

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

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

⁴ 2022 年 1 月 23 日

¹ Abstract

² abstract

1 概要

1 目次

2 概要	i
3 第 1 章 序論	1
4 1.1 素粒子標準模型	1
5 1.2 LHC	4
6 1.3 ATLAS 実験	6
7 1.4 HL-LHC アップグレード	11
8 第 2 章 シリコンピクセル検出器	17
9 2.1 シリコン検出器	17
10 2.2 ピクセルモジュール	20
11 2.3 放射線損傷	24
12 第 3 章 現行ピクセルモジュールの電荷較正	28
13 3.1 アナログ回路	28
14 3.2 電荷較正手法	28
15 3.3 電荷較正結果の履歴	32
16 第 4 章 電荷補正の最適化	34
17 4.1 電荷較正における補正の概要	34
18 4.2 電荷較正の補正	38
19 4.3 データに欠陥が含まれる場合の補完	40
20 4.4 自動補完のための解析ツール	42
21 4.5 解析ツールの運用	44
22 4.6 本章のまとめ	47
23 第 5 章 次世代ピクセルモジュールの量産	49
24 5.1 次世代ピクセルモジュールの組み立て部品	49
25 5.2 次世代ピクセルモジュールの組み立て工程	51
26 5.3 品質試験	53
27 5.4 量産における試験結果管理	57
28 第 6 章 モジュール量産におけるデータベースシステム	59
29 6.1 量産に用いるデータベースの概要	59

1	6.2	ローカルデータベースの構造	60
2	6.3	モジュールの品質試験に必要な開発項目	63
3	第 7 章	試験結果データ管理システムの開発	66
4	7.1	品質試験結果の表示機能	66
5	7.2	品質試験結果の管理機能	70
6	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	73
7	7.4	本章のまとめ	87
8	第 8 章	まとめ	89
9	8.1	結論	89
10	8.2	今後の課題	90
11	付録 A	ローカルデータベースのブラウザ表示	91
12	A.1	非読み出し試験結果のブラウザ表示	91
13	A.2	ピクセルモジュール基本特性のブラウザ表示	91
14	参考文献		98
15	謝辞		101

¹ 第1章

² 序論

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

⁹ 1.1 素粒子標準模型

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

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

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

¹⁶ 1.1.1 標準模型の概要

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

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

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

表 1.1 標準模型での物質の構成粒子。

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

表 1.2 標準模型での力を伝える粒子。

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

- 1 用、弱い相互作用、電磁相互作用が記述される。強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD: Quantum
 2 Chromodynamics) と、弱い相互作用と電磁相互作用を記述するワインバーグ-サラム理論のゲージ場が
 3 組みとなり標準模型が導入され、3つの相互作用はスピン 1 のゲージボソンによって媒介される。
 4 標準模型では、ゲージ場や基本粒子は質量を持たないものとしてラグランジアンの中に導入される。し
 5 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。
 6 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
 7 の真空期待値 $v \sim 250$ GeV が対称性を破るとともに粒子に質量を与える。各粒子はヒッグス場と直接結
 8 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
 9 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
 10 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。

1.1.2 標準模型を超えた新物理の探索

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

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

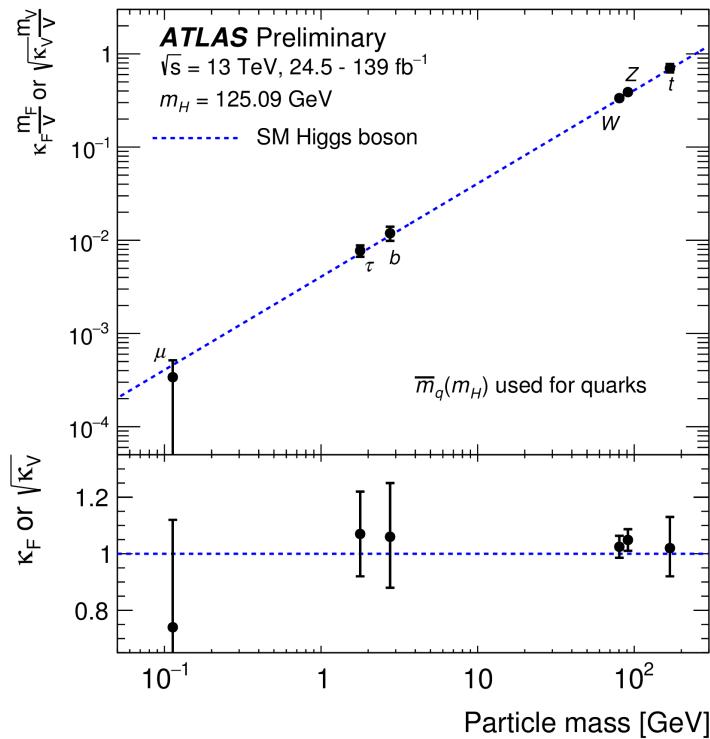


図 1.1 ヒッグス場との結合定数と素粒子の質量 [15]。 $\kappa_F \frac{m_F}{v}$ はフェルミオン ($F = t, b, \tau, \mu$) に対する結合定数を表し、 $\sqrt{\kappa_V} \frac{m_V}{v}$ はボソン ($V = W, Z$) に対する結合定数を表す。 v はヒッグス場の真空期待値を表す。

- 1 模型の問題の 1 つとして、暗黒物質が挙げられる。
- 2 暗黒物質が存在することの最も有力で直接的な実験事実は、銀河の回転曲線の測定から得られる。光学分光観測で得られる銀河全体の回転速度の分布は、銀河に含まれる星やガスから得られる物質分布から予想される回転速度よりもはるかに大きな回転速度が得られる。このことは、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っており、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っていないうが、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。
- 3 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。
- 4 超対称性理論は標準模型では説明が困難な問題を解決することができる一方で、バリオン数やレプトン数を破る相互作用の存在を避けることができない。バリオン数とレプトン数を破る現象のひとつとして陽子崩壊があるが、このような崩壊は観測されていない。この事実を説明するために、バリオン数とレプト

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

1 ノ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
2 義されている。

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

3 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
4 子では 1 となり、超対称性粒子では -1 となる R パリティの保存から、標準模型の粒子と超対称性粒子
5 に起こりうる崩壊は以下の 3 通りのみである。

- 6 • $SM \rightarrow SM + SM$
- 7 • $SM \rightarrow SUSY + SUSY$
- 8 • $SUSY \rightarrow SM + SUSY$

9 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
10 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る
11 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
12 りうる。

13 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。そ
14 の問題を以下に示す。

- 15 • 階層性問題
- 16 • B/L 対称性の破れの候補
- 17 • ニュートリノの質量形成のメカニズム
- 18 • 超ひも理論の特徴

19 1.2 LHC

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

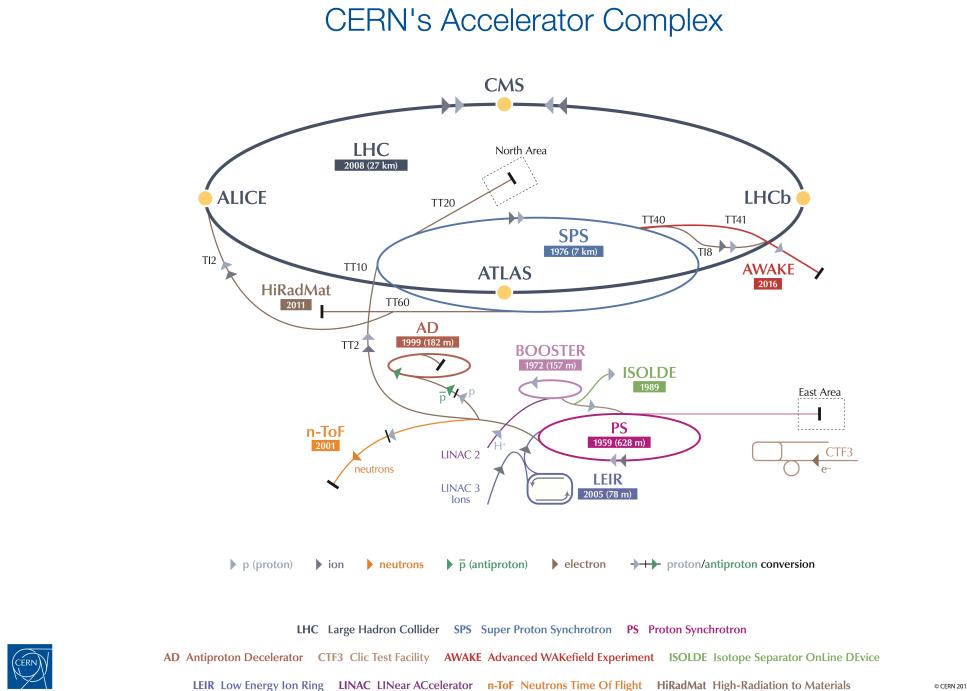


図 1.2 LHC の全体図 [5]

1 える新物理の探索が LHC の主な目的である。

2 1.2.1 LHC の基本構造

3 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
4 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。

5 金属製の円筒に水素ガスを注入し、電場を用いて水素分子を陽子と電子に分離する。LHC のビー
6 ムは、最大 2808 個のバンチと呼ばれる陽子のかたまりから構成され、 1.15×10^{11} 個の陽子が 1 バ
7 ナンチとして加速される。すなわち、LHC において陽子陽子衝突から物理現象の探索をするためには、
8 $2 \text{ beams} \times 2808 \text{ bunches} \times 1.15 \cdot 10^{11} \approx 6 \cdot 10^{14}$ 個の陽子を生成する必要がある。

9 生成された陽子バンチは、初めに線形加速器 (LINAC 2) によって 50 MeV まで加速される。その後、
10 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
11 器 (SPS) によって段階的に 450 GeV まで加速され、2 本の逆向きに加速された陽子バンチが LHC に投
12 入される。LHC に投入された陽子バンチは 6.5 TeV(2018 年時点) まで加速されて、各衝突点において 2
13 つの陽子バンチが約 25 ns の間隔で衝突する。

14 LHC のビームパイプ上には 4 つの衝突点が設けられており、それぞれの衝突点において AT-
15 LAS(A Troidala LHC ApparataS)、CMS(Compact Muon Solenoid)、ALICE(A Large Ion Collider
16 Experiment)、LHCb 実験が行われている。

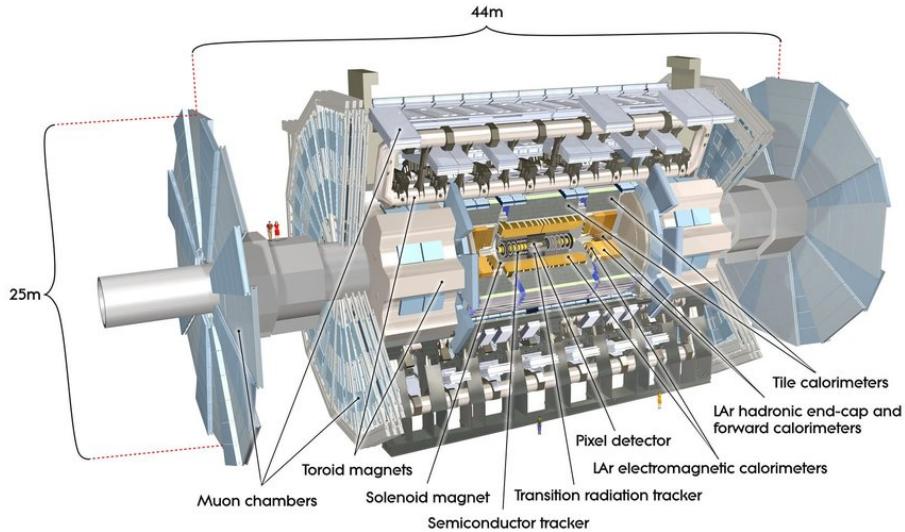


図 1.3 ATLAS 検出器の全体図 [6]。円筒の中心の内側から順に、内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミューオン検出器が衝突点を覆うように存在する。

1.2.2 ルミノシティ

陽子ビームの強度を表すパラメータとして瞬間ルミノシティ L が用いられる。反応断面積 σ の物理イベントが、1秒あたりに生じるイベント数 N は式 (1.2) で与えられる。

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

ここで、 N_b は 1 バンチあたりに含まれる粒子数、 n_b は 1 ビームに含まれるバンチ数、 f_{rev} はビームの回転周波数、 γ_r は陽子ビームのローレンツ因子、 ε_n はビーム軸に垂直な平面でのビームの広がり、 β^* は衝突点における振幅の大きさである。 R は幾何学的損失係数という、ビーム衝突が有限の角度で起きることによる係数であり、式 (1.3) で表される。

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

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

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 の衝突点の一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

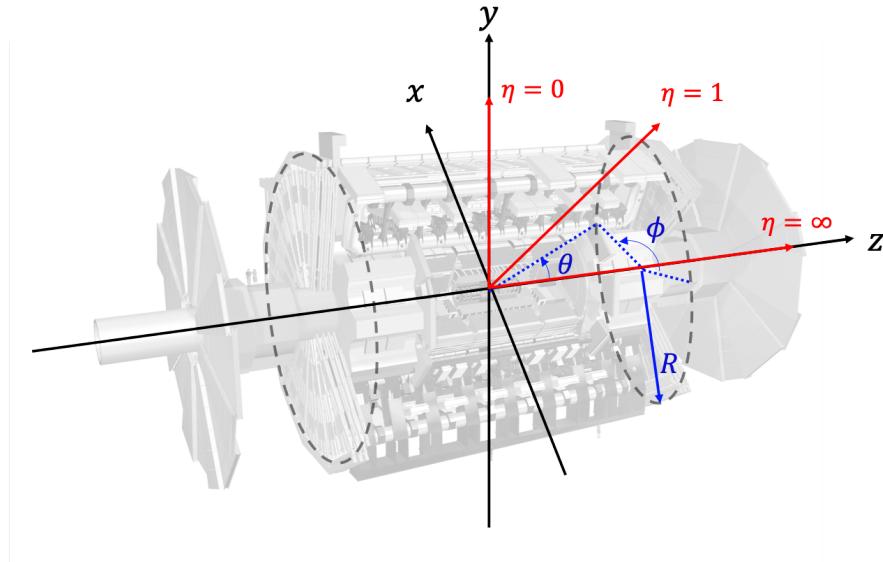


図 1.4 ATLAS 検出器で使用される座標系 [6]。直交座標系 (x, y, z) および円筒座標系 (R, ϕ, z) が定義される。

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 (pesudorapidity) η を式 (1.5) のように定義する。

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

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 ATLAS の側面に対応する領域をバ렐部、 $|\eta|$ が大きく ATLAS の底面に対応する部分をエンドキャップ部と呼ぶ。

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。

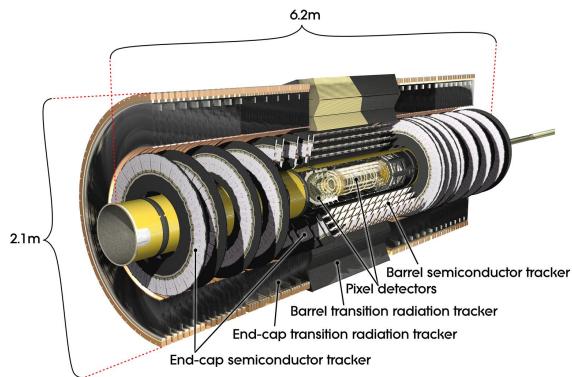


図 1.5 内部飛跡検出器の全体像 [13]。

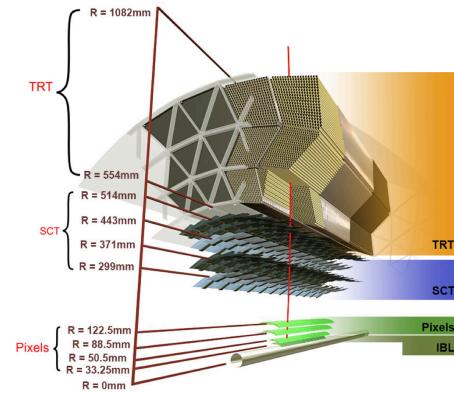


図 1.6 内部飛跡検出器の断面図 [14]。

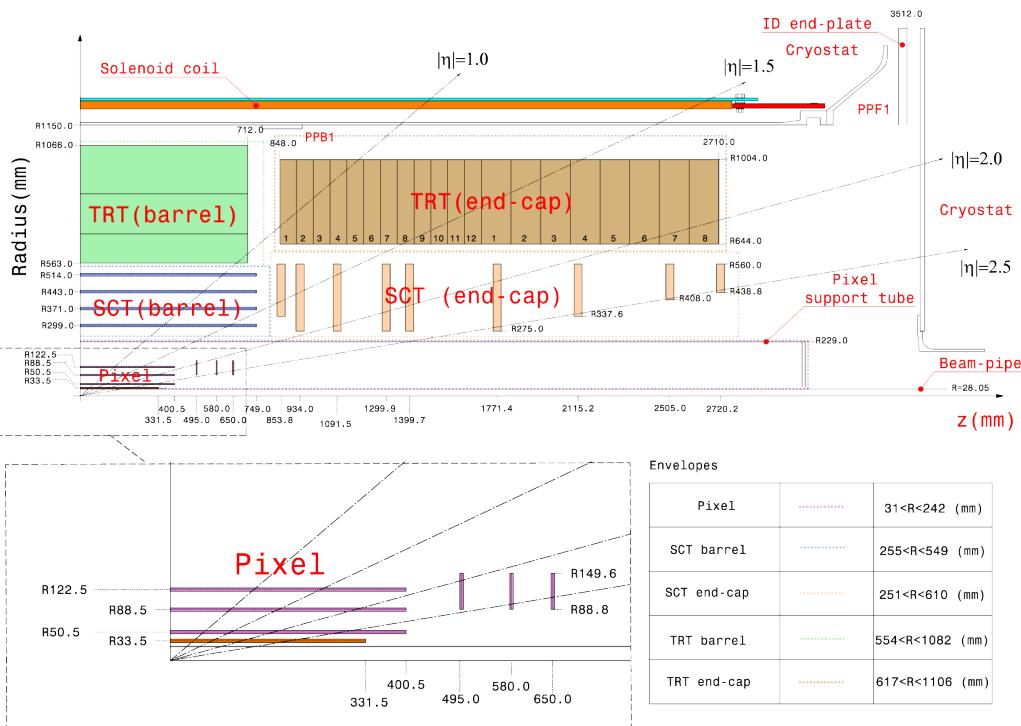


図 1.7 内部飛跡検出器の配置 [7]。

1 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 2007 年から稼働している検出器であり、読み出しチップに FE-I3 という $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ のピクセルを持つ ASIC が使用されている。IBL は、LHC における 2 年間のシャットダウン期間 (2012 年 - 2014 年) に新たに設置された。IBL は陽子ビームの衝突点に最も近い検出器のため、高い放射線耐性と多い事象数を処理することができるよう設計されている。読み出しチップには FE-I4 と呼ばれる、 $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ のピクセルを持つ ASIC が使用されている。

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

1.3.1 ストリップ検出器

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

1.3.2 遷移放射検出器

遷移放射検出器 (TRT: Transition Radiation Tracker) は、ストローチューブで構成された検出器であり、内部飛跡検出器の最外層に配置されている。バレル部では 52544 本のストローチューブ (長さ 1.5 m) が $0.5 \text{ m} < R < 1.1 \text{ m}$, $|\eta| < 1$ の領域を、エンドキャップ部では片側 122880 本のストローチューブ (長さ 0.4 m) が $0.8 \text{ m} < |z| < 2.7 \text{ m}$, $< |\eta| < 2$ の領域を覆うように配置されている。ドリフトチューブの直径は 4 mm であり、チューブ内部には 70% の Xe、27% の CO₂ と 3% の O₂ の混合ガスが充填されており、チューブの中心部に直径 31 μm のワイヤーが張られている。荷電粒子がストローチューブを通過すると、混合ガスをイオン化する。それにより発生した自由電子は、チューブの外側にかけられた電場によりワイヤーに向かってドリフトし、読み出しされる。

1.3.3 カロリメータ

図 1.8 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 ($1.4 < |\eta| <$

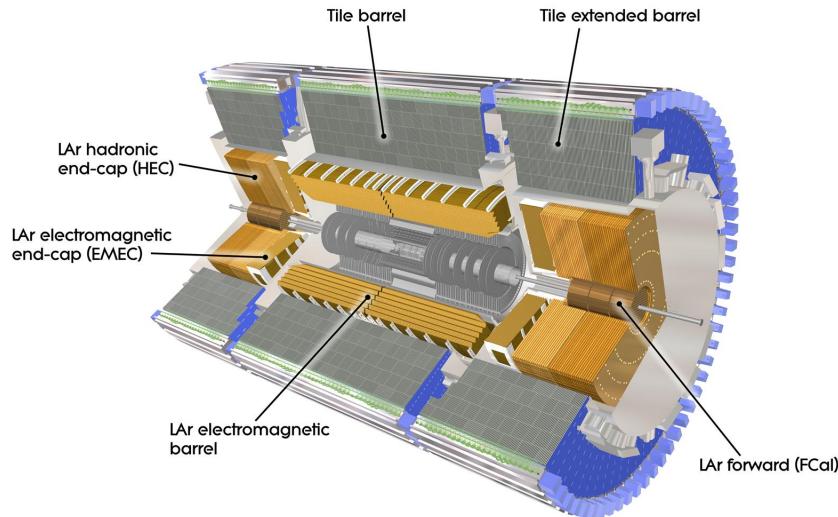


図 1.8 カロリメータの全体図 [8]

1 3.2) の領域に設置されている。検出層に液体アルゴン^{*2}、吸収層に鉛 ($Z = 82$) が用いられており、高エ
 2 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
 3 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
 4 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
 5 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
 6 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
 7 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
 8 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。

9 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
 10 ($1.5 < |\eta| < 3.2$) 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
 11 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
 12 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
 13 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
 14 $7.4\lambda_0$ となっている。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
 15 均自由工程である。

