接着剤の比率	float
		バッチナンバー	string
		試験者の名前	string
	接着方法		string

表 7.5 各試験項目についてアップロード機能の処理時間の測定結果。

品質試験項目	データ形式	容量	処理時間の平均
質量測定	テキスト	8 B	1.9 ± 0.7 [sec]
平坦性測定	テキスト	88 B	2.0 ± 0.5 [sec]
外観検査	画像 (png)	3.7 MB	8.8 ± 3.9 [sec]
読み出し試験	zip ファイル	10 MB	161.4 ± 10.0 [sec]

中央データベースは各組み立て機関において保存されている全ての結果を保存するのではなく、ある組み立て工程における本結果のみを中央データベースに同期する。ある組み立て工程において、本結果を選択する機能において選ばれた結果を一括アップロードする機能の開発を行った。品質試験結果のアップロード処理の流れを図 7.10 に示す。この処理の流れのループに示すように、選択機能を用いて選択された品質試験結果を中央データベースへ一括アップロードを行う。さらに、アップロード処理を行っている工程がワイヤー配線であれば、ピクセルモジュールの特性項目のアップロード処理も行う。さらに、ループ中の条件分岐において同一の試験結果が中央データベースにアップロードされていないかの確認を行う。これにより、中央データベースにおいて結果の重複を避けることができる。

ローカルデータベースにおいて、複数の組み立て工程において試験結果の選択が行われている場合は、アップロード処理を繰り返す。これを繰り返すことにより、最終的にローカルデータベースにおけるピクセルモジュールの組み立て工程の一つ前の工程までの品質試験結果のアップロード処理を行う。各ループの最後に、中央データベースの組み立て工程を一つ後の工程に変更するため、最終的にローカルデータベースと中央データベースの組み立て工程が同一のものとなり、ピクセルモジュールの組み立て工程の情報の同期を行うことができる。よって、中央データベースにおいてピクセルモジュールの量産過程が実際に行われている各組み立て機関の進捗度と同じになり、中央データベースにおけるデータを確認すれば、量産の進捗度を確認することができる。

アップロード機能の性能評価

開発した機能の実用性を検証するためにアップロード機能の性能評価を行った。実際の組み立て機関で用いるハードウェアに近い環境で行うために、自身のラップトップ環境ではなく、陣内研究室で管理しているサーバーを用いて性能評価を行った。サーバーの CPU は Intel Core i3 2.93GHz、通信速度は 47.5 MB/sec^{*1}である。

測定方法として、以下の処理 100 回繰り返し、その平均を処理時間とし分散を誤差と定義した。

1. 品質試験結果を表す ID を用いて試験結果をローカル DB から抽出
2. 品質試験結果を中央データベースへアップロード

アップロード機能の性能評価結果を表 7.5 に示す。

読み出し試験のアップロードにかかる処理時間は $\mathcal{O}(100)$ であり、読み出し試験以外の結果については処理時間が $\mathcal{O}(1)$ となった。1 つの工程に定義される読み出し試験以外の品質試験は最大 7 項目であるため 20 秒程度で処理が終わり、実用可能だと考えられる。読み出し試験については、複数の温度における測定を行うことも考慮するとアップロード処理に 5 分以上処理時間を要する。中央データベースへのアッ