16 1.3.4 ミューオン検出器

17 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
 18 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
 19 ($\sim 2.2 \mu\text{sec}$) 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
 20 の運動量を 100 GeV に対して約 3%、1 TeV に対して約 10% の運動量分解能で測定できるよう設計され
 21 ている。

22 ミューオン検出器の大部分は、MDT(Monitored Drift Tube) である。MDT は直径約 3 cm のドリ

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



図 1.9 2021 年 1 月に作成された LHC の運転計画 [9]。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。

- 1 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、
- 2 バレル部においては RPC(Resistive Plate Chamber)、エンドキャップ部においては TGC(Thin Gap
- 3 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
- 4 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
- 5 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
- 6 オンの通過位置測定を行う。

1.4 HL-LHC アップグレード

- 8 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
- 9 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 $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 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
- 11 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。

12 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。
13 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
14 グレード計画について述べる。

1.4.1 HL-LHC の概要

- 16 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
- 17 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
- 19 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

表 1.5 HL-LHC でのビームパラメータ [10]。

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

1 倍にまで増加させる。

2 表 1.6 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。式 (1.2) より、
 3 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^*)
 4 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
 5 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改良を計画している。

- 6 • 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,
 7 PS, SPS) について更新・アップグレードを実施
 8 • 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
 9 りの挿入部に新たに高磁場の磁石を実装
 10 • 幾何学的損失係数 R を現行 LHC と同程度に保つため、衝突点のクラブ空洞³を導入

11 1.4.2 内部飛跡検出器のアップグレード

12 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
 13 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
 14 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。

- 15 • 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
 16 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
 17 り高い放射線耐性を持つ検出器が要求される。
 18 • 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
 19 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
 20 能が大幅に低下する。特に、荷電粒子への感度が高いガス検出器である TRT では検出器の占有率

³ 「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。[11]

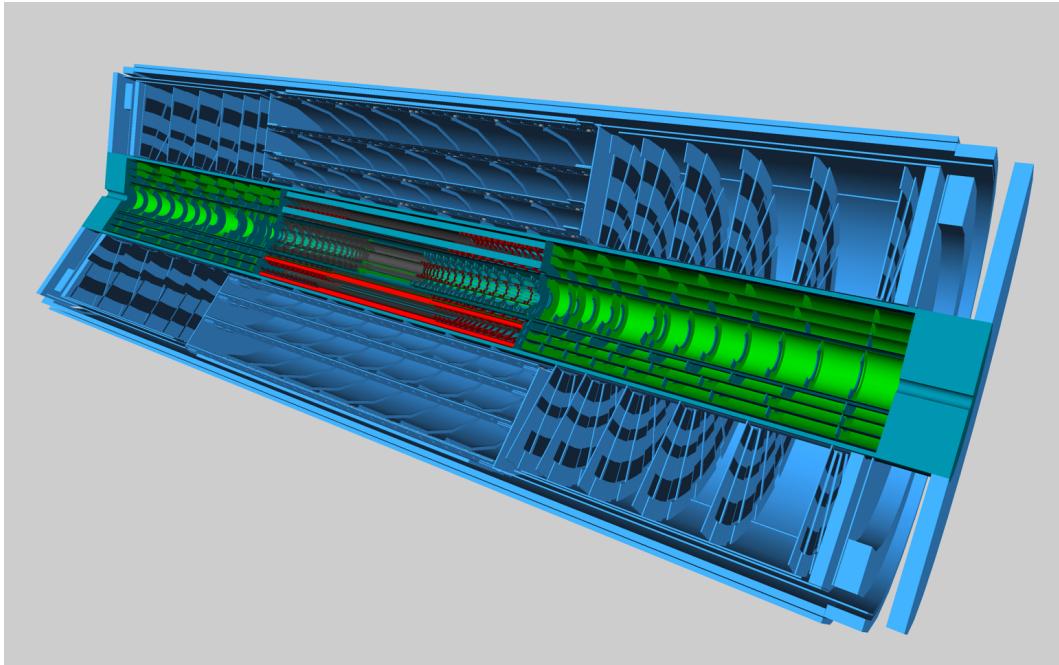


図 1.10 ITk の全体図 [12]。緑色の領域はピクセル検出器を表し、青色の領域はストリップ検出器を表す。

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。

表 1.6 HL-LHC でのビームパラメータ [10]。

パラメータ	現行 IBL	ITk
ピクセルサイズ [μm^2]	7	7
読み出しデータレート N_b	1.15×10^{11}	2.2×10^{11}
交差角 θ_c [μrad]	285	590
幾何学的損失係数 R (括弧内はクラブ空洞無し)	0.836	0.829 (0.305)
衝突点における振幅 β^* [m]	285	590
xy 平面のビームの広がり ε_n [μm]	3.75	2.50
1 交差あたりの事象数(パイルアップ)	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

- 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: $5 \times 10^{15} [\text{MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2]$, ピクセル検出器: $1 \times 10^{15} [\text{MeVn}_{\text{eq}}/\text{cm}^2]$) 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

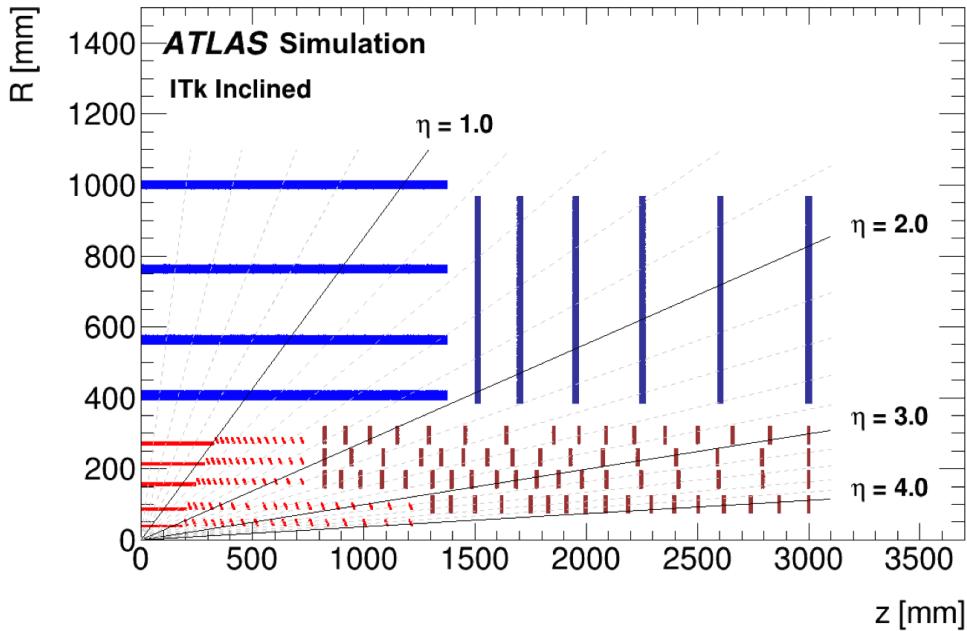


図 1.11 ITk のピクセル検出器およびストリップ検出器の配置 [12]。 z 軸はビーム軸方向、 R はビーム軸と垂直な半径を表す。赤色はピクセル検出器のバレル部、えんじ色はピクセル検出器のエンドキャップ部を表す。また、青色はストリップ検出器のバレル部であり、濃い青色はストリップ検出器のエンドキャップ部を表す。

- 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、およびトリガーレートを 1 MHz にすることから、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。

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 [16]
- フレーバー物理 [17]
- 標準模型を超える物理 [18]
- ヒッグス粒子の精密測定 [19]
- 標準模型粒子の精密測定 [20]

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 において 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。

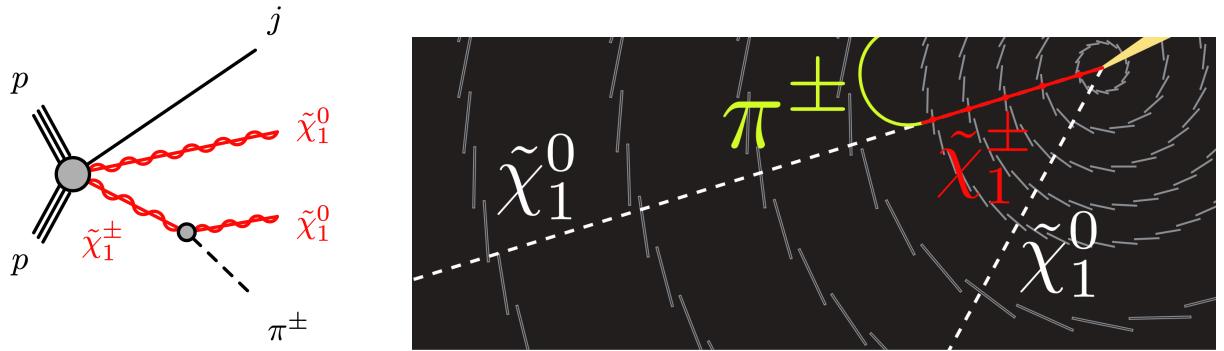


図 1.12 $\tilde{\chi}_1^\pm$, $\tilde{\chi}_1^0$ 生成ダイアグラム (左図) と HL-LHC の検出器における崩壊の模式図 (右図) [21]。模式図はビーム軸と垂直な平面を表しており、円状に広がる層は ITk (内側 5 層はピクセル検出器、外側 4 層はストリップ検出器) を表す。陽子衝突から生じた $\tilde{\chi}_1^\pm$ は長寿命粒子であり、ITk の 5 層目までヒットを残す。その後、低運動量を持つパイオン (π^\pm) と $\tilde{\chi}_1^0$ に崩壊する。

1 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
 2 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
 3 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。
 4 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、
 5 ITk の 5 層目までヒットを残し、低運動量を持つパイオン (π^\pm) と $\tilde{\chi}_1^0$ に崩壊する。低運動量を持つパイ
 6 オン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
 7 ない。そのため、 $\tilde{\chi}_1^\pm$ の飛跡は、その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
 8 らの飛跡が途中で途切れるような信号を **Disappearing track** と呼ぶ。

9 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
 10 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
 11 **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
 12 7 つのヒットがあることを要求し、tracklet の再構成のためににはピクセル検出器に少なくとも 4 つのヒッ
 13 トが要求される。 $\tilde{\chi}_1^\pm$ の飛跡は tracklet として測定されると予想されるため、ピクセル検出器の測定精度
 14 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 の測定感度の予
 15 測値を示す。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
 16 向上していることがわかる。

17 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
 18 探索感度を示す。HL-LHC での探索感度の予測値と理論予測 [22] を比較すると、LSP にウィーノを仮定
 19 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
 20 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。

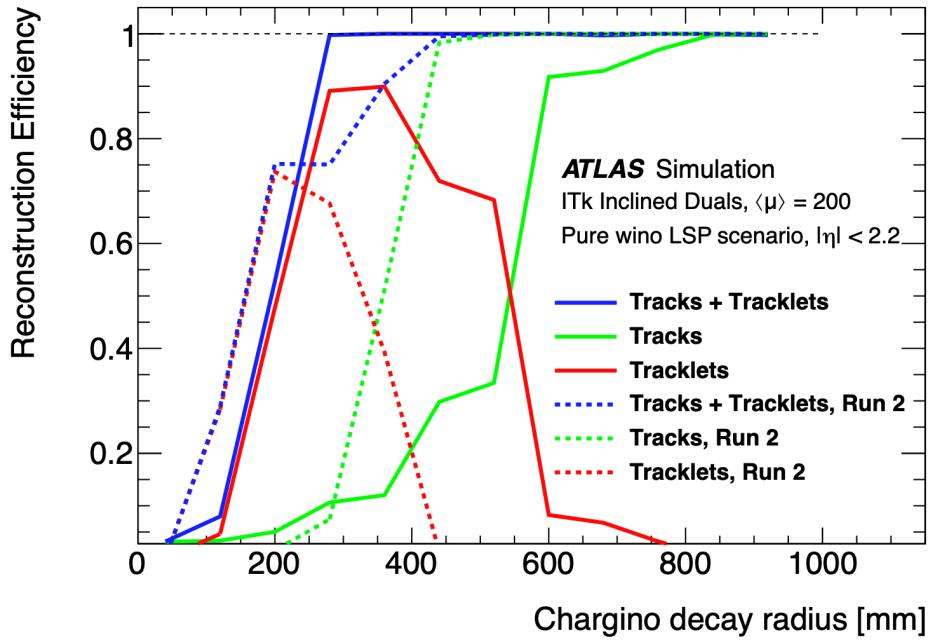


図 1.13 ITk および現行の内部飛跡検出器における、Disappearing track の測定感度の予測値 [12]。実線は ITk における測定感度を表し、波線は Run2 における内部飛跡検出器の測定感度を表す。

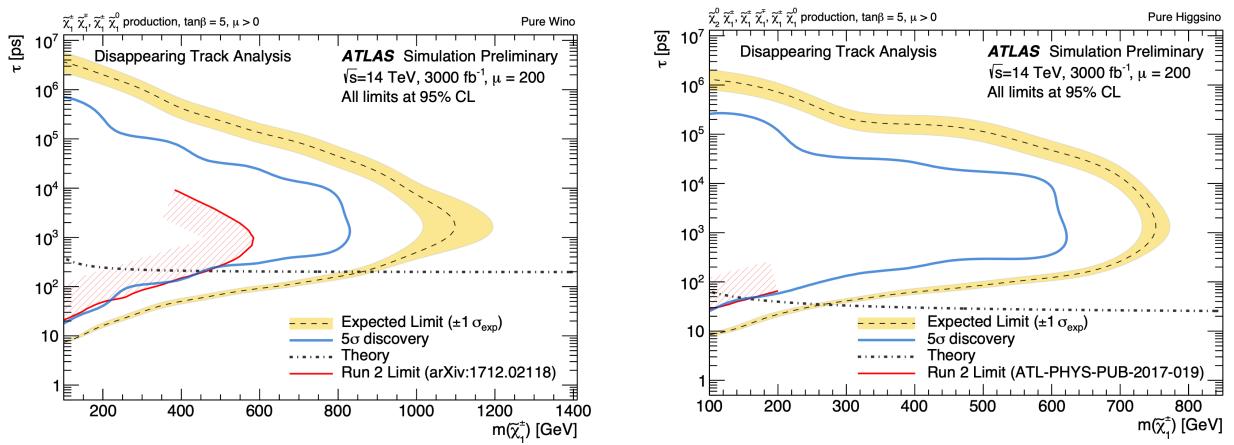


図 1.14 HL-LHC ATLAS 実験で期待される電弱ゲージーノ探索感度 [21]。これらの図は、 $\tilde{\chi}_1^\pm$ の質量 (横軸) と寿命 (縦軸) を 95% の信頼区間 (CL) で表す。右図は LSP にウィーノを仮定した場合であり、左図は LSP にヒグシーノを仮定した場合である。

¹ 第2章

² シリコンピクセル検出器

³ 本研究で使用するピクセル検出器は、シリコンを用いた半導体検出器である。本章では、半導体検出器
⁴ の一般論と、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
⁵ クセル検出器について説明する。

⁶ 2.1 シリコン検出器

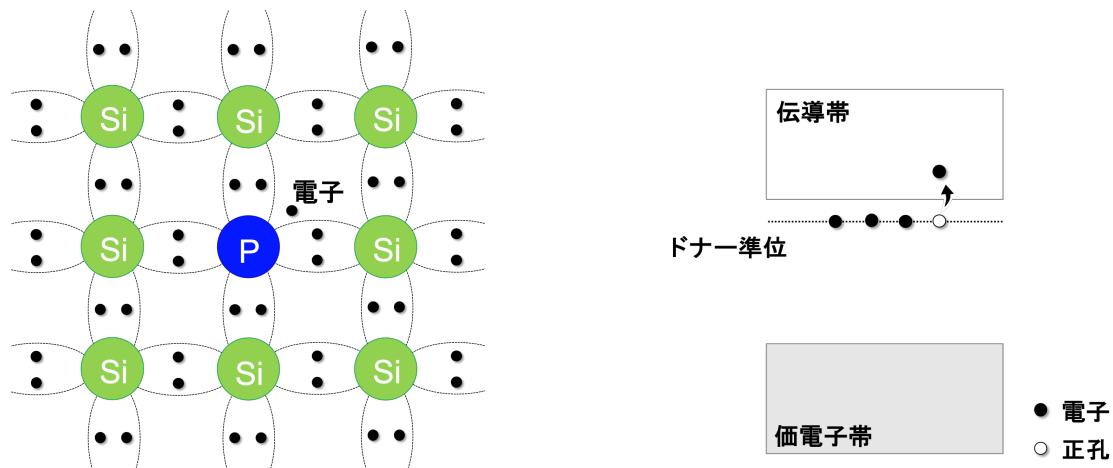
⁷ 本節では、シリコン検出器を例に半導体の主な性質と検出原理について述べる。

⁸ 2.1.1 半導体検出器の一般論

⁹ 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
¹⁰ 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
¹¹ 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
¹² 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
¹³ 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
¹⁴ 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
¹⁵ 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
¹⁶ 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。

¹⁷ 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
¹⁸ 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
¹⁹ 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
²⁰ 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
²¹ 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
²² 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
²³ 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
²⁴ $E_g \simeq 1 \text{ eV}$ 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
²⁵ $T = 300 \text{ K}$ 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
²⁶ 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
²⁷ 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。



1 伝導帯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

3 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帯に存在する電子は少なく電
4 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
5 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
6 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
7 型半導体に分類される。

8 図 2.2 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
9 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
10 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
11 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伝導帯に励起され、自由電子とな
12 る。添加された 5 値の元素のことをドナーと呼ぶ。

13 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
14 ヴ素 (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
15 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
16 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
17 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
18 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

20 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
21 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
22 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っ
23 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
24 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
25 由な電子や正孔は、拡散電位が作る電場 V_{vi} 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

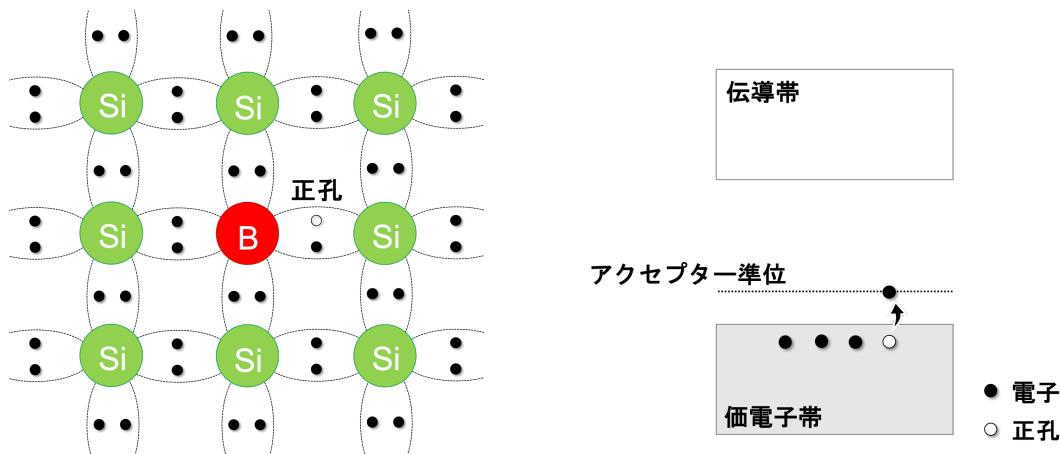


図 2.2 p 型半導体の結晶構造とバンド構造。

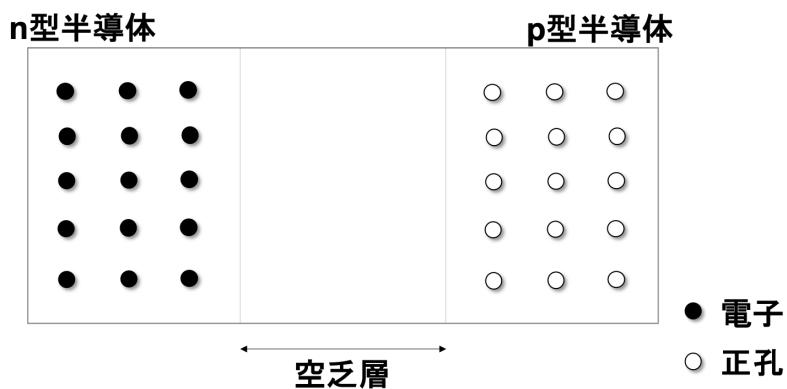


図 2.3 pn 接合の様子。

- 1 誘起されることで電流が流れることにより信号を生成する。
- 2 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。
- 3 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。

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

- 4 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 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。

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

- 5 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

- 1 圧の平方根に比例することがわかる。
- 2 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。

dE/dx	単位長さあたりの荷電粒子のエネルギー損失 [$\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$]
K	$4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.307075$ [$\text{MeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$] (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

- 3 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 $1 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$ と $2 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$ 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。
- 10 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
- 11 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。

13 2.2 ピクセルモジュール

- 14 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の図 2.5 にピクセルモ
15 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
16 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。

17 2.2.1 シリコンセンサー

- 18 ATLAS ピクセル検出器に実装するセンサーはプラナーセンサーと 3D センサーがある。図 2.6 にプラ
19 ナーセンサーと 3 センサーの模式図を示す。
- 20 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
21 埋め込んだ構造をしている。 n^+ 型半導体電極はセンサー一面において格子状に配列し、それぞれの電極か
22 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
23 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

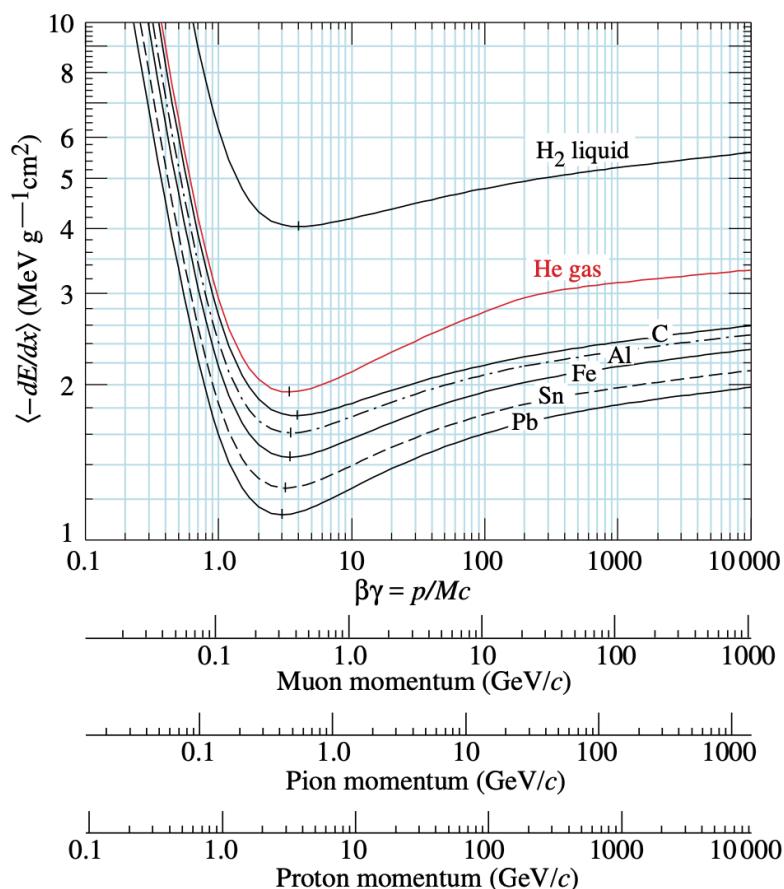
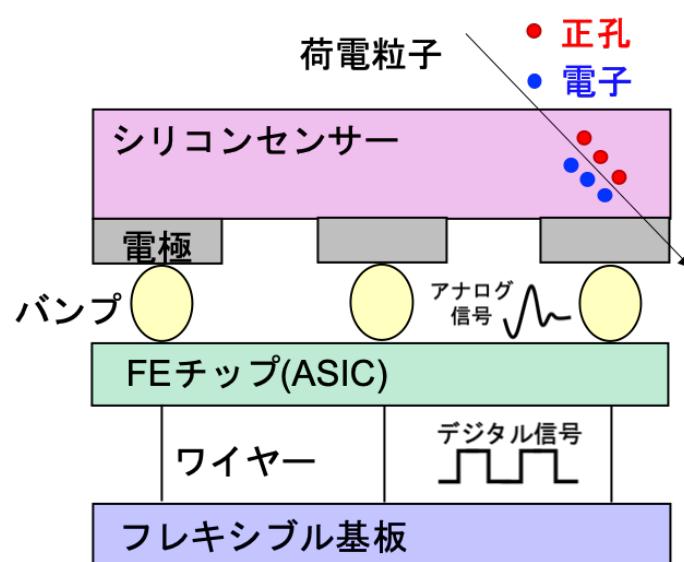
図 2.4 エネルギー損失と β の関係 [23]。

図 2.5 ピクセルモジュールの模式図。

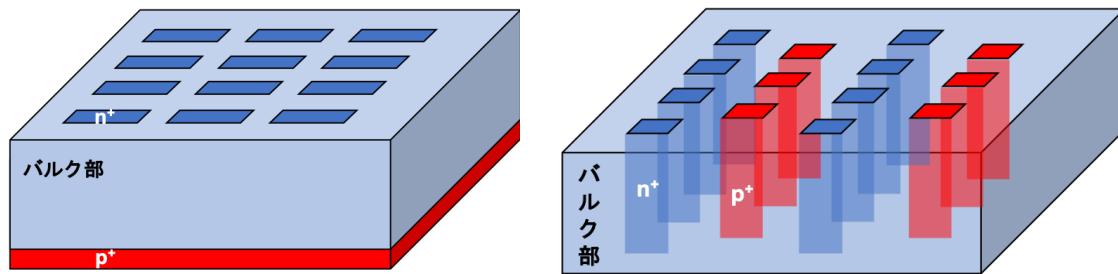


図 2.6 プラナーセンサー(左図)と 3D センサーの構造(右図)。

- 1 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
 2 ためには、空乏領域を n^+ 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
 3 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
 4 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ために、
 5 ITk では 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
 6 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
 7 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、
 8 全空乏化電圧が耐電圧を超えたたら部分空乏化による運用が可能である。
- 9 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トをしたものである。3D センサーは
 10 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
 11 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ナーセンサーに比
 12 べて小さい。そのため、3D センサーはプラナ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
 13 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 の一部にも搭載する予定
 14 である。

15 2.2.2 FE チップ

16 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
 17 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
 18 では受け取ったアナログ信号を増幅、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。

19 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
 20 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
 21 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。
 22 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
 23 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
 24 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)**
 25 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
 26 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
 27 れる。

28 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
 29 ず約 40 ns となるよう設定されている。そのため、小さい電荷量から生成される信号は立ち上がりが遅
 30 くなってしまう。時間幅は 25 ns を単位とするクロックで測定されるが、クロックの間隔が 25 ns と短

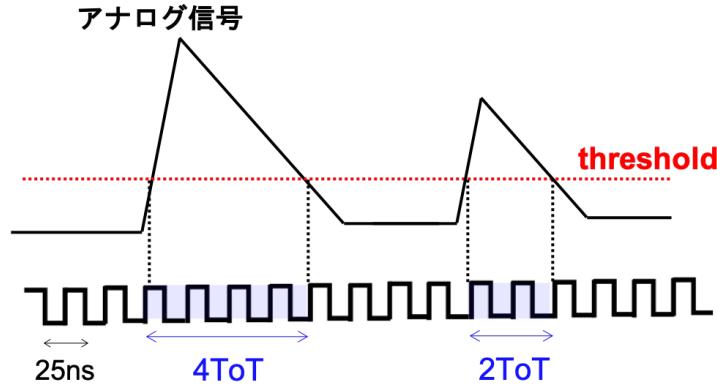


図 2.7 アナログ信号を ToT に変換する概念図。アナログ信号の三角波は Threshold を超えた時間幅に相当する量である ToT に変換される。

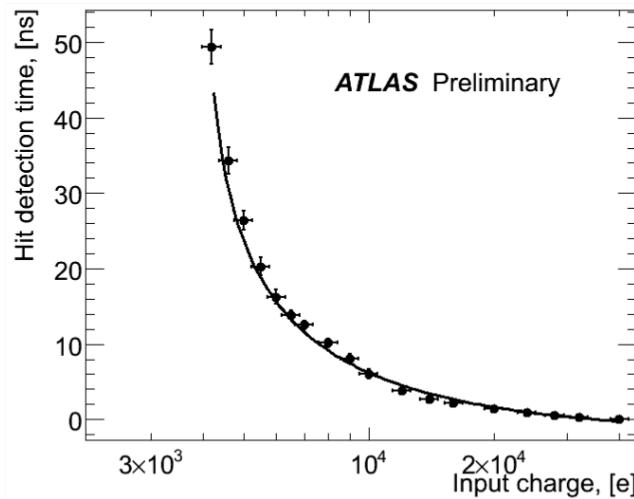


図 2.8 電荷量とタイムウォークの関係 [25]。

- 1 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である **タイムウォーク**
 2 の効果を考慮する必要がある。電荷量とタイムウォークの関係を図 2.8 に示す。電荷量の小さい信号
 3 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
 4 ある。ATLAS における陽子衝突は 40 MHz 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
 5 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**
 6 **threshold** という新たな閾値を導入する。Intime threshold は、100 ke を持つ参考電荷と比べてタイ
 7 ムウォークが 20 ns 長く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
 8 Threshold よりも大きい値(およそ Threshold の値よりも 1500 e 程度大きい値)になるよう決定され、
 9 タイムウォークの影響の制御をすることができる。
- 10 ピクセル検出器では **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
 11 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
 12 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
 13 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
 14 表 2.1 に示す。

表 2.1 各 FE チップの主な仕様 [12]。

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

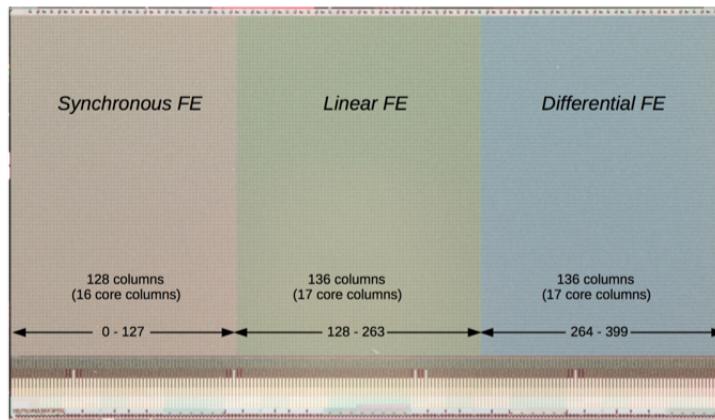


図 2.9 RD53A のピクセルとアナログ回路 [28]。左の領域から順に Synchronous FE、Linear FE、Differential FE となっている。

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、試験・比較のために 3 種類のアナログ回路を搭載している。図 2.9 に RD53A のを示す。図 2.9 のように RD53A には 3 つの領域があり、左から順に Synchronous FE、Linear FE、Differential FE と呼ぶ。それぞれの領域においてアナログ信号の処理方法が異なり、Differential FE は他の FE と比較して電気ノイズが低くなることがわかっている。そのため、ITk には Differential FE を用いることが決定している。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。

^{*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。

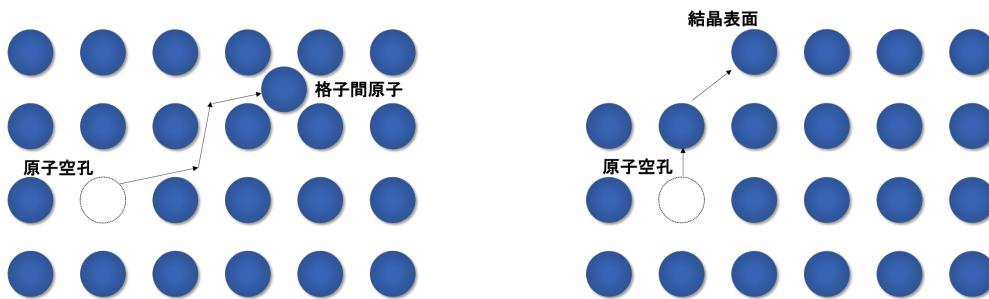


図 2.10 フレンケル欠陥(左図)とショットキ一欠陥(右図)。図中における青丸は原子核を表す。

1 2.3.1 バルク損傷

2 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
 3 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
 4 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
 5 る欠陥をショットキ一欠陥と呼ぶ。

6 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。
 7 これにより、検出器に以下のような影響を及ぼす。

- 8 ● 暗電流の増加

9 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
 10 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
 11 する。

- 12 ● バルクの型変換と全空乏化電圧の増加

13 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
 14 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
 15 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
 16 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
 17 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 2.11 に示す。

18 2.3.2 表面損傷

19 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
 20 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
 21 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
 22 比べて非常に小さいため、捕獲できなかった電子は読み出し電極に収集される。この正孔が Si-SiO₂ 界面
 23 に集まり、正の電場を作ることにより、この電場に電子が引きつけられて電荷収集効率が低下する。

24 表面損傷とトータルドーズ効果

25 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
 26 式図を図 2.12 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

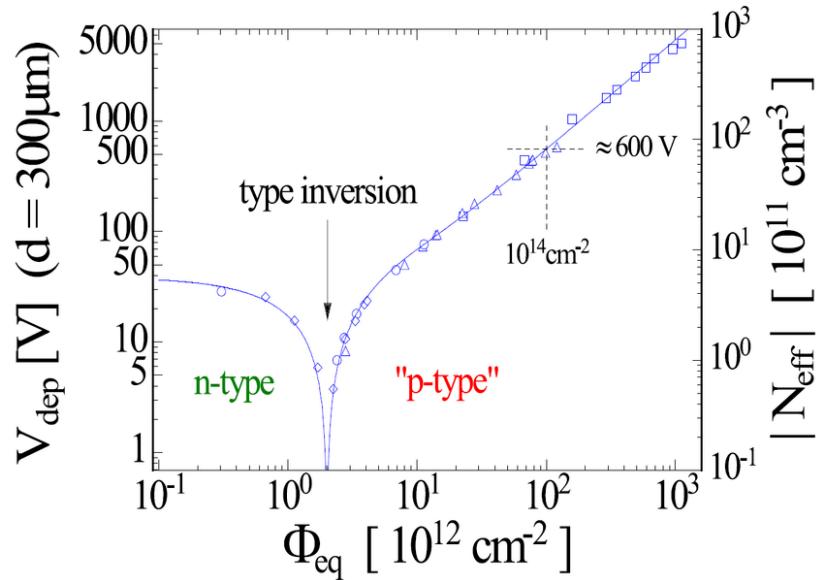


図 2.11 n 型シリコン検出器を用いた放射線損傷による型変換および全空乏化電圧の測定結果 [24]。

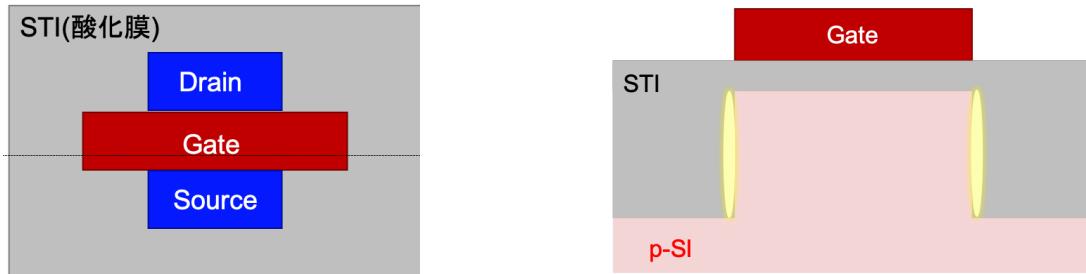


図 2.12 MOS ランジスタの模式図。左図の点線部の断面図が右図に相当する。

とドレイン間に電流が流れる仕組みになっている。MOS 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 2.12 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 2.13 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、 $\text{Si}-\text{SiO}_2$ 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 2.14 にトータルドーズ効果と 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 ($TID \gtrsim 1$ [Mrad]) と、正孔付近にも電子が捕獲されるようになり、 $\text{Si}-\text{SiO}_2$ 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、放射量が増えると Threshold は小さく

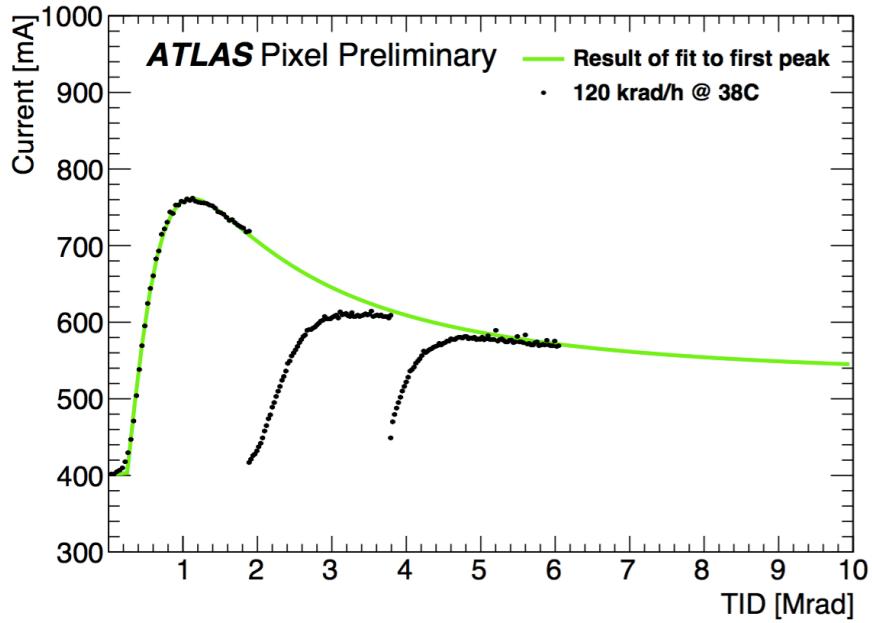


図 2.13 トータルドーズ効果と FE チップ電流の関係 [26]。FE チップの周囲温度 38°C および単位時間あたりの放射線量 120 krad での測定結果である。緑線は最初のピークに対するフィッティング結果である。また、各ピークが最大になった後、FE チップを数時間アニールする事により、部分的に放射線損傷が回復していることがわかる。

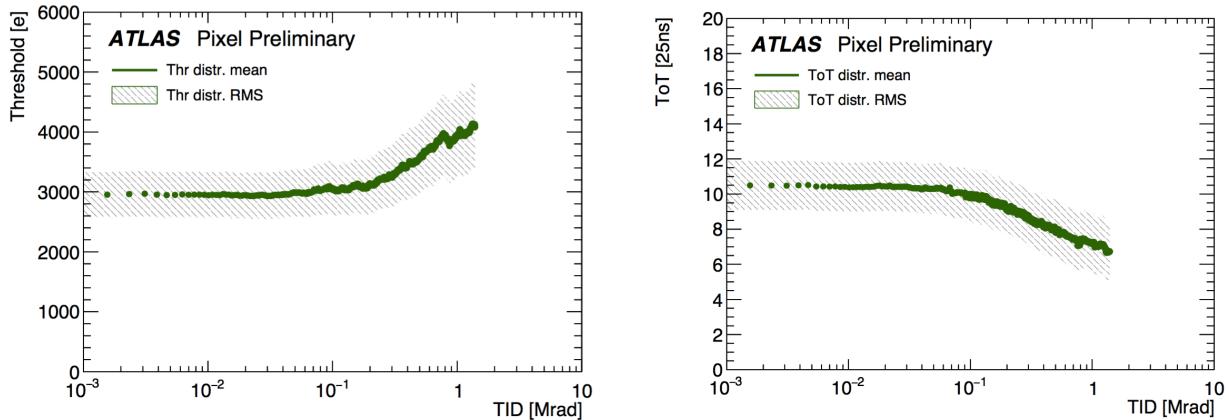


図 2.14 トータルドーズ効果と Threshold および ToT の関係 [26]。測定環境は、FE チップの周囲温度 5°C および単位時間あたりの放射線量 10 krad であり、これは 2016 年における IBL の運用状況と同程度である。

¹ なり、ToT は大きくなる。

1 第3章

2 現行ピクセルモジュールの電荷較正

3 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に較
 4 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
 5 較正手法について述べる。

6 3.1 アナログ回路

7 図 3.1 に FEI3 のアナログ回路の概略図を示す。センサーにおいて生成された電子を FE チップにおいて検知するために、バンプにより接合されている。内部電位によりバンプに向かってドリフトした電子を検出し、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 のようになり、この三角波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。

15 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
 16 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
 17 C_{low}, C_{high} が搭載されている。試験電荷生成のために、 $C_{low} = 8 \text{ fF}$ のキャパシタを用いる場合と、
 18 $C_{low} + C_{high} = 40 \text{ fF}$ の合成キャパシタを用いる場合がある。 $C_{low} + C_{high}$ の合成キャパシタを用いる
 19 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、
 20 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。

21 3.2 電荷較正手法

22 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
 23 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
 24 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
 25 する。

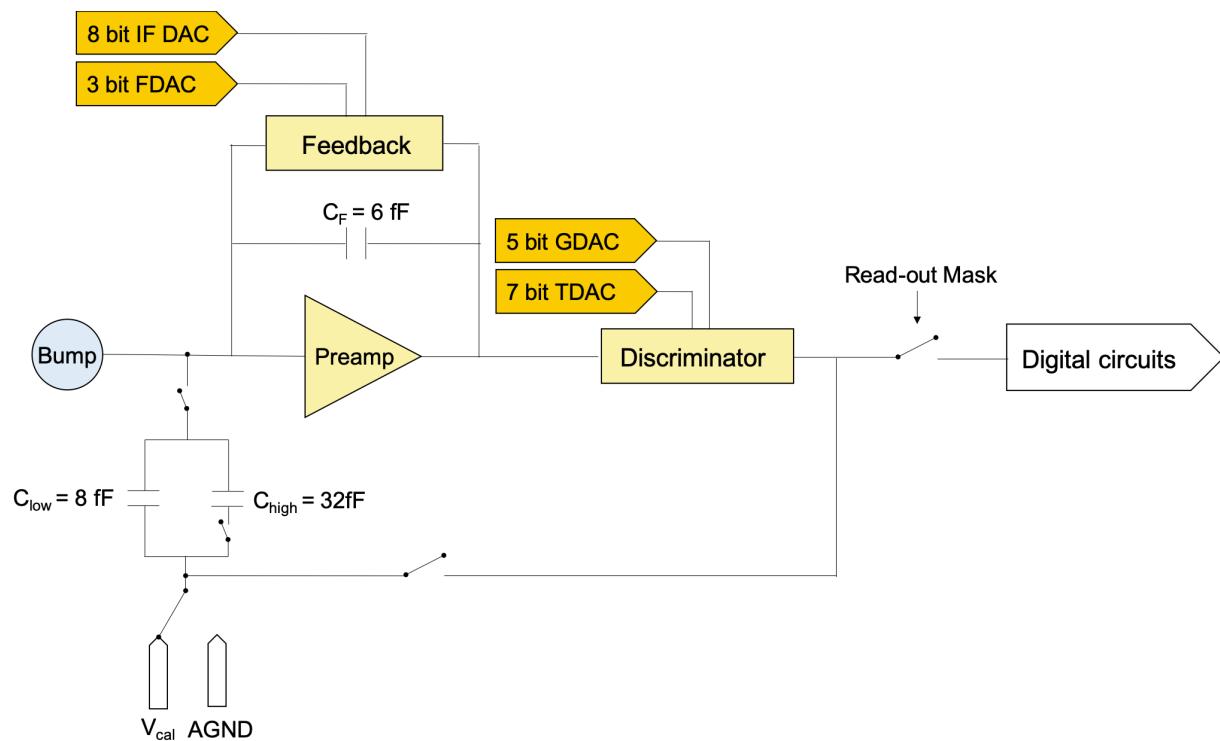


図 3.1 FEI3 アナログ回路の概略図。電荷較正や Threshold スキャンのための試験電荷は V_{cal} とキャパシタ (C_{low} , C_{high}) の組み合わせによって生成される。