*1 測定を行った 2021 年 9 月時の値

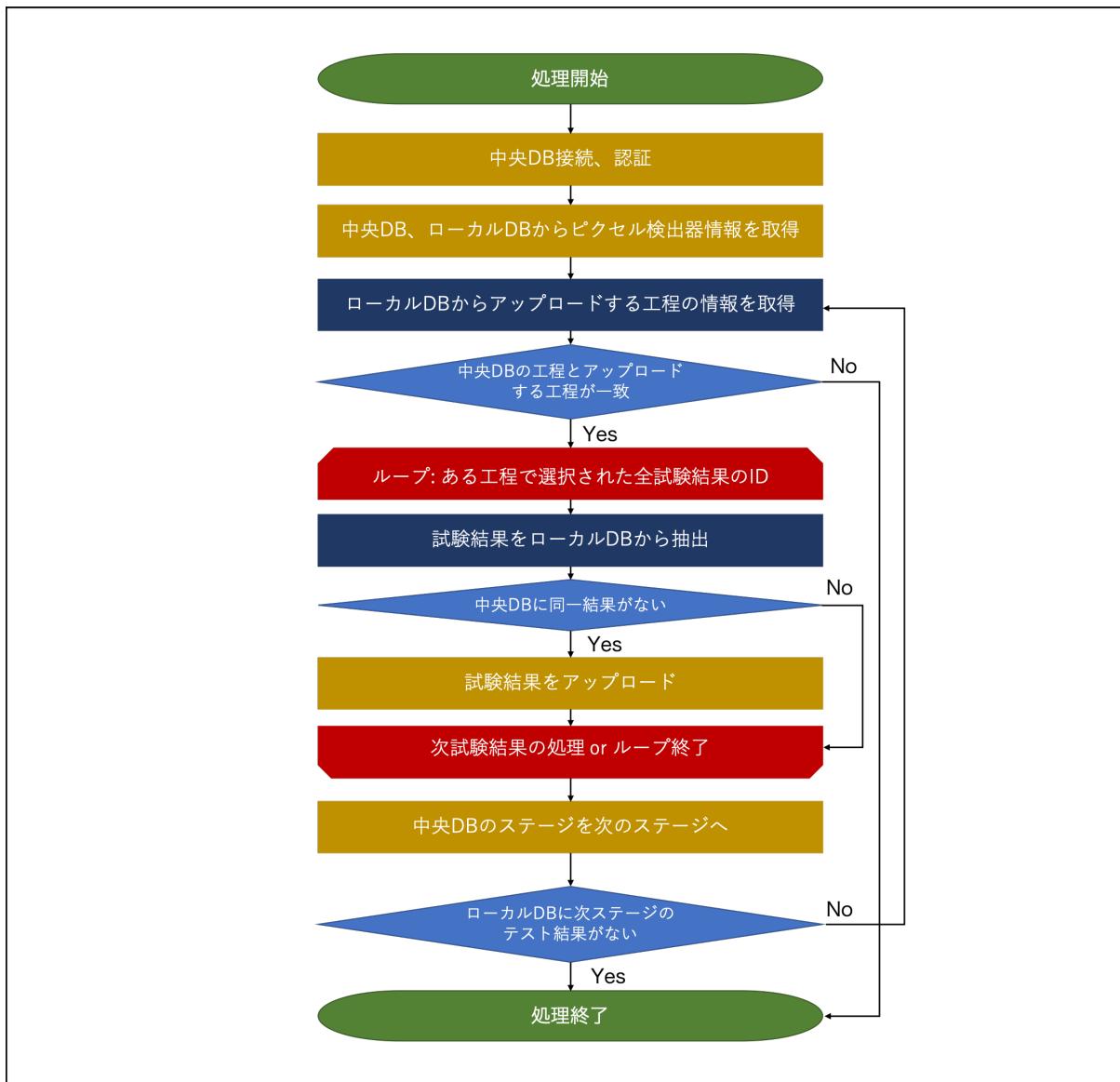


図 7.10 品質試験結果アップロード処理の流れ。

プロード処理は、ウェブブラウザのボタンを押せば図 7.10 の流れに沿って自動で処理を行うため、休憩時間の前などに行えば実用可能であると考えられるが、アップロード処理中にネットワークが不安定になるようなことが起きると途中で処理が止まり、不十分なデータが中央データベースに残ってしまう。処理時間が長くなる原因としては以下の 2 つが挙げられる。

- アップロードの処理に用いる中央データベースとの通信 API の処理時間
- ローカルデータベースから試験結果を抽出するのにかかる処理時間

初めに中央データベースとの通信 API の処理時間について考察する。各品質試験結果をアップロードする際に使用する API の一覧を表 7.6 に示す。読み出し試験以外の試験項目の場合は、generateTestTypeDtoSample、uploadTestRunResults をそれぞれ 1 回行い、createTestRunAttachment を 1 回（ローカルデータベースを再現するための JSON ファイル）+ 添付するデータファイルの数だけ行う。それぞれの処理に対して 0.5-1 秒程度必要であり、アップロードするデータの容量は通信速度 47.5 [MB/sec] と比較して小さいため、API の使用回数に処理時間が律速されると考えられる。

表 7.6 アップロード機能に使用される API 一覧。

関数名	処理の内容	処理時間の平均
generateTestTypeDtoSample	表 7.4 に定義した情報を取得	0.65 ± 0.43 [sec]
uploadTestRunResults	品質試験結果を登録	0.88 ± 0.55 [sec]
createTestRunAttachment	試験結果にデータファイルを添付	0.60 ± 0.17 [sec]

表 7.7 ダウンロードツールの処理時間。

スキャン項目	抽出するデータファイル数	処理時間の平均
デジタルスキャン	31 (96.8 MB)	11.36 ± 1.15 [sec]
アナログスキャン	31 (96.8 MB)	9.21 ± 1.11 [sec]
スレッショルドスキャン	204 (118.6 MB)	11.13 ± 0.91 [sec]
ToT スキャン	47 (112.9 MB)	10.12 ± 1.27 [sec]
ノイズスキャン	31 (102.8 MB)	9.05 ± 0.75 [sec]
クロストークスキャン	161 (272.8 MB)	28.08 ± 2.61 [sec]
合計	505 (800.7 MB)	78.95 ± 3.52 [sec]

一方で、読み出し試験はピクセルモジュールのみではなく、各 FE チップについても結果が作成される。そのため、クアッドモジュールの場合は「generateTestTypeDtoSample」、「uploadTestRunResults」をそれぞれ 5 回行い、「createTestRunAttachment」は 34 回行う。そのため、API を用いた場合の処理時間は式 (7.1) のようになる。

$$(0.65 \pm 0.43) \times 5 + (0.88 \pm 0.55) \times 5 + (0.60 \pm 0.17) \times 34 \simeq 28.05 \pm 1.81 \text{ [sec]} \quad (7.1)$$

ここで、アップロードするデータの容量は通信速度 47.5 [MB/sec] と比較して小さく無視できるものとし、表 7.6 に示したものと同程度になると仮定して計算を進めた。図 7.1 より、中央データベースとの通信にかかる処理時間は 30 秒程度であるが、表 7.5 で求められた処理時間はこれに比べて非常に長くなっている。そのため、ローカルデータベースから読み出し試験結果を抽出する際の処理時間が原因でアップロード処理に時間を要していると考えられる。

ローカルデータベースからの読み出し試験結果の抽出処理は、先行研究 [39] によって開発されたダウンロードツールを用いている。ダウンロードツールを用いて読み出し試験結果を抽出する際に要する処理時間を表 7.7 に示す。これにより、読み出し試験結果の抽出に 79 秒かかることがわかる。さらに、抽出したデータは ZIP ファイルに圧縮され、中央データベースにおける品質試験結果に添付される。圧縮処理の平均時間は 0.26 ± 0.21 [sec] であり、作成する ZIP ファイルは 34 個である。そのため、ローカルデータベースにおいて中央データベースにアップロードする読み出し試験結果の作成のために、90 秒程度の処理時間を要する。

アップロード処理時間の改善案

図 7.10 に示した流れでアップロード処理を行うと、読み出し試験を含む工程では 2 分以上かかってしまう。ブラウザの応答に時間がかかると、使用者の満足感や信頼感の低下の原因となり、ユーザーエクスペリエンスが非常に悪くなる。そこで、本研究においてはバックグラウンドでアップロード処理を行うこ

表 7.8 圧縮するファイル数を変更した際のアップロード処理時間。

圧縮方法	ZIP ファイルの容量	処理時間の平均
全ての結果	10 MB	-
ピクセルモジュール	29 KB	0.88 ± 0.8 [sec]
1 つの ASIC	2.5 MB	4.30 ± 0.94 [sec]

とし、使用者のブラウザ応答待機時間を削減させた。使用者がアップロード開始のボタン押すと、中央データベースへの接続およびユーザー認証を行い、その後のアップロード処理はバックグラウンドで行うようにした。これにより、使用者の待ち時間は接続およびユーザー認証にかかる 3.10 ± 0.38 [sec]^{*2} となり、待ち時間を迎えることができた。

バックグラウンドで処理を行うと、ネットワークの接続切れやアップロード機能のバグが原因で処理が中断されても使用者が問題に気づかないということが発生する。そのような問題を防ぐため、品質試験結果アップロードのバックグラウンド処理が中断された時にブラウザ上に問題を表示する機能の実装を行った。

このようなバックグラウンド処理により、ブラウザの応答時間は短縮できるが、実際に用いる処理時間に変化はないため、今後この改善を行う必要がある。中央データベースとの通信を伴う処理は、中央データベース API 開発者によるものであるため、本研究の対象外である。今後改善可能な処理を以下に示す。

1. 添付するデータファイルの数の削減
2. ローカルデータベースからデータを抽出する処理時間の削減

項目 1 に関して、読み出し試験における品質試験に添付するデータファイルの数は 34 個である。読み出し試験はピクセルモジュールのみではなく、各 FE チップ毎に作成され、結果添付ファイルは、読み出し試験における 6 項目のスキャンについて作成される。データファイルを添付するための関数は”createTestRunAttachment”であり、表 7.6 から、この通信の処理に合計 20.4 ± 0.99 [sec] だけ必要となる。そこで、圧縮するファイルの数を変更しデータファイルの添付を行い、その処理時間の変化を確認した。ファイルの圧縮方法として以下の 2 つについて考える。

- 全てのデータファイルを一つの ZIP ファイルにまとめる
- ピクセルモジュールおよび各 FE チップに対するデータファイルをそれぞれ一つの ZIP ファイルにまとめる

これらの処理時間の測定結果を表 7.8 に示す。

全ての結果をまとめた場合は ZIP ファイルのアップロード時にエラーが発生し添付に失敗した。これは、データファイルを添付するための関数”createTestRunAttachment”は 4 MB 以上のデータを扱えないことが原因である。よって、今回確認した中で可能な添付の処理方法は、ピクセルモジュールと各 FE チップの結果をそれぞれまとめる方法のみであり、処理時間は式 (7.2) となる。

$$(0.88 \pm 0.8) + 4 \times (4.30 \pm 0.94) = 18.8 \pm 2.04 \text{ [sec]} \quad (7.2)$$

式 (7.2) から得られる結果は圧縮方法変更前の 20.4 ± 0.99 [sec] と比較して大きな改善は期待できない。

*2 中央データベースへの接続およびユーザー認証処理を 100 回行い、その平均と分散を計算した。



図 7.11 品質試験結果ダウンロード処理の流れ。

項目2に関して、マルチスレッドを用いて、各試験項目抽出処理の並列化をすることにより抽出処理にかかる時間を削減することが考えられる。表7.7からそれぞれのスキャン項目について、ローカルデータベースから結果を取得することに10秒程度かかっていることがわかる。この抽出処理を並列化することにより、処理時間が削減でき、最も時間がかかるクロストークスキャンについての時間に律速され、処理時間を50秒程度削減できると考えられる。

品質試験結果のダウンロード機能

図7.11に品質試験結果のダウンロード機能の全体像を示す。中央データベースに添付した品質試験結果のドキュメント情報を保有するJSONファイルをダウンロードすることにより同期を行う。このJSONファイルには、品質試験結果を識別するためのオブジェクトIDが記述されている。同一オブジェクトIDの品質試験結果がQC.resultsのコレクション内に存在するかを確認することにより、品質結果の重複を避けることができる。

さらに、全ての品質試験結果のダウンロード処理の後に、中央データベースにおけるピクセルモジュールの組み立て工程をローカルデータベースへ同期する。これにより、ピクセルモジュールを輸送した後、受け取り機関において正しい組み立て工程における品質管理を行い、試験結果の比較を行うことができる。

7.4 本章のまとめ

本章では、本研究における開発項目である品質試験結果の閲覧機能、品質試験結果の管理機能、および中央データベースとローカルデータベースの同期機能についての開発の詳細について述べた。これらの機能をローカルデータベースに実装することにより、ピクセルモジュールの次世代器量産における品質試験結果管理に必要な機能の基本的な部分が全て揃った。

品質試験結果の表示機能について、読み出し試験以外の試験項目についての結果表示機能の開発を行った。読み出し試験結果以外の項目については、品質試験結果登録用 GUI を用いてローカルデータベースに登録するため、その開発者と協力し MongoDB のドキュメントの構造の構築、およびウェブブラウザを用いた結果の表示機能の開発を行った。これにより、ピクセルモジュール量産時に行われる全ての試験項目についての結果を、ウェブブラウザを用いて閲覧可能になった。また、先行研究で開発された読み出し試験におけるピクセル応答評価機能を拡張し、別の読み出し試験結果と比較する機能の開発を行った。これにより各組み立て工程間における読み出し試験結果の比較を行い、不良ピクセルの変化が確認できる。ピクセル応答評価機能は、デジタル回路やアナログ回路の読み出し試験等の FE チップについてのピクセル評価が行うことができるが、バンプ接続についての評価機能が未実装である。そのため、バンプ接続についての評価機能を実装する必要がある。

品質試験結果の管理機能について、先行研究でピクセルモジュールの組み立て工程の管理及び各工程に対応する品質試験を選択する機能が開発された。これらの機能を拡張し、ワイヤー接続工程の後に確認されるピクセルモジュール特性の更新機能の開発を行った。この機能において選択する品質試験結果およびモジュール特性は、各組み立て工程における本試験結果であり、中央データベースとの同期機能を用いて同期が行われる。

中央データベースとローカルデータベースの同期機能について、ピクセルモジュールの情報や品質試験結果を中央データベースに共有する機能の開発を行った。この機能を開発するために、中央データベースにおいてピクセルモジュールの構成部品構造や品質試験構造を定義する必要があり、ピクセルモジュール開発グループ内で国際的に議論を行いながら、構造の実装を行った。定義した構造を用いて、ピクセルモジュール情報の登録機能や、品質試験結果のアップロード機能およびダウンロード機能の開発を行った。