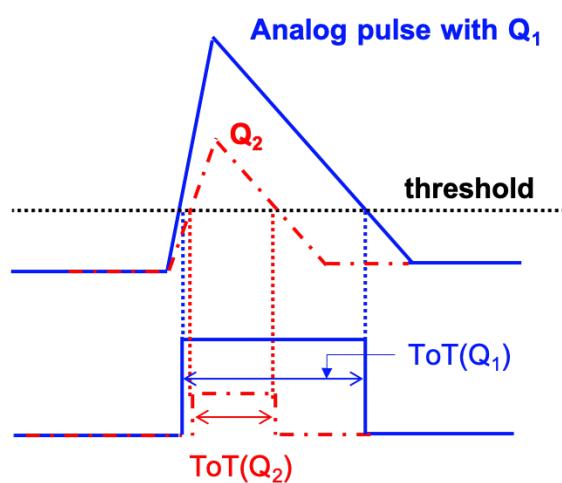


図 3.2 ToT と荷電粒子がシリコンセンサーに落とす電荷量 Q の概念図。図中の青線と赤線はある電荷量 ($Q_1 > Q_2$) が ToT に変換される概念図である。図中上半分の三角波はアナログ回路のフィードバック回路にて整形・増幅された信号であり、その信号が Threshold 値を超える時間である ToT に変換される。三角波立ち上がりはピークまでに約 40 ns になるよう調整されるため電荷量により傾きが異なるが、立ち下がりはフィードバック回路によって制御されるため、電荷量に依存せず一定の傾きである。

表 3.1 各 Layer における Threshold の目標値。

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

表 3.2 各 Layer における ToT の目標値。表中における括弧は 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は、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 は 3500 e であり ToT のチューニングは 20 ke の電荷に対して 18 ToT、IBL の Threshold は 1500 e であり ToT のチューニングは 16 ke の電荷に対して 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(Global DAC) 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 チューニングを行い、図 3.1 における FDAC および 7 bit の TDAC (Trim DAC) の値を調整することにより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。

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 に示す様な分布を作成する。この分布は S 字を描くため、S

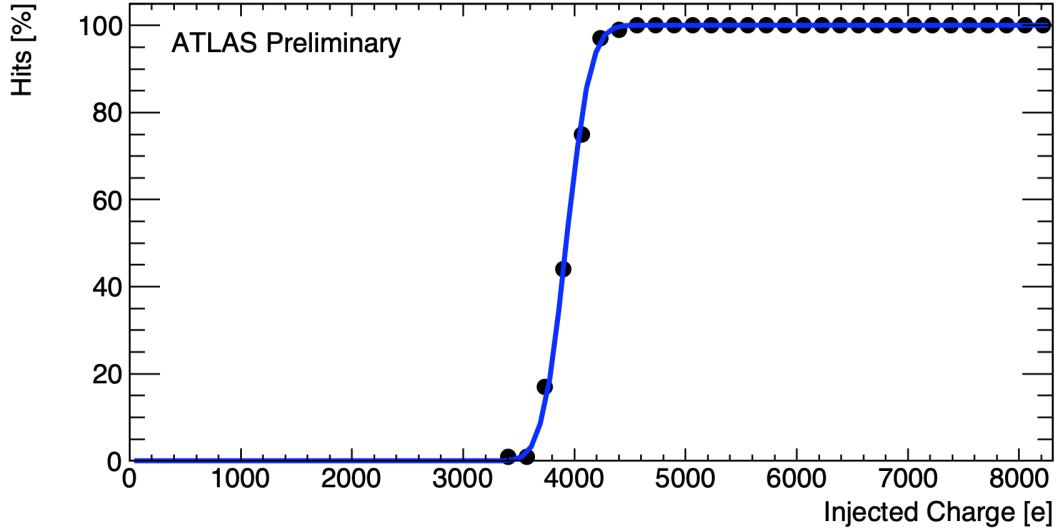


図 3.3 検出効率と試験電荷の関係 [29]。黒点はある試験電荷に対する応答率の測定点であり、青線は式 (3.1) によるフィッティング結果を表す。検出効率が 50% となる試験電荷の値が Threshold であり、検出効率が 16.5% と 83.5% となる試験電荷の幅がノイズである。

¹ 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
² を用いて定義される。

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

³ 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
⁴ 83.5% となる試験電荷の幅をノイズと定義する。

⁵ ToT スキャン

⁶ 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
⁷ 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
⁸ 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。

⁹ 3.2.2 電荷較正

¹⁰ 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
¹¹ 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、線形関係ではなくなっ
¹² 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
¹³ 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
¹⁴ 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
¹⁵ 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
¹⁶ 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
¹⁷ 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
¹⁸ は線形ではなくなると考えられる。

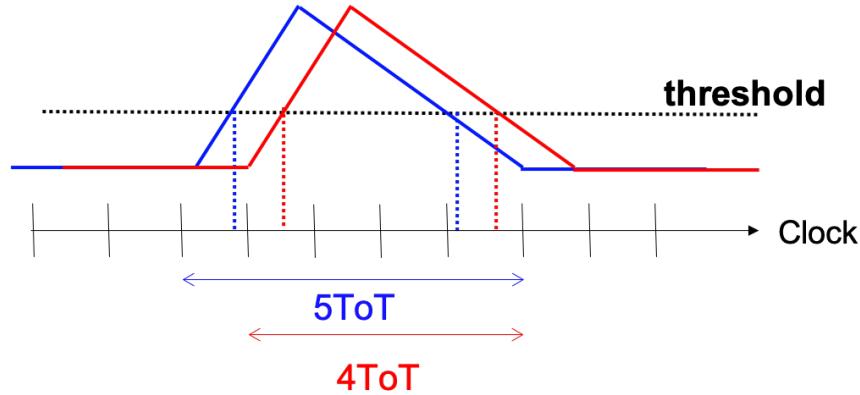


図 3.4 同じ電荷量のアナログ信号においてパルスの立ち上がり点をずらした際の ToT の変化の様子。タイムウォークの影響が大きくなる電荷量に対しては、小さい ToT を出力することが多くなる。

1 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。

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

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ピクセルごとの ToT の平均値を用いて FE チップに対する電荷較正を行う。
6 FEI4 を用いている IBL については ToT の出力が 4bit と少ないことから、Run3 からは式 (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持つ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 FEI3 を用いている現行のピクセル検出器の電荷較正のみについて述べる。

10 3.3 電荷較正結果の履歴

11 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
12 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
13 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
14 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。

15 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
16 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
17 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
18 は不感領域と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
19 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
20 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
21 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
22 一辺の長さが 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
23 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、ノイズ等の値が異なる値になるため、
24 データベースへはそれぞれの値をアップロードする。

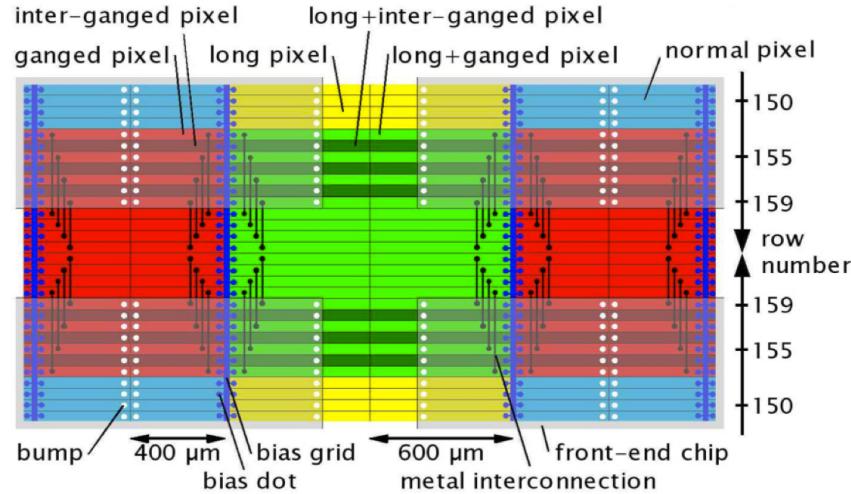


図 3.5 ピクセルモジュールの FE チップ境界付近のピクセルタイプ [37]。FE-I3 は 160×18 [行 × 列] のピクセルを持ち、 2×8 [行 × 列] の FE-I3 を並べて 1 つのピクセルモジュールを構成する。FE-I3 の 1 列目および 18 列目が long ピクセル、154, 156, 158, 160 列目が ganged ピクセルと定義される。2 つの ganged ピクセルの間には inter-ganged ピクセルというピクセルが存在するが、ノイズ等の特性は normal ピクセルと同等の値を持つ。

1 データベースに登録する情報を以下に示す。

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

1 第4章

2 電荷補正の最適化

3 Threshold 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
 4 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。ピクセルモジュールの電荷較正では
 5 正しく結果を出力しない場合があるため、電荷較正結果に適切な値を補完しデータベースにアップロード
 6 する必要がある。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
 7 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
 8 方法について説明する。

9 4.1 電荷較正における補正の概要

10 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
 11 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。

- 12 1. 不適当な電荷を使った電荷較正
 13 2. データの欠陥

14 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
 15 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
 16 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
 17 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
 18 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、
 19 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。

20 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
 21 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
 22 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がある。 V_{cal} は Plsr DAC と呼ばれる
 23 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。

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

24 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
 25 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
 26 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
 27 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}

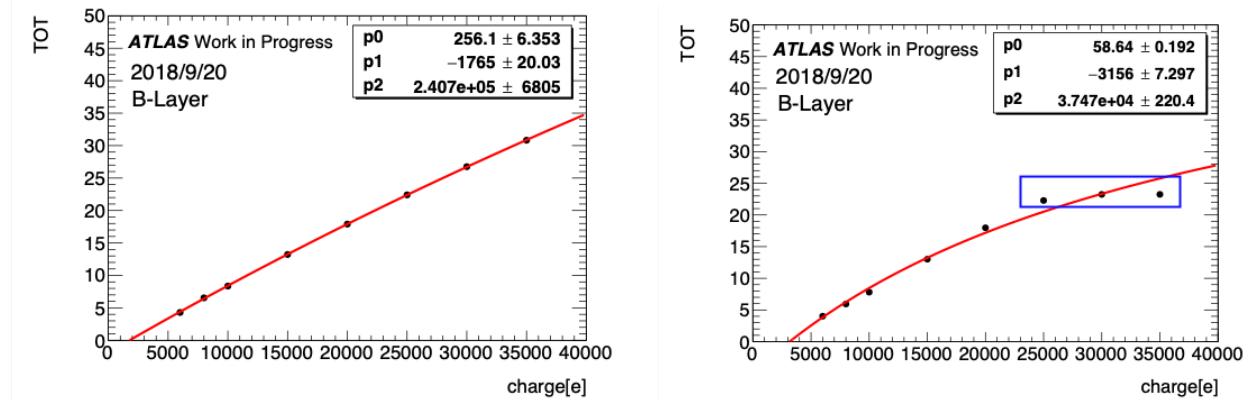


図 4.1 電荷較正式 (3.2) を用いてフィッティングした結果。左図は理想的なフィッティング結果を表しておらず、右図は正しい ToT が得られていない点を含むフィッティング結果である。

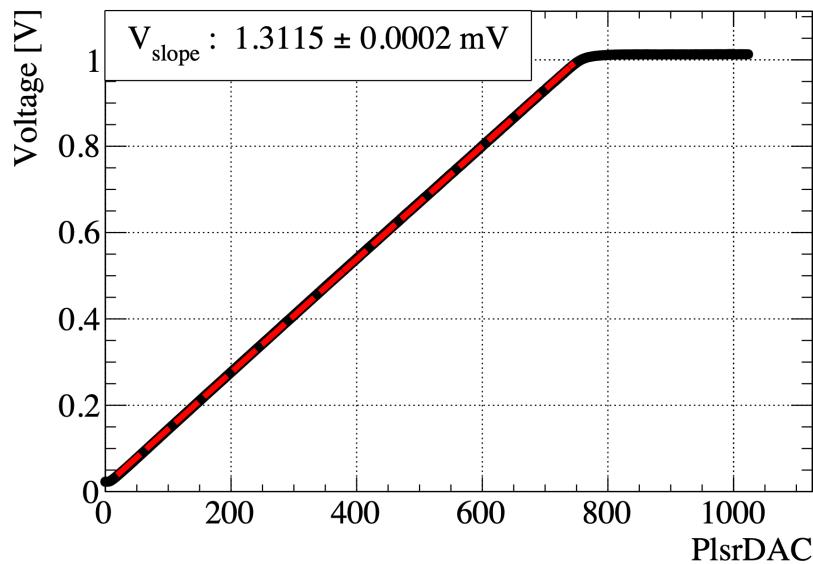


図 4.2 V_{cal} と Plsr DAC の関係の測定結果 [35]。黒点は各 Plsr DAC に対する V_{cal} の測定点を表し、赤線は式 (4.1) を用いたフィッティング結果である。図中における V_{slope} は赤線の傾きであり、式 (4.1) における b に対応する。

- 1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、
 2 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。
 3 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} の値が大きいときに
 4 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
 5 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
 6 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、
 7 再較正を行う必要がある。
 8 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陥してし
 9 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
 10 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。
 11 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
 12 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

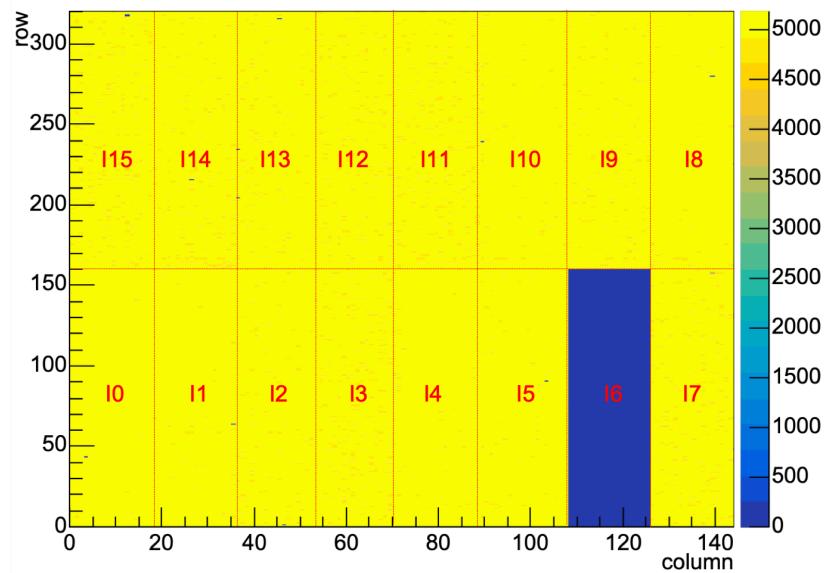


図 4.3 欠陥が含まれるピクセルモジュールについての Threshold 分布。赤色の点線は 2×8 [行 × 列] 上に配置された FE-I3 の境界部分を表す。この図のように、Threshold スキャンや ToT スキャンの結果はモジュールごとに出力され、行と列の領域を指定することにより FE チップの識別を行うことができる。

- 1 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陥している場合には、
- 2 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
- 3 部の結果が欠陥し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。
- 4 図 4.3 のようにあるモジュール上的一部の FE チップみにデータの欠陥が見つかった場合は、最も近い
- 5 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
- 6 う。一方で、あるモジュールについて全ての FE チップの結果が欠陥している場合は、直前に行われた電
- 7 荷較正結果をコピーすることにより補完を行う。

4.1.1 これまで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 2.13 参照) を受けることによるものである。放射線損傷が小さい場合 ($TID \leq 1$ [Mrad])、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、放射線損傷が大きい場合 ($TID \geq 1$ [Mrad])、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り、位置分解能が悪くなる。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 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。

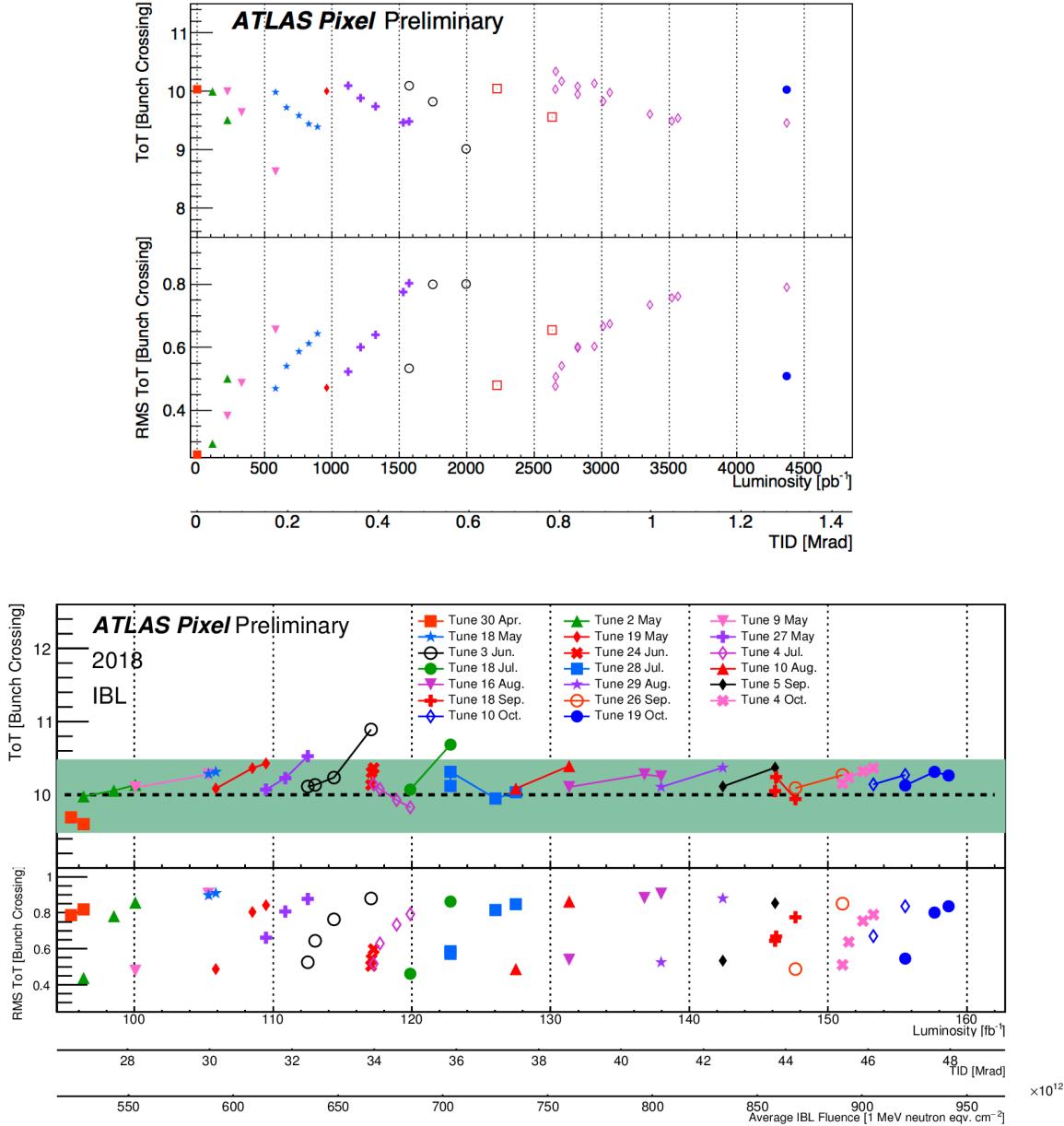


図 4.4 IBL のルミノシティに対する ToT の変化。各マーカーの左端は電荷較正直後の ToT スキャン結果であり、電荷較正を行う事により放射線損傷によるずれが補正されている様子がわかる。上図は 2015 年における ToT の変化 [33] であり、左端は Run2 開始時を表す。下図は 2018 年における ToT の変化 [34] で右端は Run2 の最後を表す。IBL の ToT の目標値は 16 ke の電荷量に対して 10 ToT であるが、トータルドーズ効果の影響を受け目標値からずれてしまう。

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に労力が伴う。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。

1 4.2 電荷較正の補正

2 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
 3 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
 4 は式 (4.2) を用いて電荷較正結果の評価を行っていた。

$$5 \Delta d = \sum_{i=1}^N \frac{ToT_{true,i} - ToT_{fit,i}}{N} \quad (4.2)$$

6 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
 7 使用された試験電荷のについての i 番目の ToT、電荷較正式によるフィッティングから得られる i 番目
 8 の ToT である。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
 9 とし、そのフィッティング結果を取り出して補正を行っており、2018 年 9 月における電荷較正では、約
 10 250 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。

11 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。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。

14 4.2.1 電荷較正結果の評価方法

15 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。

16 試験電荷とフィット結果から得られる電荷の差が、試験電荷の 5% 以上であれば問題のある試験電
 17 荷とみなす

18 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。
 19 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
 20 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%
 21 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が図 4.5 におけるラ
 22 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。

23 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
 24 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
 25 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
 26 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
 27 荷再較正の処理方法について説明する。

28 4.2.2 電荷再較正の自動化アルゴリズム

29 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
 30 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
 31 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
 32 ツールの処理の流れを図 4.7 に示す。