品質試験結果のアップロード機能についての性能評価を行った。表 7.5 のように読み出し試験結果以外の項目については数秒でアップロード処理を終えるが、読み出し試験は 160 秒程の処理時間が必要であり、この処理の間にネットワークが不安定になるとバグの原因になりうるため改良が必要である。本研究では処理時間の改善案をいくつか考案し、それぞれについての見積もりを行った。その結果、ローカルデータベースからの読み出し試験結果の抽出処理を並列化することにより、処理時間が最大で 50 秒程度削減できるという結論が得られた。

第8章

まとめ

8.1 結論

CERN にある世界最高エネルギーでの陽子衝突加速器 LHC 上の測定点の 1 つである ATLAS 実験では、標準模型の精密測定や標準模型を超える物理現象の探索が行われている。LHC は 2022 年の 3 月に長期運転停止期間を終えて Run3 として稼働を再開する。ATLAS ピクセル検出器はこれまで 2 週間から 1 か月に 1 度の電荷較正を行っていた。電荷較正を行った後にそれぞれのパラメータが適切な値を保持していることを確認および欠損が含まれるデータの補完作業を行った後に、データベースにパラメータの登録を行う。データの確認および補完作業はこれまで担当者による手作業で行われていた。しかし、Run1 から稼働しているピクセル検出器はこれまでよりも放射線損傷による影響がより大きくなることから、より頻繁に電荷較正およびその補完作業を行う必要があり、手作業による確認および補完作業は非常に労力が伴う。さらに、手作業による補正であることから、担当者によって補完方法の偏りが生じてしまう。そのため、電荷構成結果の適切な補完手法を確立し、自動で補完を行う解析ツールが必要である。

本研究では、電荷較正結果を確認し補完を行う解析ツールの開発を行った。電荷較正の際に発生しうる問題は 2 種類ある。1 つ目の問題は、電荷較正を行う際に正しい試験電荷が生成できないことがある。この問題を検知するために電荷較正結果の新たな評価方法を導入し、問題のある試験電荷を順に取り除くアルゴリズムを開発した。2 つ目の問題は、電荷較正結果に含まれるパラメータの欠損である。これまでの補完方法は最も近い FE チップから値をコピーするという方法であり、担当者により異なる値による補完を行ってしまうことがあるため、パラメータの最適な補完方法の評価を行った。その結果、Threshold 値については同一 FE チップにおける異なるピクセルタイプの平均、その他のパラメータについては異なる FE チップにおける同一ピクセルタイプの平均を用いることにより、より実際の値に近い値を再現できるという結果が得られた。この結果を利用し、電荷較正結果に含まれるパラメータの欠損を自動補完する解析ツールの開発を行った。開発した解析ツールを用いて 2022 年 9 月に行われた電荷較正データを用いて、Run3 モンテカルロシミュレーションサンプル作成のための電荷較正結果の作成を行った。

また、統計数を増加させ新物理発見の感度を向上させるため、LHC では 2024 年から HL-LHC へのアップグレードが計画されている。HL-LHC では、陽子ビームのバンチに含まれる陽子数が増加するため、瞬間ルミノシティが現行 LHC の 5-7 倍になり取得統計量の向上が期待される。そのため、1 バンチあたりの信号数が増加するため、検出器には読み出し速度の高速化と、高い放射線耐性、およびイベントのパイルアップを防ぐために高細密化が要求される。陽子の衝突点から最も近い内部飛跡検出器^{*1}は、要

^{*1} 1.3.2 節で説明したように、内部飛跡検出器は IBL、ピクセル検出器、ストリップ検出器、遷移放射検出器から構成される。

求性能を満たすために検出器の総入れ替えが予定されている。そのために、次世代ピクセルモジュールの大量生産が予定されており、各ピクセルモジュールに対して品質試験を行う。さらに、ATLASに搭載する際のモジュール選別や運転前後の性能比較のために、品質試験結果はチェコにある中央データベースに保管しておく必要がある。

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、品質試験結果の表示機能、品質試験結果の管理機能、および中央データベースとの同期機能の開発を行った。これらの機能をローカルデータベースに実装することにより、ピクセルモジュールの次世代器量産における品質試験結果管理に必要な機能の基本的な構成要素が全て揃った。しかし、品質試験結果を中央データベースへアップロードする機能について、読み出し試験結果のアップロード処理に約160秒必要という結果が得られた。処理時間改善のため、読み出し試験結果のアップロード処置を細分化し、処理時間を調査した。その結果、ローカルデータベースから試験結果を抽出処理を並列化することにより、処理時間が最大50秒程度削減できるということがわかった。

8.2 今後の課題

8.2.1 電荷較正の自動補完ツール

Run3においてピクセル検出器の電荷較正は10日に1度程度の頻度で行われる。この作業は1人の担当者により行われる予定であるが、担当者が体調不良等が原因で作業を行うことができなくなると別の人気が作業を行うことになる。本研究において開発した電荷較正結果の補完ツールについて、補完方法の説明や使用方法の説明のためのドキュメント作成を行う必要がある。

8.2.2 次世代ピクセルモジュール量産のためのデータベースシステム

本研究では、読み出し試験以外の項目についての閲覧機能や同期機能等を開発することにより、次世代ピクセルモジュールの量産に必要な機能の基本的な部分が揃った。ローカルデータベースシステムは各組み立て機関に設置されるものであるため、国外の研究機関が使用できるようにユーザーサポートを行う必要がある。そのために、ソフトウェア使用のためのドキュメントの作成やグループチャットによる問合せ対応を行っている。このようなユーザーサポートを今後も継続していく必要がある。

また、前章で述べたように、ローカルデータベースから中央データベースへの品質試験結果のアップロード機能のように、処理時間が長くユーザーの使用満足度が非常に悪い部分が確認された。読み出し試験結果の閲覧機能についても、結果表示のために数分必要ということが確認されていることから、処理時間を短くするような工夫が必要である。

付録 A

ローカルデータベースのブラウザ表示

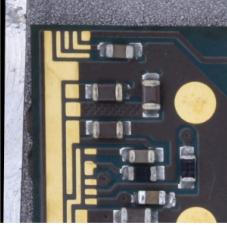
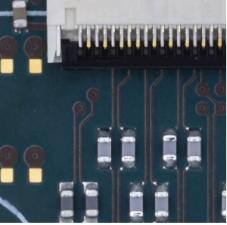
A.1 非読み出し試験結果のブラウザ表示

» TestType:OPTICAL

❖ Result of Virtual Inspection
■ Scan

Key	Data
component id	6138924058c2e3000a0db59d
current Stage	MODULEWIREBONDING
test Type	OPTICAL
institute	Tokyo Institute of Technology
user	kinoshita

❖ Pictures of Visual Inspection

Keys	Picture with anomaly	comment only
anomaly	['chip1 wire 1']	
picture		
comment		hoge

[View Entire Module](#)

図 A.1 外観検査結果のブラウザ表示。

A.2 ピクセルモジュール基本特性のブラウザ表示

» TestType:METROLOGY

Result of Metrology

Scan

Key	Data
component id	6138924058c2e3000a0db59d
current Stage	MODULETOPCB
test Type	METROLOGY
institute	Osaka Univ.
user	Onishi-san

Result

Results of distance

Key	Data
distance top	0
distance left	1
distance right	2
distance bottom	3

Results of angle

Key	Data
angle top-left	4
angle top-right	5
angle bottom-left	6
angle bottom-right	7

Results of module thickness

Key	Data
module thickness pickup area chip1	8
module thickness pickup area chip2	9
module thickness pickup area chip3	10
module thickness pickup area chip4	11
module thickness edge chip1	12
module thickness edge chip2	13
module thickness edge chip3	14
module thickness edge chip4	15
module thickness HV capacitor	16
module thickness Data connector	17

Results of planarity

Key	Data
planarity vacuum on	18
planarity vacuum on std dev	19
planarity vacuum off	20
planarity vacuum off std dev	21

comment

hoge

図 A.2 平坦性測定結果のブラウザ表示。

» TestType:MASS

⚙ Result of Mass Measurement

Scan

Key	Data
component id	6138924058c2e3000a0db59d
current Stage	MODULETOPCB
test Type	MASS
institute	Tokyo Institute of Technology
user	kinoshita

Result

Key	Data
Scale_accuracy	0.5
mass_value	1.0
mass_unit	g
comment	hoge

図 A.3 質量測定結果のブラウザ表示。

» TestType:GLUE_MODULE_FLEX_ATTACH

⚙ Result of Glue Module Flex Attach

Scan

Key	Data
component id	6138924058c2e3000a0db59d
current Stage	MODULETOPCB
test Type	GLUE_MODULE_FLEX_ATTACH
institute	Tokyo Institute of Technology
user	kinoshita

Result

Key	Data
Room_temperature	20.0
Temperature_unit	degC
Humidity	50.0
Humidity_unit	%RH
comment	

Property

Key	Data
Glue_name	Araldite 2011
Volume_ratio_of_glue_mixture	A:1,B:1
Glue_batch_number	TBA

図 A.4 接着剤情報についてのブラウザ表示。

» TestType:SENSOR_IV_20_DEGREE

✿ Result of Sensor IV

Scan

Key	Data
component id	6138924058c2e3000a0db59d
current Stage	MODULEWIREBONDING
test Type	SENSOR_IV_20_DEGREE
institute	Tokyo Institute of Technology
user	kinoshita

Result

Key	Data
V_step	-5.0 V
Step_duration	2 s
N_measurements_per_step	10
A_Compliance	1e-05
comment	

graph of Sensor_IV

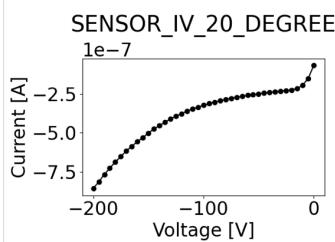


図 A.5 センサー特性測定結果のブラウザ表示。

» TestType:SLDO_VI

✿ Result of SLDO VI

Scan

Key	Data
component id	6138924058c2e3000a0db59d
current Stage	MODULEWIREBONDING
test Type	SLDO_VI
institute	Tokyo Institute of Technology
user	kinoshita

Result

Key	Data
A_step	-0.1
Step_duration	2
N_measurements_per_step	3
V_Compliance	2.0
startup_grade	[5, 5: 10C -]
comment	

graph of SLDO_VI

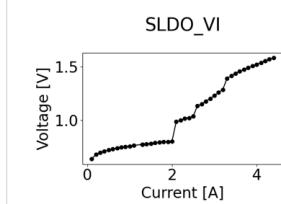


図 A.6 SLDO 特性結果のブラウザ表示。

» TestType:WIREBOND

✿ Result of Wirebond Pull Test

■ Scan

Key	Data
component_id	6138924058c2e3000a0db59d
current Stage	MODULEWIREBONDING
test Type	WIREBOND
institute	Tokyo Institute of Technology
user	kinoshita

■ Result

Key	Data
minimum_load	1.0 g
maximum_load	1.0 g
mean_load	1.0 g
load_standard_deviation	1.0 g
percentage_of_heel_breaks	10.0 %
comment	aaa

図 A.7 ワイヤー強度測定結果のブラウザ表示。

» TestType:WIREBONDING

✿ Result of Wirebonding Information

■ Scan

Key	Data
component_id	6138924058c2e3000a0db59d
current Stage	MODULEWIREBONDING
test Type	WIREBONDING
institute	Tokyo Institute of Technology
user	kinoshita

■ Result

Key	Data
Temperature	20.0
Temperature_unit	degC
Humidity	20.0
Humidity_unit	%RH
comment	

■ Property

Key	Data
Machine	hoge
Operator_name	hoge
Institution_of_operator	Tokyo Institute of Technology
Bond_wire_batch	TBA
Bond_program	Download Bonding Program
Bonding_jig	hoge