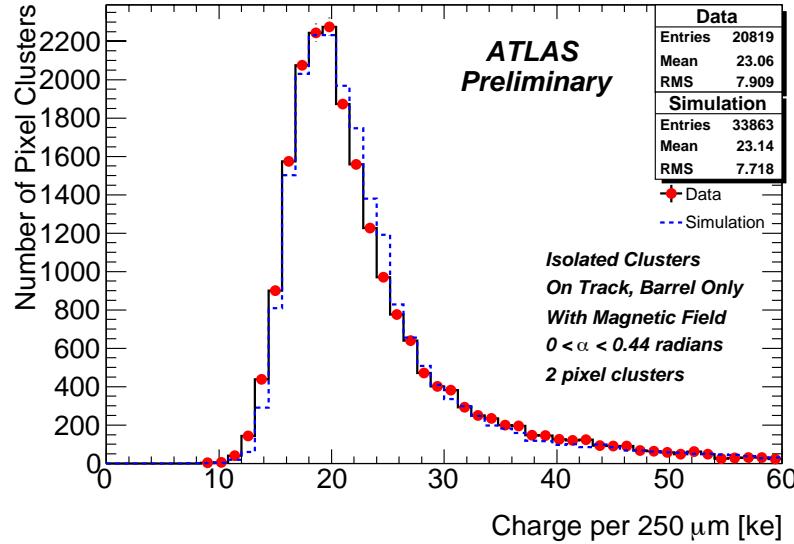


図 4.5 ピクセル検出器の 250 μm あたりのピクセル検出器に MIP 粒子が落とす電荷量。現行ピクセル検出器におけるセンサーの厚みは 250 μm のため、MIP 粒子が落とす電荷量に相当する。クラスターは normal ピクセルのみからつくられるものであり、ピクセルの短方向 ($50 \times 400 \mu\text{m}^2$ [行 × 列] の 50 μm の方向) に 2 つピクセルから構成されるクラスターのみのデータである。

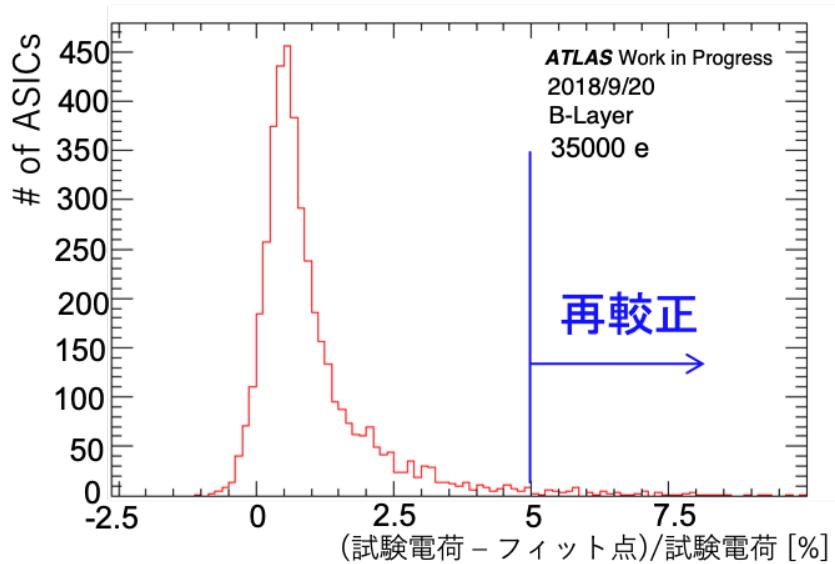


図 4.6 B-Layer の全 FE チップについて計算した試験電荷と電荷較正結果から得られる電荷の差の分布。

- 1 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が 0.5% 以内に収束するまで
- 2 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
- 3 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。この右
- 4 図より、問題があると考えられる 30000 e および 35000 e の試験電荷を取り除き、正しい電荷再較正結果
- 5 が得られる。

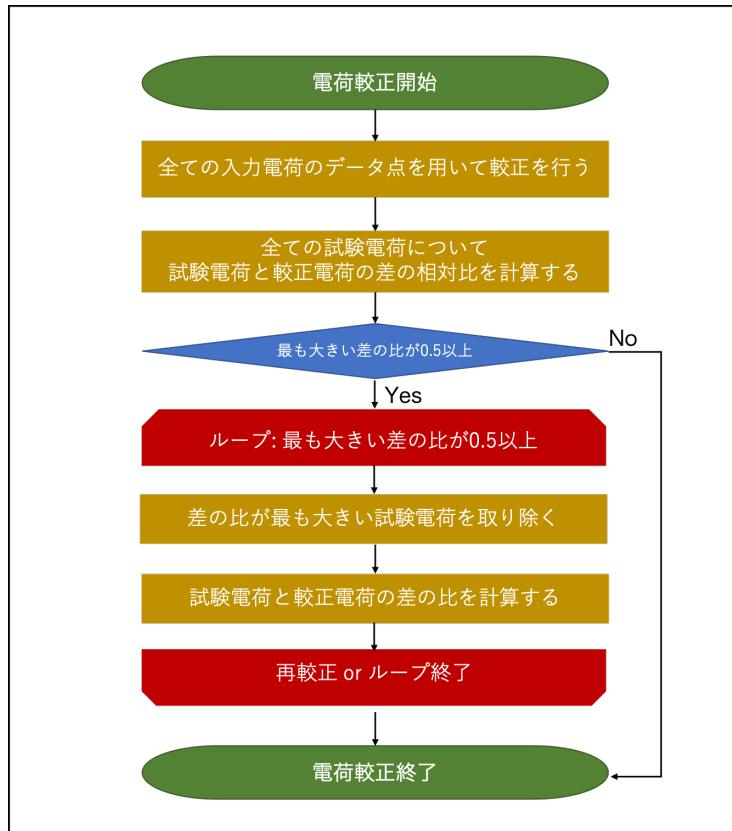


図 4.7 電荷較正結果を再較正するツールの処理の流れ。

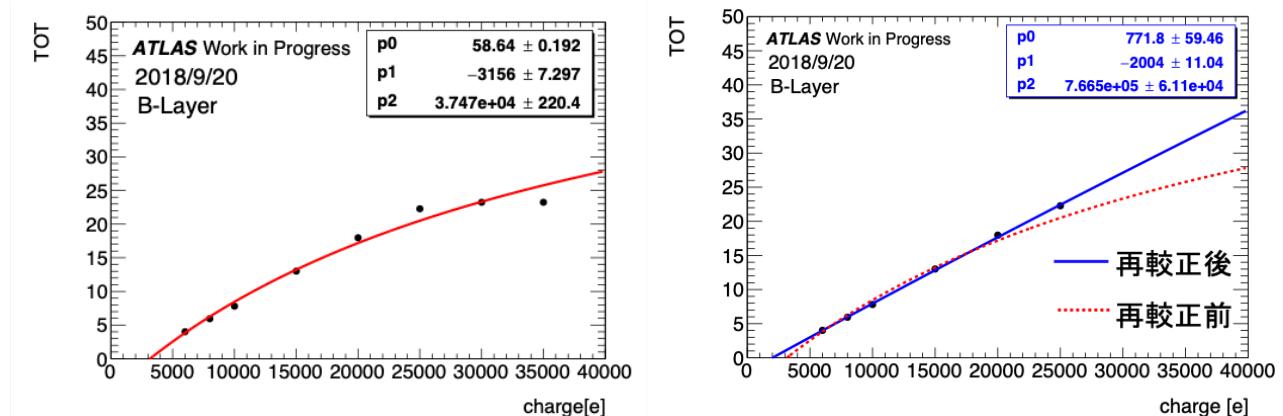


図 4.8 電荷再較正前（左図）と後（右図）のフィッティング結果。

4.3 データに欠陥が含まれる場合の補完

これまでにはピクセルモジュール内の一FEチップが欠陥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、ピクセル検出器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つた。より適切な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。

- 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）

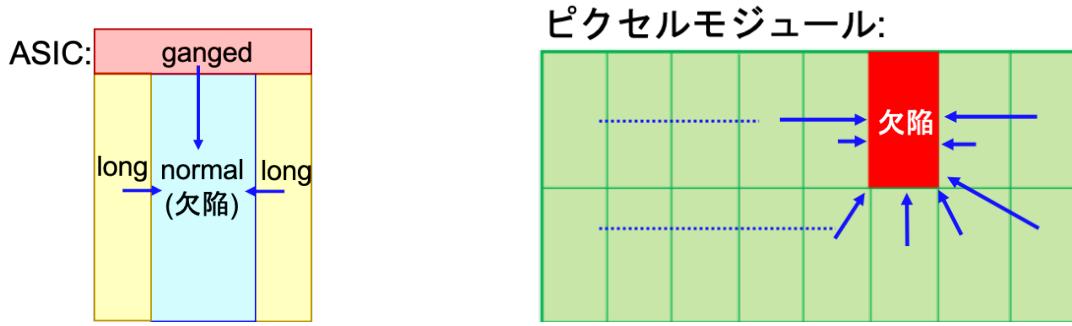


図 4.9 データ欠陥の補完方法についての概念図。左図はある FE チップにおいて、normal ピクセルの値が欠陥している場合に、long および ganged ピクセルから補完することを示す。右図は欠陥の補完のために、異なる FE チップにある値を用いて補完することを示す。

- 1 2. 欠陥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)
- 2 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。

3 4.3.1 評価方法

4 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つが欠陥していると仮定し、そのパラ
5 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
6 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
7 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。

8 4.3.2 評価結果と考察

9 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
10 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
11 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
12 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
13 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
14 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
15 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。

16 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、
17 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
18 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
19 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
20 は長方形の一片の長さが 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
21 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 ピクセルのノ
22 イズは normal ピクセルよりもノイズが大きくなる。

23 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
24 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。

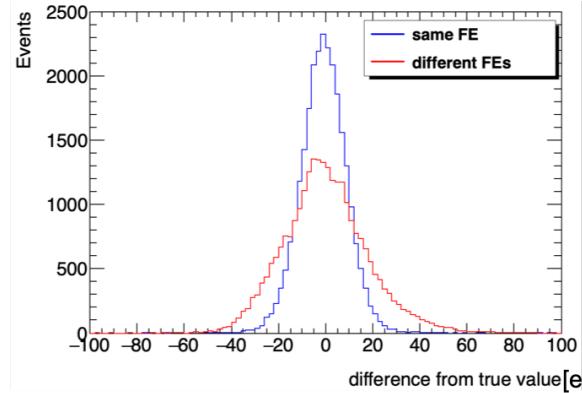


図 4.10 Threshold の評価結果。同一 FE チップにおける平均値の分布(青色)は、異なる FE チップの値の平均値の分布(赤色)よりのピークが鋭くなっている。

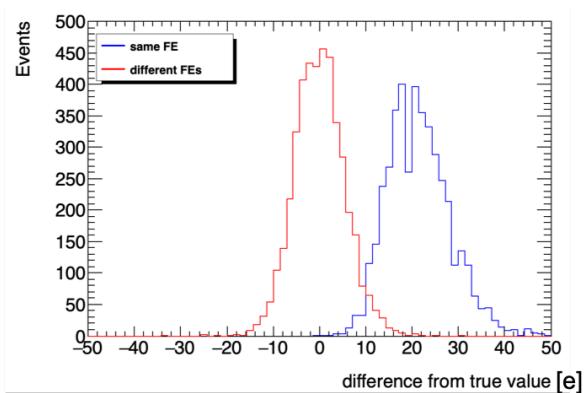


図 4.11 Threshold のノイズの評価結果。同一 FE チップの平均値の分布(青色)は、ピーカーの中心値がゼロからずれている。

4.3.3 欠陥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。欠陥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陥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陥の補完を行った後にどの様に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

1 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様にした。

Code 4.1 解析ツールにより出力される補完結果のまとめ。

```
2
3 1 #####=====
4 2 ## This file shows the way to recover data loss and calibration failure.
5 3 ##
6 4 ## How to recover parameters:
7 5 ## 1. If there is a data loss in output data:
8 6 ## - Case1: Partial loss in a module
9 7 ## - Threshold: Recover using average of same FE
10 8 ## - Others: Recover using average of different FEs
11 9 ## - Case2: All values loss in a module
12 10 ## - Previous scan result is used for the recovery
13 11 ##
14 12 ## 2. If there is a calibration failure:
15 13 ## - Remove incorrect injected charge & refitting
16 14 ## - Removed charges are listed in order of deletion
17 15 ##
18 16 ## Example of an output for a module:
19 17 ## L0_B08_S1_A6_M2A:
20 18 ## I2: [ normal threshold ], [ ] <--- Parameters that become '0' is listed
21 19 ## I8: [ ], [ 30000 40000 ] <----- Injected charges that removed is listed
22 20 ##
23 21 ####=====
24 22
25 23 ~~~~~ Summary for the recovery ~~~~~
26 24 1. Number of parameters that were 0
27 25 Number of FEs with all values zero: 11
28 26 normal threshold: 11
29 27 normal noise: 11
30 28 normal sigma: 11
31 29 normal intime: 27
32 30 fit_normal A: 11
33 31 fit_normal E: 11
34 32 fit_normal C: 11
35 33 quality/unused unused: 11
36 34 quality/unused fit_quality: 11
37 35
38 36 2. Number of FEs that had bad fits
39 37 B-Layer: 0
40 38 Layer1: 0
41 39 Layer2: 0
42 40 Disk: 5
43 41
44 42 3. Number of modules that were not scanned
45 43 B-Layer: 286
46 44 Layer1: 494
```

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 ($> 5000 \text{ e}$) 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
欠陥していた 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

```

1   45 Layer2: 676
2   46 Disk: 6
3   47 ~~~~~
4   48
5   49 D1A_B01_S1_M1:
6   50 IO [ normal threshold ], [ ]
7   51 D1A_B01_S1_M2:
8   52 D1A_B01_S1_M3:
9   53 I8: [ ], [ 30000, 40000 ]
10

```

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、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める。

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陥を取り除き、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。右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。

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

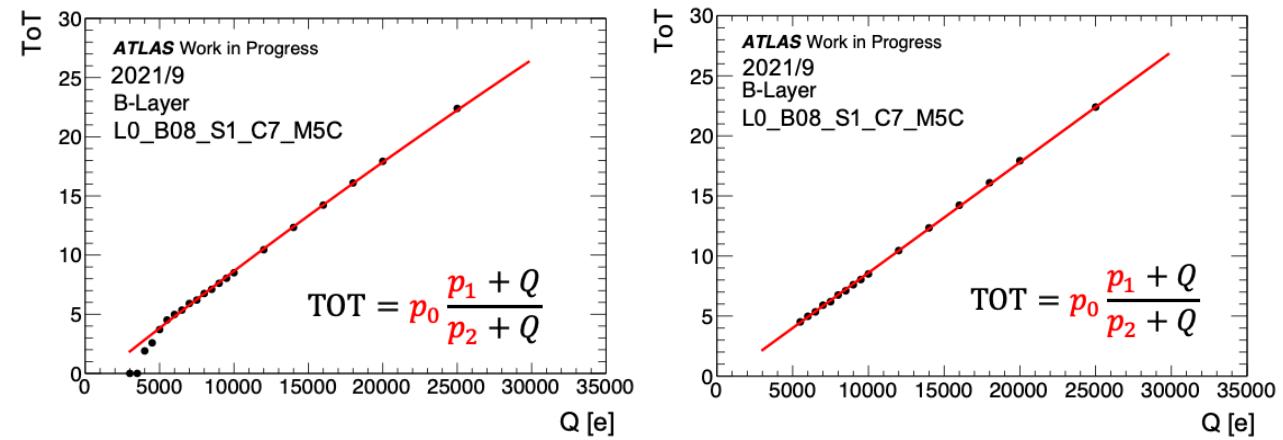


図 4.12 2021 年 9 月に行われた B-Layer についての電荷再較正結果。左図は再較正前のフィット結果であり、右図は基準を満たさない点を取り除き再較正を行った後の結果である。

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)

1 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
2 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
3 考えられる。

4 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
5 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
6 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
7 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
8 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
9 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
10 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
11 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
12 果のまとめが表 4.1 である。

13 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、
14 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
15 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 小さくなっ
16 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
17 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
18 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

- 1 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
2 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
3 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
4 くなると考えられる。

5 4.5.3 小さい ToT に対する電荷較正

6 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
7 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
8 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
9 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
10 で説明する。

11 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
12 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
13 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 となっているため、
14 ToT ≥ 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
15 に影響を与えるのは ToT = 4 のみである。

16 ToT = 4 における電荷較正を評価するために、B-Layer の全 FE チップについて電荷較正に用いた
17 データから $3.5 < \text{ToT} < 4.5$ 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
18 比を計算した。その結果を図 4.13 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
19 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 4.14 のように電荷較正結果の
20 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
21 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 4.13 において、データの電荷量と電荷較
22 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 4.14 の右図は、電荷較正結果が
23 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)
24 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
25 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。

26 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
27 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
28 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
29 ことに決定した。

- 30 • MIP 粒子に対する影響が大きくなないと予想される

31 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
32 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
33 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
34 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%
35 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
36 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
37 正をしなくても、クラスターに対する影響は小さいと予想される。

- 38 • データベースを圧迫する

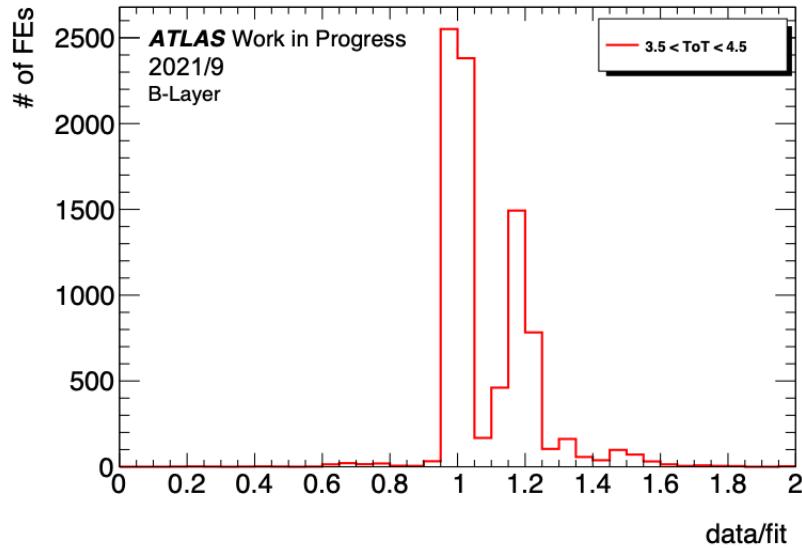


図 4.13 $\text{ToT} = 4$ における電荷較正の評価結果。横軸はデータの電荷量と電荷較正式 (3.2) から得られる電荷量の比を表し、縦軸は FE チップの数を表す。

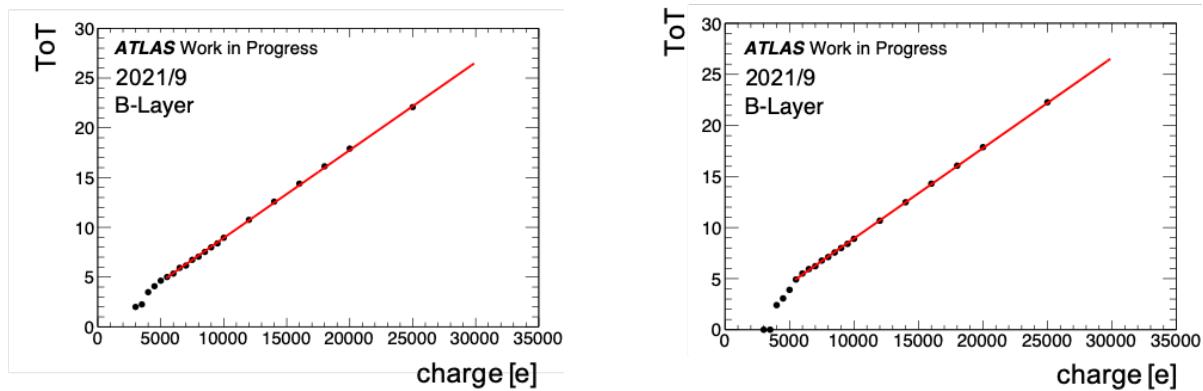


図 4.14 B-Layer の電荷較正結果における 2 つの異なる構造。左図は電荷較正結果が $\text{ToT} = 4$ までデータ点を正しく再現できるものであり、右図は $\text{ToT} = 5$ までデータ点を正しく再現できるものである。

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。

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ることである。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

1 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陥である。これまでの
2 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
3 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
4 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
5 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
6 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
7 の欠陥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2021年9月に行われた
8 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
9 成を行った。

10 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
11 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
12 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
13 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
14 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なるとデータベースを圧迫してしまうこ
15 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。

1 第5章

2 次世代ピクセルモジュールの量産

3 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
 4 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、
 5 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
 6 器を用いたデモンストレーションが行われている。

7 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
 8 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
 9 管理するシステムの開発が必要となる。

10 5.1 次世代ピクセルモジュールの組み立て部品

11 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。

13 5.1.1 ベアモジュール

14 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。クアッドモジュールではセンサー 1 枚に対して FE チップ 4 枚、トリプレットモジュールではセンサー 1 枚に対して FE チップ 1 枚から構成される。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。

18 5.1.2 フレキシブル基板

19 フレキシブル基板はセンサーの裏側に接着、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
 20 る。フレキシブル基板の全体図を図 5.1 に示す。フレキシブル基板は、以下の 3 つの役割を持つ。

- 21 • FE チップからの信号輸送

22 センサーから得られた信号は FE チップで増幅・整形され、フレキシブル基板に送られてくる。フレキ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。

- 24 • 電源の供給

25 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
 26 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、