図 A.8 ワイヤー配線情報のブラウザ表示。

» TestType:RD53A_PULL-UP_RESISTOR

⚙ Result of Pullup Register

Scan

Key	Data
component id	6138924058c2e3000a0db59d
current Stage	MODULEWIREBONDING
test Type	RD53A_PULL-UP_RESISTOR
institute	Tokyo Institute of Technology
user	kinoshita

Result

Key	Data	chip1	chip2	chip3	chip4
value [kiloohm]		150	300	150	300
comment					

Reference image for chip numbering

図 A.9 プルアップ抵抗値のブラウザ表示。

» TestType:IREFTRIM_FE

⚙ Result of Ireftrim

Scan

Key	Data
component id	6138924058c2e3000a0db59d
current Stage	MODULEWIREBONDING
test Type	IREFTRIM_FE
institute	Tokyo Institute of Technology
user	kinoshita

Result

Key	Data	chip1	chip2	chip3	chip4
value [Binary]		1000	1000	1000	1000
comment					

reference image for chip numbering

図 A.10 IrefTrim 値のブラウザ表示。

» TestType:ORIENTATION

⚙ Result of Orientation

⬇ Scan

Key	Data
component id	6138924058c2e3000a0db59d
current Stage	MODULEWIREBONDING
test Type	ORIENTATION
institute	Tokyo Institute of Technology
user	kinoshita

⬇ Result

Key	Data
orientation	True
comment	

図 A.11 ベアモジュールとフレキシブル基板の向きについてのブラウザ表示。

参考文献

- [1] 南部陽一郎・木下東一郎・牧二郎・中西襄・政池明, ”大学院 素粒子物理学1 素粒子の基本的性質” 講談社サイエンティフィック
- [2] Particle Data Group, ”Particle Data Group”, <https://pdg.lbl.gov/>
- [3] The ATLAS Collaboration, A combination of measurements of Higgs boson production and decay using up to 139 fb^{-1} of protonproton collision data at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ collected with the ATLAS experiment, ”A combination of measurements of Higgs boson production and decay using up to 139 fb^{-1} of protonproton collision data at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ collected with the ATLAS experiment” <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2020-027/>, 2022年1月閲覧
- [4] The CERN accelerator complex, ”The CERN accelerator complex”, <https://cds.cern.ch/images/OPEN-PHO-ACCEL-2013-056-1>, CERN Document Server (最終更新: 2018年7月)
- [5] Computer generated image of the whole ATLAS detector, ”Computer generated image of the whole ATLAS detector”, <https://cds.cern.ch/record/1095924>, CERN Document Server (最終更新: 2015年2月).
- [6] The ATLAS Collaboration, ”Study of the material of the ATLAS inner detector for Run 2 of the LHC”(2017), <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/PERF-2015-07/>
- [7] Computer Generated image of the ATLAS calorimeter, ”Computer Generated image of the ATLAS calorimeter”, <https://cds.cern.ch/images/CERN-GE-0803015-01>, CERN Document Server (最終更新: 2018年6月).
- [8] CERN Accelerating science, ”The HL-LHC project”, 2021年12月閲覧, <https://hilumilhc.web.cern.ch/content/hl-lhc-project>
- [9] Burkhard Schmidt, ”The High-Luminosity upgrade of the LHC: Physics and Technology Challenges for the Accelerator and the Experiments” (2015), <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/706/2/022002/pdf>
- [10] 細山謙二, ”超伝導クラブ空洞” (2008), https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsj/43/4/43_4_132/_pdf
- [11] The ATLAS Collaboration, ”ATLAS Inner Tracker Pixel Detector Technical Design Report” (2018), <https://cds.cern.ch/record/2285585/files/ATLAS-TDR-030.pdf>
- [12] The ATLAS Experiment, ”The Inner Detector”, <https://atlas.cern/discover/detector/inner-detector>, 2021年12月閲覧
- [13] The ATLAS Experiment, ”Keeping the ATLAS Inner Detector in perfect alignment”, <https://atlas.cern/updates/experiment-briefing/inner-detector-alignment>, 2021年12月閲覧

- [14] The ATLAS Experiment, "ITk Pixel Layout Updates"(2020 年 4 月更新), <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/ITK-2020-002/>, 2022 年 1 月閱覽
- [15] HL/HE-LHC Physics Workshop, "Future physics opportunities for high-density QCD at the LHC with heavy-ion and proton beams"(2019), <https://arxiv.org/abs/1812.06772>
- [16] HL/HE-LHC Physics Workshop, "Opportunities in Flavour Physics at the HL-LHC and HE-LHC"(2019), <https://arxiv.org/abs/1812.07638>
- [17] HL/HE-LHC Physics Workshop, "Beyond the Standard Model Physics at the HL-LHC and HE-LHC"(2019), <https://arxiv.org/abs/1812.07831>
- [18] HL/HE-LHC Physics Workshop, "Higgs Physics at the HL-LHC and HE-LHC"(2019), <https://arxiv.org/abs/1902.00134>
- [19] HL/HE-LHC Physics Workshop, "Standard Model Physics at the HL-LHC and HE-LHC"(2019), <https://arxiv.org/abs/1902.04070>
- [20] The ATLAS Collaboration, "ATLAS sensitivity to winos and higgsinos with a highly compressed mass spectrum at the HL-LHC"(2018), <https://cds.cern.ch/record/2647294?ln=ja>
- [21] S. D. Thomas and J. D. Wells, Phenomenology of Massive Vectorlike Doublet Leptons, <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.81.34>
- [22] Particle Data Group, 33. Passage of particles through matter 1, <https://pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2018-rev-passage-particles-matter.pdf>
- [23] M. Moll, "Displacement Damage in Silicon Detectors for High Energy Physics" , IEEE Transactions on Nuclear Science, Aug. 2018. DOI: 10.1109/TNS.2018.2819506.
- [24] Beniamino Di Girolamo, "The ATLAS Pixel Detector" (2011), <https://pos.sissa.it/137/006/pdf>
- [25] Results from the ATLAS IBL low voltage current task force X-ray irradiation campaigns, "Results from the ATLAS IBL low voltage current task force X-ray irradiation campaigns", <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/PIX-2015-008/>, 2022 年 1 月閱覽
- [26] Cosmics and Calibration Approved Pixel Plots, "Cosmics and Calibration Approved Pixel Plots", <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/ApprovedPlotsPixel>, 2022 年 1 月閱覽
- [27] Garcia-Sciveres, Maurice, "The RD53A Integrated Circuit" (最終更新: 2019 年 9 月), <https://cds.cern.ch/record/2287593>, CERN Document Server
- [28] T. Amza, A. Dimitirevska, M. Garcia-Sciveres, D. Gnani, T. Heim, A. Krieger, M. Standke, "Guide to the RD53A - Differential Front End"(2018), https://twiki.cern.ch/twiki/pub/RD53/RD53ATesting/Diff_userguide.pdf
- [29] Prafulla Behara, "Threshold Tuning of the ATLAS Pixel Detector"(最終更新: 2018 年 9 月), <https://cds.cern.ch/record/1283928>, CERN Document Server
- [30] Maria Elena Stramaglia, "Calibration analysis software for the ATLAS Pixel Detector" (2015), <https://cds.cern.ch/record/2027805/files/ATL-INDET-PROC-2015-003.pdf>
- [31] Michael Kohler, "Studies of the Timing Behaviour of the ATLAS Pixel Detector"(2008), <https://www.hep.physik.uni-siegen.de/pubs/master/koehler-master.pdf>
- [32] M. Verducci, "ATLAS conditions database experience with the LCG COOL conditions database

- project” (2008), <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/119/4/042031>
- [33] 2015 IBL Calibration, ”2015 IBL Calibration”, <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/PIX-2016-005/>, 2022 年 1 月閲覧
- [34] IBL ToT and threshold evolution in 2017 and 2018, ”IBL ToT and threshold evolution in 2017 and 2018”, <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/PIX-2018-009/>, 2021 年 12 月閲覧
- [35] Stefano Terzo, ”Development of radiation hard pixel modules employing planar n-in-p silicon-sensors with active edges for the ATLAS detector at HL-LHC”(2015), <https://cds.cern.ch/record/2676574/?ln=ja>
- [36] Malte Backhaus, ”Characterization of new hybrid pixel module concepts for the ATLAS Insertable B-Layer upgrade”(2012), <https://arxiv.org/pdf/1202.3592.pdf>
- [37] Daniel Adam Dobos, ”Production accompanying testing of the ATLAS Pixel module” (2017), <https://cds.cern.ch/record/1016933/files/thesis-2007-016.pdf>
- [38] 奥山広貴, ” HL-LHC ATLAS ピクセル検出器量産時の品質試験に向けた データベースシステムの構築”, <https://cernbox.cern.ch/index.php/s/IB06BptySxPwD6L>, 東京工業大学大学院修士論文 (2021)
- [39] 窪田ありさ, ” HL-LHC ATLAS 実験用新型ピクセル検出器の系統評価と 量産時に向けた試験管理システムの開発”, <https://cernbox.cern.ch/index.php/s/BdhvSTAuuE5xHxt>, 東京工業大学大学院修士論文 (2020)
- [40] Eunchong Kim, ” Development of DAQ test system and database for the HL-LHC ATLAS production Pixel detector”, <https://cernbox.cern.ch/index.php/s/ZyYwYnMxeCSoeZl>, 東京工業大学大学院修士論文 (2019)
- [41] Lingxin Meng, ”RD53A Module Testing Document” (最終更新: 2021 年 9 月), <https://cds.cern.ch/record/2702738/files/ATL-COM-ITK-2019-045.pdf>
- [42] Massimiliano Antonello, ”Digital module electrical testing” (2020), <https://cds.cern.ch/record/2723333/files/ATL-COM-ITK-2020-020.pdf>
- [43] Vasilije Perovic, CMS Tracker Group. “Serial powering in four-chip prototype RD53A modules for Phase 2 upgrade of the CMS pixel detector” . ScienceDirect. 2020-10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900220308330>
- [44] ”ITKPIXV1 PIXEL CHIP, BDAQ WAFERPROBING UPDATE WN 2”, https://indico.cern.ch/event/993415/contributions/4181974/attachments/2170732/3664831/2021_01_13-Wafer_probing_part1.pdf
- [45] ”Unicorn University - Unicorn College” . Unicorn University, <https://unicornuniversity.net/en/>, 2022 年 1 月閲覧
- [46] MongoDB, ”MongoDB Documentation”, <https://docs.mongodb.com>, 2021 年 12 月閲覧
- [47] Neville W. Sachs, P.E., ”Practical Plant Failure Analysis” (2019), Economics, Finance, Business & Industry, Engineering & Technology

図目次

1.1	ヒッグス場との結合定数と素粒子の質量	3
1.2	LHC の全体図	5
1.3	ATLAS 検出器の全体図	7
1.4	ATLAS 検出器	7
1.5	内部飛跡検出器の全体像	8
1.6	内部飛跡検出器の断面図	8
1.7	内部飛跡検出器の配置	8
1.8	ATLAS カロリメータ	10
1.9	LHC の運転計画	11
1.10	ITk の全体図	13
1.11	ITk のピクセル検出器およびストリップ検出器の配置	13
1.12	$\tilde{\chi}_1^\pm$, $\tilde{\chi}_1^0$ 生成ダイアグラムと崩壊の模式図	15
1.13	ITk および現行の内部飛跡検出器における、Disappearing track の飛跡再構成効率	15
1.14	HL-LHC ATLAS 実験で期待される電弱ゲージノ探索感度	16
2.1	n 型半導体の結晶構造とバンド構造	18
2.2	p 型半導体の結晶構造とバンド構造	19
2.3	pn 接合の様子	19
2.4	エネルギー損失と β の関係。	21
2.5	ピクセルモジュールの模式図	21
2.6	プラナーセンサーと 3D センサーの構造	22
2.7	アナログ信号を ToT に変換する概念図	23
2.8	ある電荷量から生成されるアナログ信号と Threshold を超えるタイミングの関係	23
2.9	電荷量とタイムウォークの関係	24
2.10	Differential FE のアナログ回路の概念図と ToT 取得の概念図	25
2.11	フレンケル欠陥とショットキー欠陥	26
2.12	放射線損傷による型変換および全空乏化電圧の測定結果	27
2.13	MOS ドレインの模式図	27
2.14	トータルドーズ効果と FE チップ電流の関係	28
2.15	トータルドーズ効果と Threshold および ToT の関係	28
3.1	FEI3 アナログ回路の概略図	30
3.2	ToT と荷電粒子がシリコンセンサーに落とす電荷量 Q の概念図	30