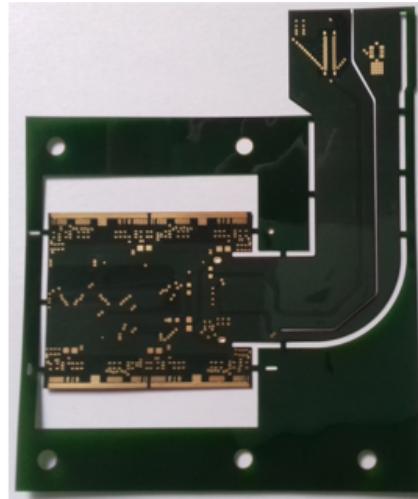


図 5.1 フレキシブル基板の全体図 [12]。

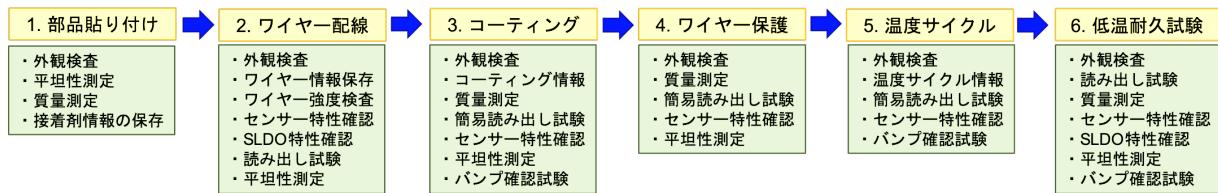


図 5.2 ピクセルモジュールの組み立て工程。

1 電源供給のために 5.6 V 程度の LV(Low Voltage) を印加する。

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

3 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
4 いる。

5 5.1.3 モジュールキャリア

6 モジュールキャリアはモジュールの運搬の際や品質試験を行う際に、モジュールを保護用の容器である。組み立てられたモジュールは 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

9 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。

10 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

12 置^{*1}を用いて最低 -55°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

13 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

14 セルモジュールへの結露を防いでいる。

1 5.2 次世代ピクセルモジュールの組み立て工程

2 次世代ピクセルモジュールの組み立て工程を図 5.2 に示す。組み立て工程ではフレキシブル基板とペア
3 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
4 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
5 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、
6 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。

7 ベアモジュール・フレキシブル基板の接合

8 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
9 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
10 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 $\pm 50 \mu\text{m}$ 、平面度は
11 $25 \mu\text{m}$ の精度で接合を行うことができる。

12 ワイヤー配線

13 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
14 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。
15 ワイヤーは直径 $25 \mu\text{m}$ 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
16 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
17 読み出し試験を行い正常に動作するかの確認を行う。

18 パリレンコーティング

19 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
20 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
21 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
22 への耐性も併せ持つ。

23 ワイヤー保護

24 ワイヤーは直径 $25 \mu\text{m}$ 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
25 る際、モジュールとワイヤーの距離は 2 mm 程度のため、モジュールのケーブルがワイヤーに触れてしま
26 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 5.3 に示すような構造体
27 を用いて、ワイヤーを保護する。

28 温度サイクル

29 組み立てたモジュールに対して、ITk 実装後にされる特異的な温度変化のサイクルを行い、その後もモ
30 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
31 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
32 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。

*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。

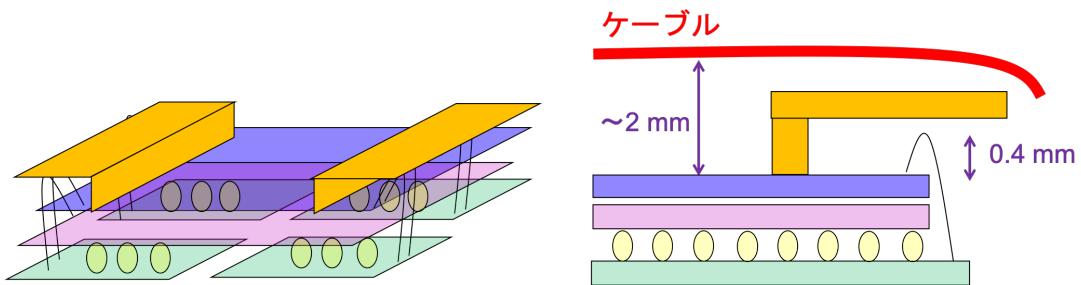


図 5.3 ワイヤー保護用の構造体。左図はワイヤー保護用の構造体を付けたモジュール全体の模式図、右図はモジュール側面から見た断面図を表す。炭素系の素材である CFRP を用いて構造体を作成する。図中において、緑色は FE チップ、黄色はバンプ、桃色はセンサー、紫色はフレキシブル基板、橙色はワイヤー保護用の構造体を表す。

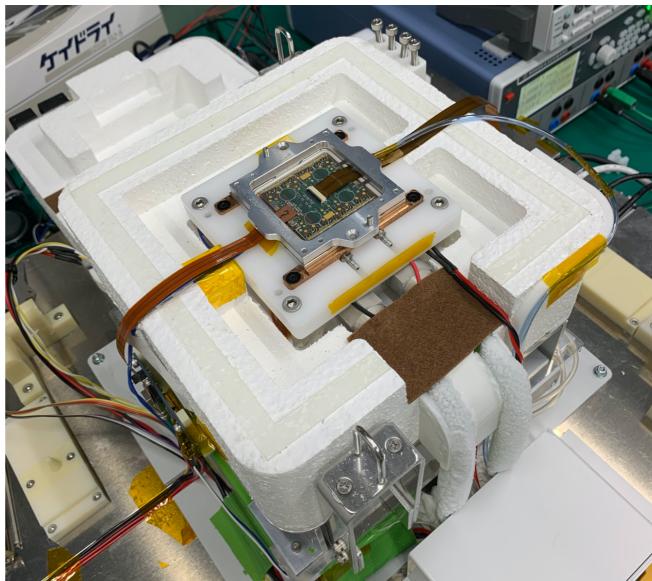


図 5.4 読み出し試験のセットアップ。この図は、温度制御筐体の蓋を開けた状態であり、測定時には蓋を閉めてモジュールの周囲を密閉し測定を行う。銀色のフレームがモジュールキャリアであり、その中にモジュールが設置されている。

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。量産における品質試験では、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ないといえられるが、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。モジュールの周囲温度を変える際には、恒温槽を用いて行う予定である。

低温耐久試験

常温において 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、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

1 の遠隔監視等の技術が必要となる。

2 5.3 品質試験

3 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
4 う。図 5.2 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
5 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。

6 5.3.1 外観検査

7 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
8 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
9 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
10 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
11 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
12 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。

13 5.3.2 平坦性測定

14 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。
15 これにより、接着時のずれや接着剤の厚みに問題やモジュール輸送時にモジュールへの損傷等を確
16 認することができる。

17 5.3.3 質量測定

18 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
19 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。

20 5.3.4 ワイヤー強度検査

21 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
22 与える。

23 5.3.5 センサー IV 特性

24 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
25 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 μA、降伏電圧が
26 120 V、3D センサーについては漏れ電流が 25 V で 2 μA、降伏電圧が 35 V 程度となるのが想定されう
27 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
28 切った状態で行われる。

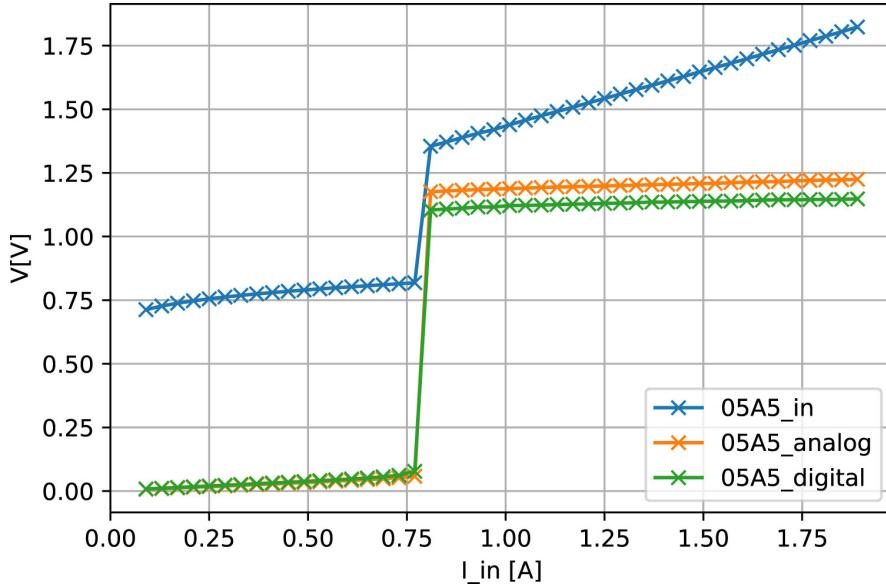


図 5.5 FE チップへの電流と、入力電圧 V_{in} 、アナログ回路の出力電圧 V_{analog} およびデジタル回路の出力電圧 $V_{digital}$ の関係 [40]。

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

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 5.5 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ー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。

1 5.3.7 読み出し試験

2 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
3 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
4 同様に図 5.4 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
5 -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
6 常の読み出し試験では $-20^{\circ}\text{C}, 20^{\circ}\text{C}$ である。

7 読み出し試験に用いる DAQ(Data Acquisition) として、YARR(Yet Another Rapid Readout) を
8 用いる。YARR とは FE チップ読み出しそうに開発されている。YARR を用いて行う、モジュールの読
9 み出し試験の項目を以下に示す。

10 • Digital スキャン

11 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
12 応答数を測定する。

13 • Analog スキャン

14 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
15 応答数を測定する。

16 • Threshold スキャン

17 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
18 ける Threshold スキャンと同様の手法) をを行い、Threshold 値やノイズを測定する。

19 • ToT スキャン

20 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。

21 • Noise スキャン

22 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測定を行い、応答
23 率を求める。

24 • Source スキャン

25 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
26 接続の不具合等も確認することができる。

27 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。

28 • Global threshold tuning

29 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。

30 • Pixel threshold tuning

31 各ピクセル毎に Threshold 値チューニングする。

32 • Global ToT tuning

33 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。

34 • Pixel ToT tuning

35 各ピクセル毎に ToT 値をチューニングする。

表 5.2 ピクセル解析の評価基準一覧 [38]

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-curve fit failed
	ToT Test	ToT response is 0 or 14 BCs
Noisy	Noise Scan	Occupancy < 10^{-6} hits per BC
Disconnected Bump	Source Scan	Occupancy < 1% of mean Occupancy
High Crosstalk	Crosstalk Scan	Occupancy > 0 with 25 ke injection

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

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 μm と 300 μm 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 μA の電流を生成する。Iref の値はワイヤー配線の際に 4bit の値で決められる。ワイヤー配線と Iref 値の関係を図 5.6 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か確認する。

*2 D/A コンバーターとも呼ぶ。

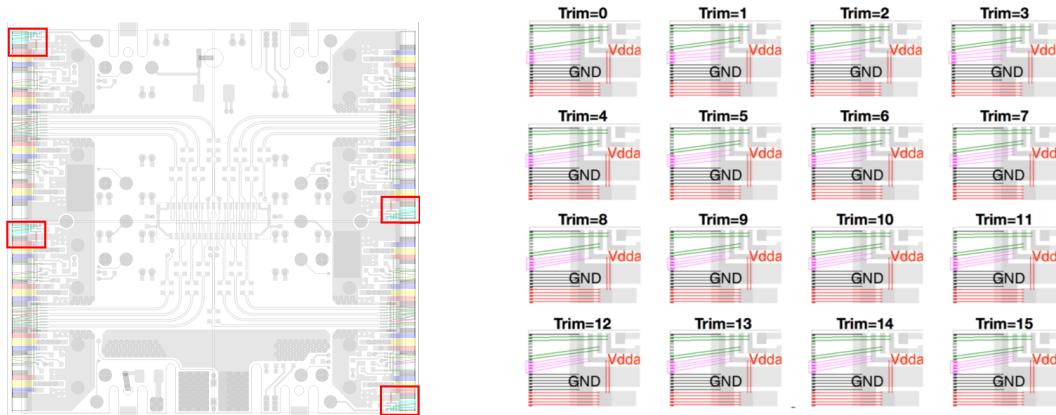


図 5.6 クアッドモジュールの Iref Irim 部分を表す部分(左図)とワイヤーの配線と Iref 値の関係(右図)[38]。ピンク色のワイヤーの配置により 4bit の Iref 値を表すことができる。

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

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き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。その場合は、ベアモジュールとフレックス基板の向きについての特性を書き直す必要がある。

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品質試験を行い合計 30 個程度の試験を行い、さらにワイヤー配線をした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 30 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ような問題が想定される。

1 ● データの不整合

2 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
3 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
4 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
5 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
6 だけ整形しなければならないため非常に面倒である。

7 ● データの重複

8 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
9 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
10 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
11 ある。

12 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
13 として、データベースシステムの開発を行っている。このシステムについて、次章において説明する。

1 第6章

2 モジュール量産におけるデータベースシ 3 ステム

4 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
5 テムを開発している。

6 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。

7 6.1 量産に用いるデータベースの概要

8 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
9 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
10 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。

11 6.1.1 中央データベース

12 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
13 データを管理することを目的として開発されている。ユニコーン大学が中心に開発を行っており、チェコ
14 にデータベースサーバーが設置されている。



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。

1 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
2 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、
3 ある品質管理試験における良い結果を一つのみを保存しておく。

4 中央データベースに保存されたデータは、ITk に配置するピクセルモジュールの選別に用いられる。 $|\eta|$
5 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
6 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
7 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
8 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
9 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
10 定である。

11 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これらの値を用いる。運転前後の
12 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
13 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
14 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。

15 6.1.2 ローカルデータベース

16 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
17 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
18 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。

19 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
20 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
21 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、
22 $\mathcal{O}(10000)$ 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、
23 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
24 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。

- 25 • 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。
- 26 • 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。
- 27 • 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。

28 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
29 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。

30 6.2 ローカルデータベースの構造

31 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
32 ておくためのデータベースである MongoDB 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
33 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
34 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
35 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
36 とウェブアプリケーションについて説明する。

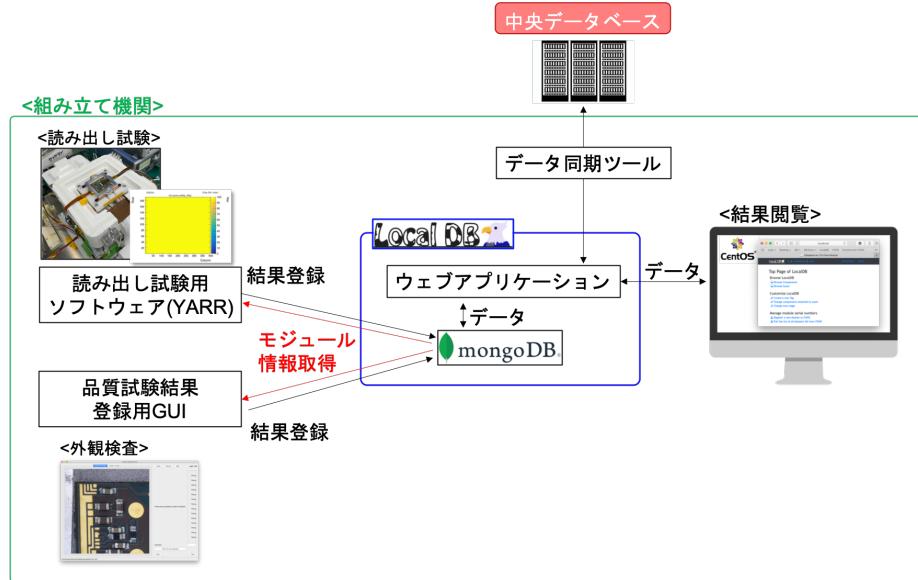


図 6.2 ローカルデータベースの全体像。ローカルデータベースは MongoDB とウェブアプリケーションから構成され、品質試験結果を管理するための複合的な機能を持つ。

6.2.1 MongoDB[41]

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^{*1}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、データベースが構造化し、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

```

17
18 1 {
19 2   {
20 3     "_id": ObjectId("6038c960b9a87924947df638"),
21 4     "year": 2015,

```

*1 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。

```
1      5     "title": "The_Big_New_Movie",
2      6     "info": {
3      7       "plot": "Nothing_happens_at_all.",
4      8       "rating": 0
5      9     }
6     10   }
7     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 で書き、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

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

- ¹ 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。

³ 6.3 モジュールの品質試験に必要な開発項目

- ⁴ 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
⁵ 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。

⁶ 1. データベース構造の設計

⁷ 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
⁸ 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 [3, 4] によって定義され、非読
⁹ み出し試験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 [2] を
¹⁰ 行った奥山氏と私が開発を行った。

¹¹ 2. 試験結果管理機能

¹² 2-1. 読み出し試験

¹³ 読み出し試験の結果の閲覧および解析機能は先行研究 [2, 3] によって開発が行われた。読み出
¹⁴ 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
¹⁵ 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
¹⁶ 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
¹⁷ ついて 7.1 に示す。

LocalDB Structure

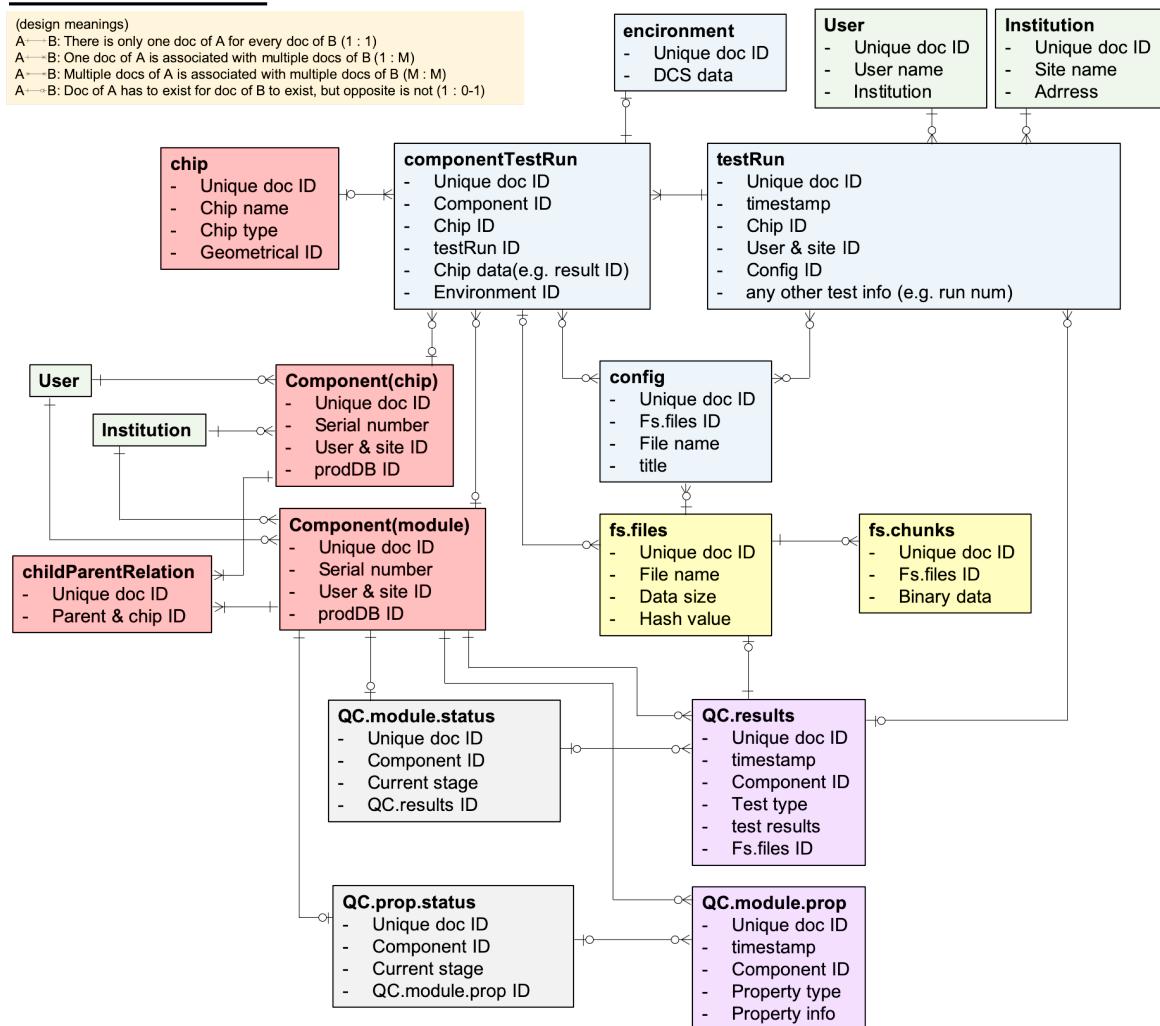


図 6.3 ローカルデータベースの構造。それぞれの四角はコレクションを表しており、緑色は使用ユーザーに関する情報、赤色は部品についての情報、青色はYARRを用いて登録した読み出し試験結果、紫は品質試験結果登録用 GUI を用いて登録した結果についてのものである。また、灰色はモジュールの組み立て工程を管理するためのコレクションであり、黄色は読み出し試験データや画像データを管理するファイルシステムに関するコレクションである。直線はオブジェクト ID によるドキュメント間の関連付けを表しており、直線が十字になっている場合は 1 つのドキュメントとの関連付け、分岐しているものは複数本のドキュメントと関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

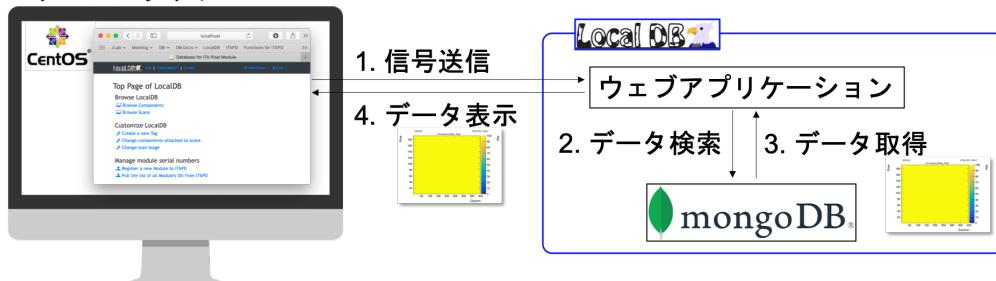


図 6.4 ウェブアプリケーションの処理の概念図。図中の数字は処理の順序を表し、ウェブブラウザから送信した信号に基づきウェブアプリケーション内で処理を行う。

1 2-2. 非読み出し試験

2 非読み出し試験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
3 覧機能について、7.1に示す。

4 3. モジュール組み立て工程管理機能

5 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
6 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
7 る。この機能は先行研究 [2] 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
8 未開発であった。これについて 7.2 に示す。

9 4. 中央データベースとの同期機能

10 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
11 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 [2] によって行われてきた。しかし、モ
12 ジュールを中央データベースへ登録、非読み出し試験の結果およびモジュールの組み立て工程を中
13 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 に示す。

1 第7章

2 試験結果データ管理システムの開発

3 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
 4 管理の流れの全てをサポートできるように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
 5 示す。

- 6 1. 品質試験結果の表示機能 (7.1 節)
 - 7 – 非読み出し試験結果の閲覧機能
 - 8 – ピクセルモジュール特性の閲覧機能
 - 9 – 読み出し試験結果比較機能
- 10 2. 品質試験結果の管理機能 (7.2 節)
 - 11 – ピクセルモジュール特性の選択機能
- 12 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)
 - 13 – ピクセルモジュール情報の登録機能
 - 14 – 品質試験結果のアップロード機能
 - 15 – 品質試験結果のダウンロード機能

16 7.1 品質試験結果の表示機能

17 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
 18 してウェブアプリケーションの開発を行っている。これまで読み出し試験に特化した開発が行われてい
 19 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
 20 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
 21 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
 22 を行った。

23 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。

24 7.1.1 非読み出し試験結果閲覧機能の概要

25 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
 26 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、非
 27 読み出し試験結果を管理する機能が必要である。本研究では、非読み出し試験結果登録用 GUI である

- 1 QC-helper 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。
- 2 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。
- 3 非読み出し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。

```

5   1 {
6
7     2   "_id" : ObjectId("6131a0532e16df12955d9c6d"),
8
9     3   "component" : "60b9dc51d978dc000b9232fc",
10
11    4   "user" : "kinoshita",
12
13    5   "address" : "Tokyo\u2014Institute\u2014of\u2014Technology",
14
15    6   "currentStage" : "MODULETOPCB",
16
17    7   "testType" : "MASS",
18
19    8   "sys" : {
20
21      9     "cts" : ISODate("2021-09-03T04:10:57.338Z"),
22
23      10    "mts" : ISODate("2021-09-03T04:10:57.338Z"),
24
25      11    "rev" : 0
26
27    },
28
29    13   "results" : {
30
31      14     "property" : {
32
33          15       "Scale_accuracy" : 0.5,
34
35          16       "Scale_accuracy_unit" : "g"
36
37        },
38
39        18       "mass_value" : 1,
40
41        19       "mass_unit" : "g",
42
43        20       "comment" : "hoge"
44
45      },
46
47      22     "dbVersion" : 1.01
48
49    }

```

先述したように非読み出し試験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。

画像や JSON file 等のファイルデータの保存は GridFS[41] 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。非読み出し試験については、外観検査における高画素画像およびワイヤー配線のためのデータファイルを 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。

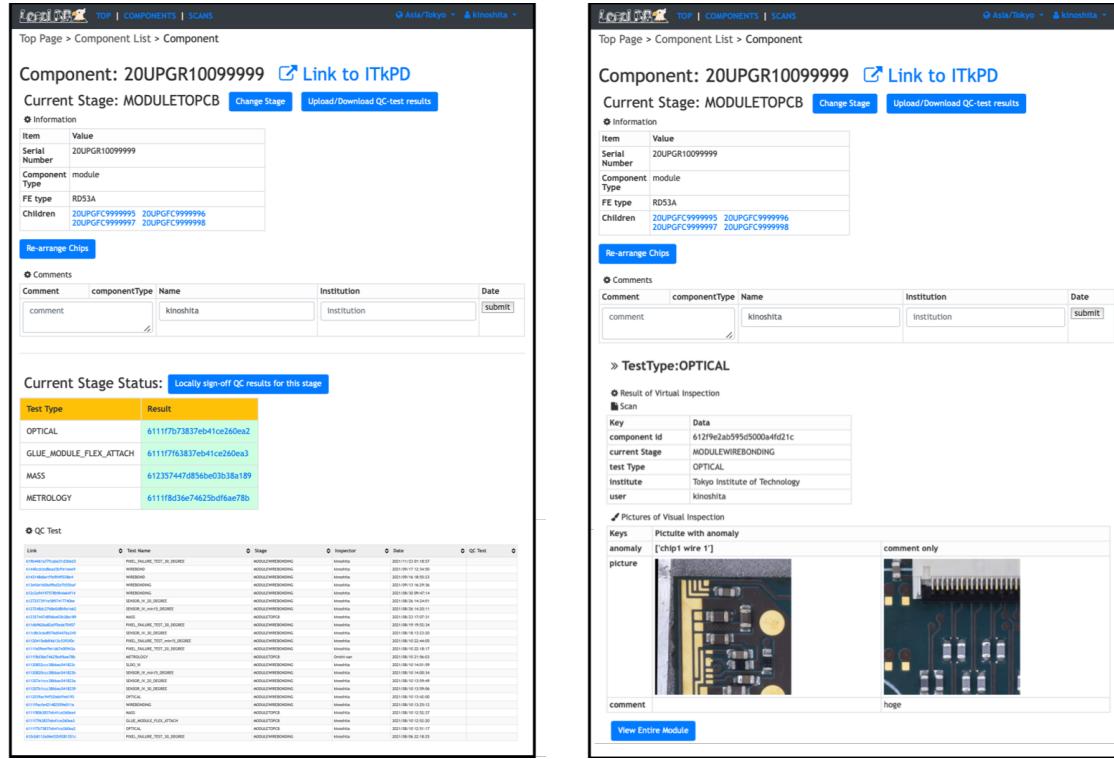


図 7.1 ローカルデータベースのあるモジュールに関する試験結果のトップページ(左図)とそのモジュールについての非読み出し試験結果のブラウザ出力(右図)。部品についてのページ下部にある表はその部品について登録された品質試験結果であり、リンクをクリックすることにより試験結果を表示することができる。右図は外観検査の結果を表す。

1 7.1.2 非読み出し試験結果閲覧機能

2 非読み出し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
 3 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。
 4 この一覧は、初め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
 5 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
 6 とが可能であり、クリックする毎に昇順、降順、ソート解除となる。
 7 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
 8 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の試験結果の基本要素を全
 9 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
 10 通項目としては前試験項目について共通の票を出力、品質試験結果については適切な形に整形しブラウザ
 11 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
 12 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
 13 の品質試験結果の表示画面については付録 A.1 にまとめれる。

14 7.1.3 ピクセルモジュール特性閲覧機能

15 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
 16 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

1 更新情報は非読み出し試験結果登録用 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。内容は品質試験結果を表すコレクションである QC.results と同じであるため、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。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定更新情報を表すドキュメント。

```

6
7   1 {
8     2   "_id" : ObjectId("613ec032f5194763373ddad1"),
9     3   "component" : "6138924058c2e3000a0db59d",
10    4   "user" : "kinoshita",
11    5   "address" : "Tokyo\u2014Institute\u2014of\u2014Technology",
12    6   "currentStage" : "MODULEWIREBONDING",
13    7   "testType" : "IREFTRIM_FE",
14    8   "sys" : {
15      9     "cts" : ISODate("2021-09-13T03:06:25.499Z"),
16     10     "mts" : ISODate("2021-09-13T03:06:25.499Z"),
17     11     "rev" : 0
18   },
19   13   "results" : {
20     14     "value" : {
21       15       "chip1" : "1000",
22       16       "chip2" : "1000",
23       17       "chip3" : "1000",
24       18       "chip4" : "1000"
25     },
26     19     "comment" : "hoge"
27   },
28   20   "dbVersion" : 1.01
29 }
30

```

31 7.1.4 読み出し試験結果比較機能

32 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 に基づきピクセル応答評価機能が先行研究 [2] 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。

- 35 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
- 36 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
37 言う名前のファイルにまとめる
- 38 3. after_analysis.root にまとめられた結果を PNG の画像に変換し出力

39 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 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

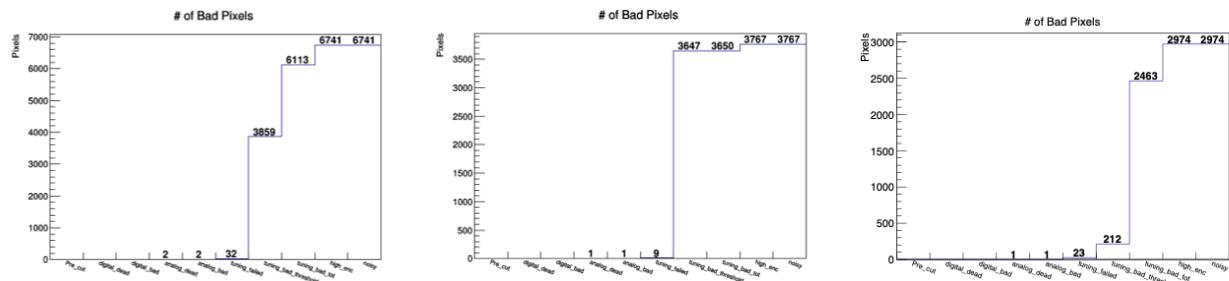


図 7.2 ピクセル応答評価機能を用いて作成したピクセル解析結果(左・中央)と2つの差分を用いた比較結果(右図)。横軸は評価基準、縦軸は該当する不良ピクセル数を表す。

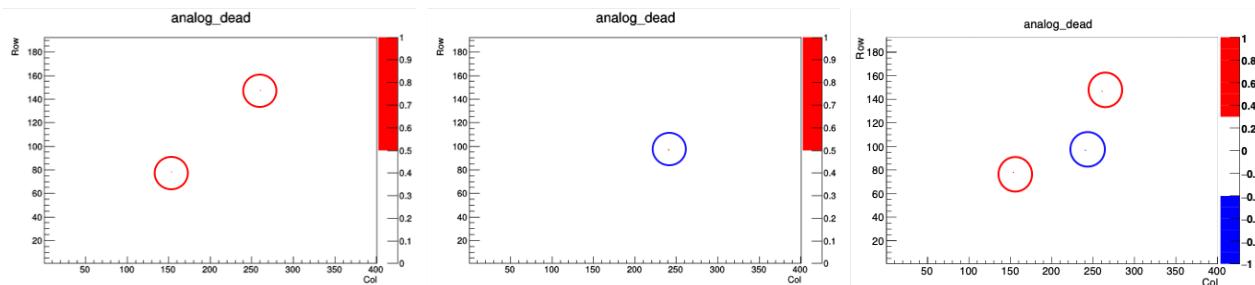


図 7.3 ピクセル解析結果における不良ピクセルの分布(左・中央)と2つの差分を用いた比較結果(右図)。各図は二次元ヒストグラムであり、横軸は ASIC における各ピクセルの列番号、縦軸は行番号を示している。

¹ 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
² 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ということに役に立つ。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グラム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ローカルデータベースに実装する必要がある。

13 7.2 品質試験結果の管理機能

14 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
15 の選択機能が先行研究 [2] 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定
16 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
17 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
18 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
19 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
20 機能の流れを図 7.5 に示す。

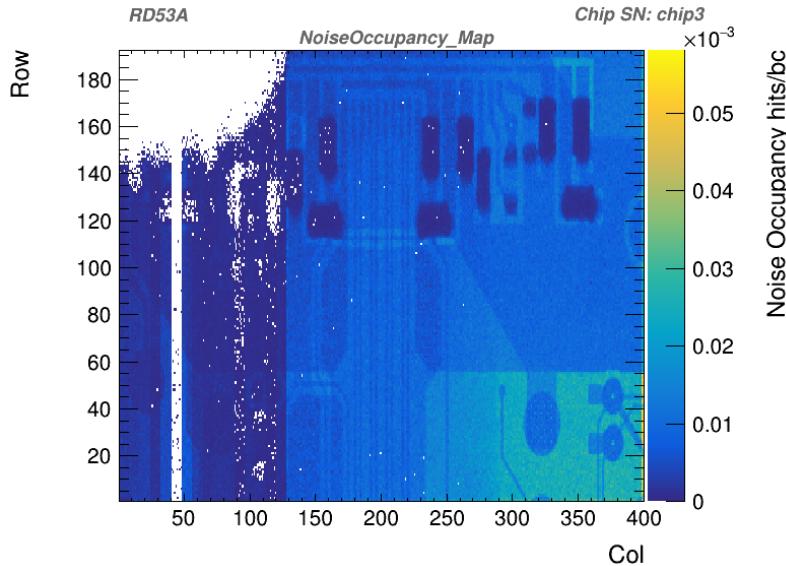


図 7.4 バンプ剥がれが発生したピクセルモジュールについての読み出し試験結果。左上の領域にヒット数が無いことから、この部分のバンプが剥がれてしまっていることがわかる。

1 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
2 以下に示す。
3

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。

```

4
5   {
6     "component": "5fa79114e615fa000a1a5976",
7     "currentStage" : "MODULEWIREBONDPROTECTION",
8     "QC_results" : {
9       "MODULETOPCB" : {
10         "OPTICAL" : "6111f7b73837eb41ce260ea2",
11         "GLUE_MODULE_FLEX_ATTACH" : "6111f7f63837eb41ce260ea3",
12         "MASS" : "612357447d856be03b38a189",
13         "METROLOGY" : "6111f8d36e74625bdf6ae78b"
14     },
15     "MODULEWIREBONDING" : {
16       "WIREBONDING" : "613efde160bd9bd2e7b55baf",
17       "WIREBOND" : "61440cdcb8ead3bff1eee9",
18       "OPTICAL" : "6112039ac94f52b6bffe6193",
19       "SENSOR_IV_30_DEGREE" : "611c8b3c6d8576d04476a345",
20       "SENSOR_IV_20_DEGREE" : "61272573ff1e5897417740be",
21       "SENSOR_IV_min15_DEGREE" : "6127248dc2768e0d8b9a1e62",
22       "SLDO_VI" : "61120852ccc38bbac041823c",
23       "PIXEL_FAILURE_TEST_30_DEGREE" : "619b4461a77fcabe31d3bbd3",
24       "PIXEL_FAILURE_TEST_20_DEGREE" : "6111fe09eef9e1d67e00943a",
25       "PIXEL_FAILURE_TEST_min15_DEGREE" : "61120415e8df6613c5393f0c"
26     },
27     "MODULEWIREBONDPROTECTION" : {

```



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。

```

1   24      "POTTING" : "-1",
2   25      "OPTICAL" : "-1",
3   26      "MASS" : "-1",
4   27      "SENSOR_IV" : "-1",
5   28      "REGISTER_TEST" : "-1",
6   29      "READOUT_IN_BASIC_ELECTRICAL_TEST" : "-1"
7   30  }
8   31  }
9   32  }

```

1 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
 2 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
 3 関連付けを行っている。

4 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
 5 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
 6 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。

8 7.2.1 ピクセルモジュール特性の選択機能

9 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
 10 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、
 11 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
 12 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
 13 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。

```

14
15   {
16     "_id" : ObjectId("611a1c039c1b5786d950a17c"),
17     "proddbVersion" : 1.02,
18     "component" : "60d426d8b3360000af63e5b",
19     "currentStage" : "MODULEWIREBONDING",
20     "status" : "created",
21     "QC_properties" : {
22       "RD53A_PULL-UP_RESISTOR" : "61120d26ccc38bbac0418240",
23       "IREFTRIM_FE" : "61120c00ccc38bbac041823e",
24       "ORIENTATION" : "61120c0fccc38bbac041823f"
25     }
26   }
27 }
```

28 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
 29 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
 30 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”的特性
 31 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
 32 結果と一緒に中央データベースへ同期される。

33 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

34 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
 35 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
 36 よび実装の大部分は先行研究 [2] によって行われた。さらに、現在行われている試作器を用いた組み立て
 37 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
 38 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。

39 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

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"/>	

図 7.6 ピクセルモジュールの基本特性選択画面。

- 1 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、
 2 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。
 3 本研究では以下の機能を実装した。
 4 ● ピクセルモジュール情報の登録機能
 5 ● 品質試験結果の同期機能

6 7.3.1 ピクセルモジュール情報の登録

- 7 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、
 8 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
 9 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
 10 るペ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。
 11 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
 12 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
 13 詳細を以下に示す。

14 ピクセルモジュール情報の管理方法

15 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
 16 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
 17 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重要なのは、
 18 読み出し試験結果は各 ASIC 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
 19 各 ASIC と関連付けて管理する必要があるということである。親子関係を辿ることにより、ピクセルモ
 20 ジュールの情報から 4 枚の ASIC の情報を漏れなく得ることができる。

21 また、中央データベースでは ASIC が 4 枚搭載された Quad モジュールだけではなく、3 枚の ASIC が
 22 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ペアモジュールは、
 23 センサー 1 枚と ASIC 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ペアモジュール
 24 はセンサー 1 枚と ASIC 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
 25 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

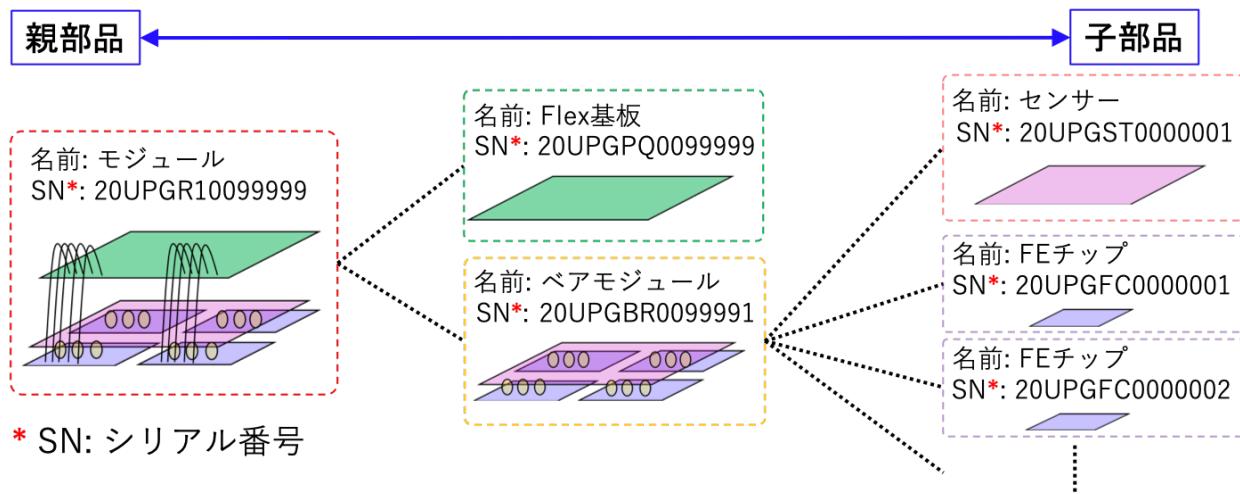


図 7.7 ピクセルモジュールの親子関係。この図では、Quad モジュールを例にピクセルモジュールの親子関係を示している。

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ベア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ベア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 ASIC 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 ASIC 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ナンバーが決定される。

15 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。

- 18 i. 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
- 19 ii. ピクセルモジュールの登録に必要な情報の入力
- 20 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

21 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

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	ASIC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		

- 1 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。
- 2 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。
- 3 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。

```
5   1  {
6     2   "_id" : ObjectId("5bb1e1bef981520009c54bc5") ,
7     3   "dbVersion" : 1.01,
8     4   "code" : "MODULE",
9     5   "name" : "Module",
10    6   "project" : {
11      7     "code" : "P",
12      8     "name" : "Pixels"
13    },
14    9  },
15   10  "subprojects" : [
16     11  {
17       12    "code" : "PI",
18       13    "name" : "Inner\u2225pixels"
19     },
20     14  {
21       16    "code" : "PB",
22       17    "name" : "Outer\u2225pixel\u2225barrel"
23     },
24     18  {
25       20    "code" : "PE",
26       21    "name" : "Pixel\u2225endcaps"
27     },
28     22  {
29       24    "code" : "PG",
30       25    "name" : "Pixel\u2225general"
31     },
32   26  ],
33   27  ],
34   28  "types" : [
35     29  {
36       30    "code" : "TRIPLET_LO_STAVE_MODULE",
37       31    "name" : "Triplet\u2225Lo\u2225stave\u2225module",
38       32    "subprojects" : [
39         33      {
40           34         "code" : "PI",
41           35         "name" : "Inner\u2225pixels"
42         },
43         36      ],
44         37      ],
45         38      "snComponentIdentifier" : "MS"
46       },
47       ...
```

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 ASIC 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

```

1   41  ],
2   42  "children" : {
3   43  "TRIPLET_LO_STAVE_MODULE" : {
4   44      "BARE_MODULE" : "PGB1",
5   45      "PCB" : "PIPT"
6   46  },
7   47  ...
8   48  }
9   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必須情報を表 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 [42]。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

The screenshot shows a web application titled "LocalDB" with a navigation bar for "TOP", "COMPONENTS", and "SCANS". The user is logged in to "Asia/Tokyo" under the account "kinoshita". The main content area is titled "Register a Module to ITkPD". A message at the top says "Please enter the information about the Module." Below this, there are four input fields with asterisks indicating they are required:

- "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)
- "Module Carrier serial number*" (text input field)

A blue "Confirm" button is located at the bottom of the form. At the very bottom left, there is a link "Back to Top Page".