3.3	検出効率と試験電荷の関係	32
3.4	同じ電荷量のアナログ信号においてパルスの立ち上がり点をずらした際の ToT の変化	33
3.5	ピクセルモジュール全体図と FE チップ境界付近のピクセルタイプ	34
4.1	電荷較正式 (3.2) を用いてフィッティングした結果	36
4.2	V_{cal} と Plsr DAC の関係の測定結果	36
4.3	欠損が含まれるピクセルモジュールについての Threshold 分布	37
4.4	ルミノシティに対する ToT の変化	38
4.5	MIP 粒子がピクセル検出器に落とす電荷量	40
4.6	B-Layer の全 FE チップについて計算した試験電荷と電荷較正結果から得られる電荷の差の分布	40
4.7	電荷較正結果を再較正するツールの処理の流れ	41
4.8	電荷再較正前後のフィッティング結果	41
4.9	データ欠損の補完方法	42
4.10	Threshold の評価結果	43
4.11	Threshold のノイズの評価結果	43
4.12	2021 年 9 月に行われた B-Layer についての電荷較正結果	46
4.13	ToT = 4 における電荷較正の評価方法	48
4.14	ToT = 4 における電荷較正の評価結果	48
4.15	B-Layer の電荷較正結果における 2 つの異なる構造	49
5.1	Triplet モジュールおよび Quad モジュールの配置	51
5.2	ピクセルモジュールの模式図	51
5.3	フレキシブル基板	52
5.4	ピクセルモジュールの組み立て工程	53
5.5	ワイヤー保護用の構造体	54
5.6	読み出し試験のセットアップ	55
5.7	FE チップへの電流と、入力電圧 V_{in} 、アナログ回路の出力電圧 V_{analog} およびデジタル回路の出力電圧 V_{digital} の関係	56
5.8	Iref 値と電流の関係	59
5.9	クアッドモジュールの IrefTrim 部分を表す部分 (左図) とワイヤーの配線と Iref 値の関係 (右図)[41]。ピンク色のワイヤーの配置により 4bit の Iref 値を表すことができる。	60
6.1	中央データベースとローカルデータベースの設置位置	62
6.2	ローカルデータベースの全体像	64
6.3	ローカルデータベースの構造	67
6.4	ウェブアプリケーションの処理の概念図	67
7.1	試験結果のブラウザ出力	71
7.2	ピクセル応答評価機能を用いて作成したピクセル解析結果と 2 つの差分を用いた比較結果	73
7.3	ピクセル解析結果における不良ピクセルの分布と 2 つの差分を用いた比較結果	73
7.4	バンプ剥がれが発生したピクセルモジュールについての読み出し試験結果	74

7.5	結果選択画面及び組み立て工程表示の例	75
7.6	ピクセルモジュールの基本特性選択画面	77
7.7	ピクセルモジュールの親子関係	78
7.8	ローカルデータベースを用いたピクセルモジュール登録画面	83
7.9	ピクセルモジュール登録機能による処理の流れ	83
7.10	品質試験結果アップロード処理の流れ	87
7.11	品質試験結果ダウンロード処理の流れ	90
A.1	外観検査結果のブラウザ表示	94
A.2	平坦性測定結果のブラウザ表示	95
A.3	質量測定結果のブラウザ表示	96
A.4	接着剤情報についてのブラウザ表示	96
A.5	センサー特性測定結果のブラウザ表示	97
A.6	SLDO 特性結果のブラウザ表示	97
A.7	ワイヤー強度測定結果のブラウザ表示	98
A.8	ワイヤー配線情報のブラウザ表示	98
A.9	プルアップ抵抗値のブラウザ表示	99
A.10	IrefTrim 値のブラウザ表示	99
A.11	ベアモジュールとフレキシブル基板の向きについてのブラウザ表示	100

表目次

1.1	標準模型での物質の構成粒子	2
1.2	標準模型での力を伝える粒子	2
1.3	超対称性粒子と標準模型の素粒子の対応	4
1.4	IBL、ピクセル検出器の配置	9
1.5	HL-LHC でのビームパラメータ	12
2.1	各 FE チップの主な仕様	24
3.1	各 Layer における Threshold の値	31
3.2	各 Layer における ToT のチューニングの値	31
4.1	RUN3 に向けた電荷較正補完のまとめ	45
4.2	Run3 における電荷較正での各 Layer における Threshold の値、ToT の閾値および MIP 粒子に相当する ToT の目標値	46
5.1	モジュール起動温度に対する階級値	57
5.2	ピクセル解析の評価基準一覧	58
5.3	プルアップ抵抗値と電源の関係	60
6.1	ローカルデータベースのコレクション	66
7.1	あるピクセルモジュールのタイプと組み立て可能なベアモジュールおよびフレキシブル 基板の関係	79
7.2	ピクセルモジュールのシリアルナンバーと FE チップおよびセンサーの関係	79
7.3	ピクセルモジュール登録に必要な入力情報	82
7.4	中央データベースに定義した各試験項目のパラメータ	85
7.5	各試験項目についてアップロード機能の処理時間の測定結果	86
7.6	アップロード機能に使用される API 一覧	88
7.7	ダウンロードツールの処理時間	88
7.8	圧縮するファイル数を変更した際のアップロード処理時間	89