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。

- 1 – モジュールキャリアのシリアルナンバー
- 2 ● 削減したパラメータ
 - 3 – 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
 - 4 – subproject: ピクセルモジュールの種類情報から抽出
 - 5 – 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
 - 6 – 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
 - 7 – 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
 - 8 – FE chip version: ベアモジュール情報から抽出
 - 9 – Thickness: ベアモジュール情報から抽出

11 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
 12 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
 13 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、
 14 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。
 15 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、
 16 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
 17 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。

18 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

19 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
 20 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。
 21 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
 22 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
 23 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
 24 ことができる。

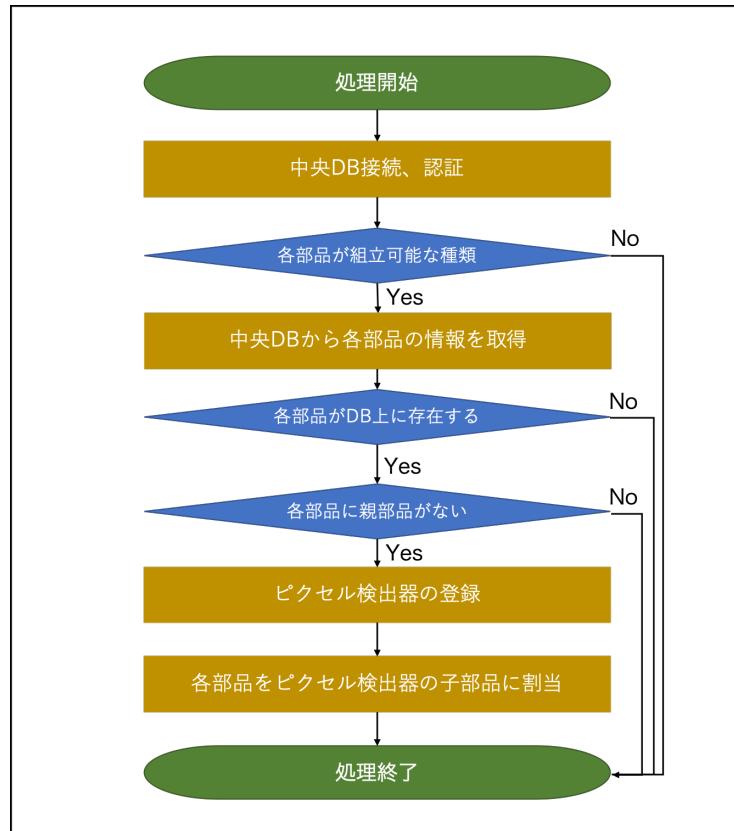


図 7.9 ピクセルモジュール登録機能による処理の流れ。

1 7.3.2 品質試験結果の同期機能

2 第6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
 3 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
 4 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
 5 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。

6 本研究において、先行研究[2]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
 7 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
 8 同期する機能の開発を行った。

9 中央データベースにおける品質試験結果の管理方法

10 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
 11 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。

- 12 ● ピクセルモジュールのシリアルナンバー
- 13 ● 試験日時
- 14 ● 試験機関
- 15 ● コメント
- 16 ● ローカルデータベースを再現するためのファイル
- 17 ※ 品質試験結果

1 ※ 品質試験特性 (周囲温度や測定機器の設置値等)

2 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
3 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
4 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
5 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
6 のみを管理することができる。非読み出し試験について、中央データベースに定義したアップロードする
7 パラメータの枠を表 7.4 に示す。

8 **品質試験結果のアップロード機能**

9 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
10 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。

- 11 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
- 12 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
- 13 3. 作成した結果を中央データベースへアップロード
- 14 4. アップロードした結果にデータファイルを添付

15 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
16 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
17 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
18 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。

19 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
20 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
21 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
22 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
23 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
24 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。ループ中の条件分
25 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
26 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。

27 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、
28 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
29 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
30 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
31 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
32 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
33 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、
34 量産の進捗度を確認することができる。

35 **アップロード機能の性能評価**

36 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
37 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

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

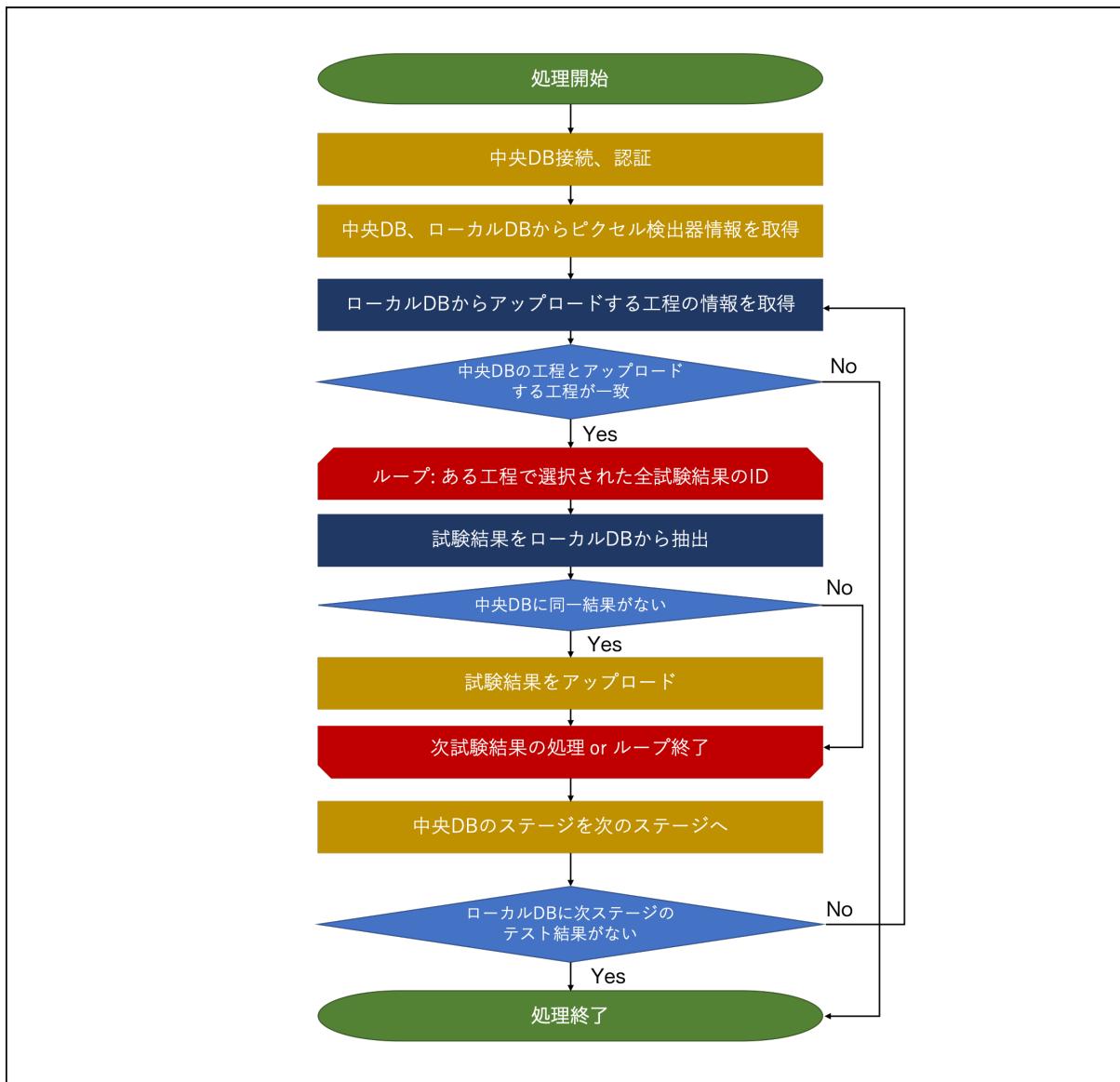


図 7.10 品質試験結果アップロード処理の流れ。

- 1 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
- 2 47.5 MB/sec^{*1}である。
- 3 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導出した。
- 4 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
- 5 2. 品質試験結果を中央データベースへアップロード
- 6 アップロード機能の性能評価結果を表7.5に示す。
- 7 読み出し試験のアップロードにかかる処理時間はO(100)であり、読み出し試験以外の結果については
- 8 処理時間が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。しかし、読み出し試験についてはアップロード
- 10 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プロード処理は、ウェブブラウザのボタン

^{*1} 測定を行った2021年9月時の値

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]

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]

1 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。

- 5 ● 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
 6 ● 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

7 最初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。非読み出し試験の場合は、「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。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。

13 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 ASIC 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。

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

17 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。

22 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 [3] 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

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]

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た後に、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とにし、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を押した後、中央データベースへの接続およびユーザー認証を完了した後、バックグラウンド処理を行うようにした。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、待ち時間抑ええることができた。

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。

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、実際に行う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 ASIC 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 20.4 ± 0.99 [sec] だけ必要とな

*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。

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]

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 ASIC 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 ASIC 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。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、最も時間の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。



図 7.11 品質試験結果ダウンロード処理の流れ。

7.4 本章のまとめ

- 1 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表示機能、品質試験結果の管理機能、および
 2 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
 3 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
 4 結果管理に必要な機能の基本的な部分が全て揃った。
- 5 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
 6 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
 7 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をし、ウェブブラウザを
 8 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
 9 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
 10 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
 11 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。
 12 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
 13 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
 14 ついての評価機能を実装する必要がある。
- 15 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
 16 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
 17 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は、各

- 1 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。
- 2 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
- 3 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
- 4 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
- 5 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
- 6 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。
- 7 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
- 8 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
- 9 り、この時間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
- 10 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
- 11 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
- 12 削減できるという結論が得られた。

¹ 第8章

² まとめ

³ 8.1 結論

⁴ 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
⁵ 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
⁶ 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
⁷ 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
⁸ ていることを確認および欠陥してい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
⁹ 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
¹⁰ 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
¹¹ 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
¹² 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
¹³ 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。

¹⁴ 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
¹⁵ 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
¹⁶ 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
¹⁷ 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陥である。これまでの
¹⁸ 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
¹⁹ 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
²⁰ 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
²¹ 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
²² 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陥を自動補完する
²³ 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
²⁴ 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。

²⁵ 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
²⁶ 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
²⁷ 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
²⁸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
²⁹ のパイロ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。

1 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
2 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
3 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
4 保管しておく必要がある。

5 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
6 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
7 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
8 機能の基本的な部分が全て揃った。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
9 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
10 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
11 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結
12 果が得られた。

13 8.2 今後の課題

14 8.2.1 電荷較正の自動補完ツール

15 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
16 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
17 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
18 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。

19 また、2021年9月に行われた電荷較正のデータを用いて電荷較正の補完を行った。その際に、電荷較
20 正結果を確認すると、小さい試験電荷を生成した際に2つの構造が確認でき、 $ToT = 4$ が得られた際に、
21 較正式から得られる電荷と試験電荷の違いが20%程度あることがわかった。このような違いがク
22 ラスタリングから得られる荷電粒子の通過位置に、どのような影響を及ぼすかをシミュレーション等を用
23 いて正確に評価する必要がある。

24 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

25 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
26 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
27 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
28 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
29 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。

30 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
31 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
32 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
33 間を短くするような工夫が必要である。

1 付録 A

2 ローカルデータベースのブラウザ表示

3 A.1 非読み出し試験結果のブラウザ表示

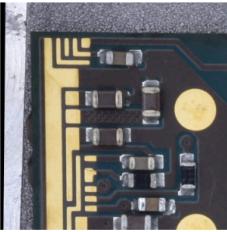
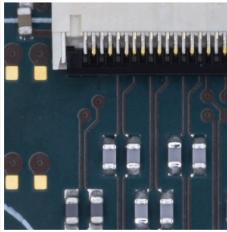
» TestType:OPTICAL

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。

4 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

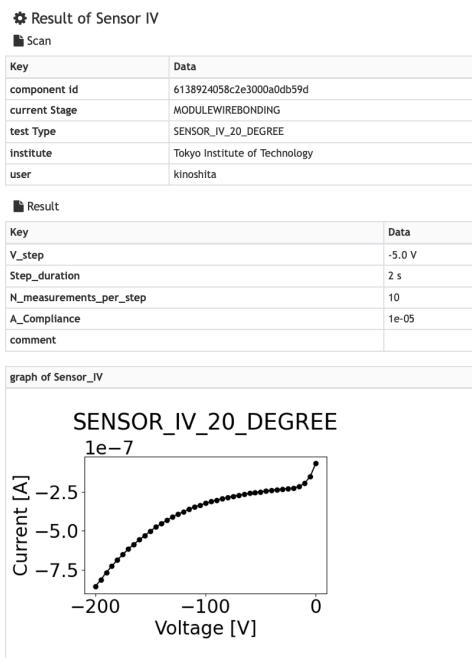


図 A.5 センサー特性測定結果のブラウザ表示。

» TestType:SLDO_VI

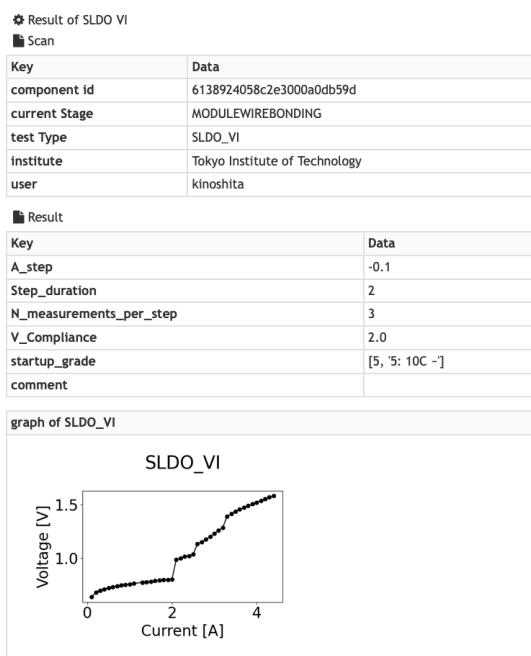


図 A.6 SLDO 特性結果のブラウザ表示。

» 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] 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)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 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).
- [7] 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/>
- [8] 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).
- [9] CERN Accelerating science, ”The HL-LHC project”, 2021年12月閲覧, <https://hilumilhc.web.cern.ch/content/hl-lhc-project>
- [10] 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>
- [11] 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
- [12] The ATLAS Collaboration, ”ATLAS Inner Tracker Pixel Detector Technical Design Report” (2018), <https://cds.cern.ch/record/2285585/files/ATLAS-TDR-030.pdf>
- [13] The ATLAS Experiment, ”The Inner Detector”, <https://atlas.cern/discover/detector/inner-detector>, 2021年12月閲覧

- [14] The ATLAS Experiment, "Keeping the ATLAS Inner Detector in perfect alignment", <https://atlas.cern/updates/experiment-briefing/inner-detector-alignment>, 2021 年 12 月閱覽
- [15] The ATLAS Collaboration, Additional plots of the ATLAS Higgs physics group, "Additional plots of the ATLAS Higgs physics group" <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CombinedSummaryPlots/HIGGS/>, 2022 年 1 月閱覽
- [16] 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>
- [17] HL/HE-LHC Physics Workshop, "Opportunities in Flavour Physics at the HL-LHC and HE-LHC"(2019), <https://arxiv.org/abs/1812.07638>
- [18] HL/HE-LHC Physics Workshop, "Beyond the Standard Model Physics at the HL-LHC and HE-LHC"(2019), <https://arxiv.org/abs/1812.07831>
- [19] HL/HE-LHC Physics Workshop, "Higgs Physics at the HL-LHC and HE-LHC"(2019), <https://arxiv.org/abs/1902.00134>
- [20] HL/HE-LHC Physics Workshop, "Standard Model Physics at the HL-LHC and HE-LHC"(2019), <https://arxiv.org/abs/1902.04070>
- [21] 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>
- [22] S. D. Thomas and J. D. Wells, Phenomenology of Massive Vectorlike Doublet Leptons, <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.81.34>
- [23] Particle Data Group, 33. Passage of particles through matter 1, <https://pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2018-rev-passage-particles-matter.pdf>
- [24] M. Moll, "Displacement Damage in Silicon Detectors for High Energy Physics" , IEEE Transactions on Nuclear Science, Aug. 2018. DOI: 10.1109/TNS.2018.2819506.
- [25] Beniamino Di Girolamo, "The ATLAS Pixel Detector" (2011), <https://pos.sissa.it/137/006/pdf>
- [26] 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
- [27] 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
- [28] Garcia-Sciveres, Maurice, "The RD53A Integrated Circuit" (最終更新: 2019 年 9 月), <https://cds.cern.ch/record/2287593>, CERN Document Server
- [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

- 1 project” (2008), <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/119/4/042031>
- 2 [33] 2015 IBL Calibration, ”2015 IBL Calibration”, <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/>
- 3 PHYSICS/PLOTS/PIX-2016-005/, 2022 年 1 月閱覽
- 4 [34] IBL ToT and threshold evolution in 2017 and 2018, ”IBL ToT and threshold evo-
5 lution in 2017 and 2018”, <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PLOTS/>
6 PIX-2018-009/, 2021 年 12 月閱覽
- 7 [35] Stefano Terzo, ”Development of radiation hard pixel modules employing planar n-in-p silicon-
8 sensors with active edges for the ATLAS detector at HL-LHC”(2015), <https://cds.cern.ch/>
9 record/2676574/?ln=ja
- 10 [36] Malte Backhaus, ”Characterization of new hybrid pixel module concepts for the ATLAS In-
11 sertable B-Layer upgrade”(2012), <https://arxiv.org/pdf/1202.3592.pdf>
- 12 [37] Daniel Adam Dobos, ”Production accompanying testing of the ATLAS Pixel module” (2017),
13 <https://cds.cern.ch/record/1016933/files/thesis-2007-016.pdf>
- 14 [38] 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>
- 15 [39] Massimiliano Antonello, ”Digital module electrical testing” (2020), <https://cds.cern.ch/>
16 record/2723333/files/ATL-COM-ITK-2020-020.pdf
- 17 [40] Vasilije Perovic, CMS Tracker Group. ”Serial powering in four-chip prototype RD53A mod-
18 ules for Phase 2 upgrade of the CMS pixel detector” . ScienceDirect. 2020-10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900220308330>
- 19 [41] MongoDB, ”MongoDB Documentation”, <https://docs.mongodb.com>, 2021 年 12 月閱覽
- 20 [42] Neville W. Sachs, P.E., ”Practical Plant Failure Analysis” (2019), Economics, Finance, Business
21 & Industry, Engineering & Technology
- 22
- 23

1 謝辞

2 shaji

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	6
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	14
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 の測定感度の予測値	16
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	電荷量とタイムウォークの関係	23
2.9	RD53A のピクセルとアナログ回路	24
2.10	フレンケル欠陥とショットキー欠陥	25
2.11	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	26
2.12	MOS トランジスタの模式図	26
2.13	トータルドーズ効果と FE チップ電流の関係	27
2.14	トータルドーズ効果と Threshold および ToT の関係	27
3.1	FEI3 アナログ回路の概略図	29
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	29
3.3	検出効率と試験電荷の関係	31

1	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	32
2	3.5	ピクセルモジュールの FE チップ境界付近のピクセルタイプ	33
3	4.1	電荷較正式 (3.2) を用いてフィッティングした結果	35
4	4.2	V_{cal} と Plsr DAC の関係の測定結果	35
5	4.3	欠陥が含まれるピクセルモジュールについての Threshold 分布	36
6	4.4	ルミノシティに対する ToT の変化	37
7	4.5	MIP 粒子がピクセル検出器に落とす電荷量	39
8	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	39
10	4.7	電荷較正結果を再較正するツールの処理の流れ	40
11	4.8	電荷再較正前後のフィッティング結果	40
12	4.9	データ欠陥の補完方法	41
13	4.10	Threshold の評価結果	42
14	4.11	Threshold のノイズの評価結果	42
15	4.12	2021 年 9 月に行われた B-Layer についての電荷較正結果	45
16	4.13	ToT = 4 における電荷較正の評価結果	47
17	4.14	B-Layer の電荷較正結果における 2 つの異なる構造	47
18	5.1	フレキシブル基板	50
19	5.2	ピクセルモジュールの組み立て工程	50
20	5.3	ワイヤー保護用の構造体	52
21	5.4	読み出し試験のセットアップ	52
22	5.5	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	54
24	5.6	クアッドモジュールの I_{ref} I_{rim} 部分を表す部分 (左図) とワイヤーの配線と I_{ref} 値の関係 (右図)[38]。ピンク色のワイヤーの配置により 4bit の I_{ref} 値を表すことができる。	57
26	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	59
27	6.2	ローカルデータベースの全体像	61
28	6.3	ローカルデータベースの構造	64
29	6.4	ウェブアプリケーションの処理の概念図	64
30	7.1	非読み出し試験結果のブラウザ出力	68
31	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。	70
33	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グラムであり、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。	70
36	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	71
37	7.5	結果選択画面及び組み立て工程表示の例	72
38	7.6	ピクセルモジュールの基本特性選択画面	74

1	7.7	ピクセルモジュールの親子関係	75
2	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	79
3	7.9	ピクセルモジュール登録機能による処理の流れ	80
4	7.10	品質試験結果アップロード処理の流れ	83
5	7.11	品質試験結果ダウンロード処理の流れ	87
6	A.1	外観検査結果のブラウザ表示	91
7	A.2	平坦性測定結果のブラウザ表示	92
8	A.3	質量測定結果のブラウザ表示	93
9	A.4	接着剤情報についてのブラウザ表示	93
10	A.5	センサー特性測定結果のブラウザ表示	94
11	A.6	SLDO 特性結果のブラウザ表示	94
12	A.7	ワイヤー強度測定結果のブラウザ表示	95
13	A.8	ワイヤー配線情報のブラウザ表示	95
14	A.9	プルアップ抵抗値のブラウザ表示	96
15	A.10	IrefTrim 値のブラウザ表示	96
16	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	97

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
1.6	HL-LHC でのビームパラメータ	13
2.1	各 FE チップの主な仕様	24
3.1	各 Layer における Threshold の値	30
3.2	各 Layer における ToT のチューニングの値	30
4.1	RUN3 に向けた電荷較正補完のまとめ	44
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	45
5.1	モジュール起動温度に対する階級値	54
5.2	ピクセル解析の評価基準一覧	56
5.3	プルアップ抵抗値と電源の関係	57
6.1	ローカルデータベースのコレクション	63
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	76
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	76
7.3	ピクセルモジュール登録に必要な入力情報	78
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	82
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	84
7.6	アップロード機能に使用される API 一覧	84
7.7	ダウンロードツールの処理時間	85
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	86