

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

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

⁴ 2021 年 12 月 31 日

¹ Abstract

² abstract

概要

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

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

1 目次

2 概要	i
3 第 1 章 序論	1
4 1.1 素粒子標準模型 [1]	1
5 1.2 LHC	4
6 1.3 ATLAS 実験	6
7 1.4 HL-LHC アップグレード	11
8 第 2 章 シリコンピクセル検出器	15
9 2.1 シリコン検出器	15
10 2.2 放射線損傷	18
11 2.3 ピクセル検出器	20
12 第 3 章 現行ピクセルモジュールの電荷較正	24
13 3.1 アナログ回路	24
14 3.2 チューニング	24
15 3.3 電荷較正	25
16 3.4 電荷較正における問題点	25
17 第 4 章 電荷補正の最適化	26
18 4.1 これまでの補正方法	26
19 4.2 電荷較正の補正	26
20 4.3 データが欠陥した際の補正	26
21 4.4 本章のまとめ	26
22 第 5 章 次世代ピクセル検出器の量産	27
23 5.1 次世代ピクセル検出器の組み立て部品	27
24 5.2 次世代ピクセル検出器の組み立て工程	29
25 5.3 品質試験	31
26 5.4 量産における試験結果管理	37
1 第 6 章 モジュール量産におけるデータベースシステム	39
2 6.1 量産に用いるデータベースの概要	39
3 6.2 ローカルデータベースの構造	40

4	6.3	モジュールの品質試験に必要な開発項目	44
5	第 7 章	試験結果データ管理システムの開発	46
6	7.1	品質試験結果の表示機能	46
7	7.2	品質試験結果の管理機能	49
8	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	53
9	7.4	本章のまとめ	66
10	第 8 章	まとめ	67
11	8.1	まとめ	67
12	8.2	今後の課題	67
13	付録 A	非読み出し試験結果のブラウザ表示	68
14	A.1	非読み出し試験結果のブラウザ表示	68
15	A.2	ピクセル検出器の基本特性のブラウザ表示	68
16	参考文献		69
17	謝辞		71

18 第1章

19 序論

20 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
 21 (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
 22 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、
 23 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)
 24 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
 25 そのアップグレード計画について説明する。

26 1.1 素粒子標準模型 [1]

27 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
 28 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。

1 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
 2 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
 3 て揃った。

4 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。

5 1.1.1 標準模型の概要

6 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
 7 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
 8 型に登場する素粒子を示す。

9 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
 10 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
 11 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
 12 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
 13 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
 1 ノンをメソンと呼ぶ。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
 2 ることができる。

3 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
 4 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

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

1.1.2 標準模型を超えた新物理の探索 [?]

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

*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。

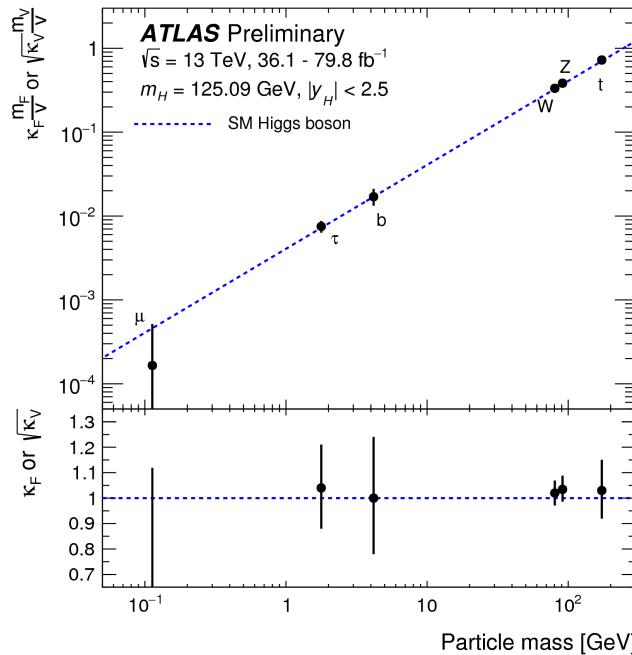


図 1.1 ヒッグス場との結合定数と素粒子の質量 [13]。 $\kappa_F m_F/v$ はフェルミオン ($F = t, b, \tau, \mu$) に対する結合定数を表し、 $\kappa_F \text{ or } \sqrt{\kappa_V}$ はボソン ($V = W, Z$) に対する結合定数を表す。 v はヒッグス場の真空期待値を表す。

18 模型の問題の 1 つとして、暗黒物質が挙げられる。

19 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
1 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
2 想される回転速度よりもはるかに大きな回転速度が得られる。このことから、銀河には光学的な観測にか
3 からない暗黒物質の存在が確認された。他にも、重力レンズ効果などの宇宙観測により、暗黒物質は宇
4 宙全体のエネルギーの約 27% を占めることがわかっており、これは標準模型から得られる物質の約 6 倍
5 の量に相当する。暗黒物質の実態は未だわかっていないが、その候補として WIMP(Weak Interacting
6 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。

7 暗黒物質の解明や、標準模型における他の問題を解決するための新たな理論体系として、超対称
8 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
9 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。図 1.2 に超対
10 称性粒子と標準模型の素粒子の対応図を示す。超対称性粒子の中で最も軽いものを LSP(Lightest SUSY
11 Particle) と呼ぶ。

12 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
13 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
14 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
15 ン数を破る崩壊を禁止する R パリティを導入する。R パリティは式 (1.1) のように定義されている。

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

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

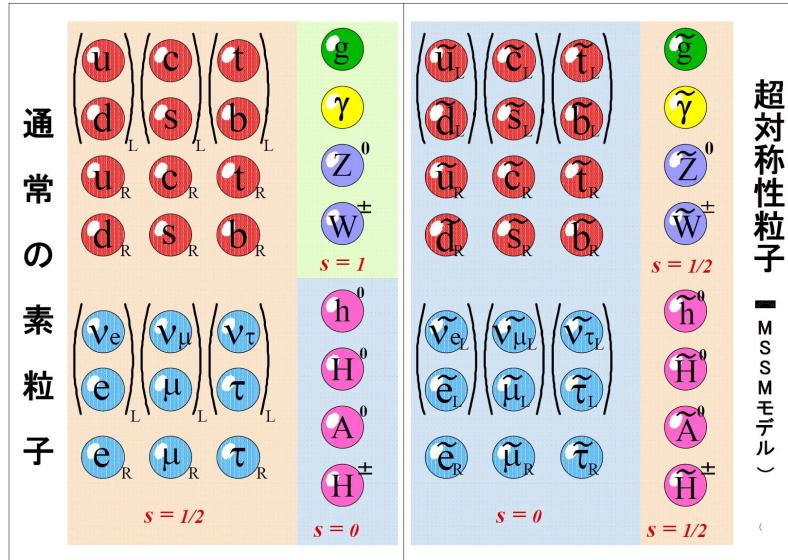


図 1.2 超対称性粒子 [14]

18 に起こりうる崩壊は以下の 3 通りのみである。

- 1 • $SM \rightarrow SM + SM$
- 2 • $SM \rightarrow SUSY + SUSY$
- 3 • $SUSY \rightarrow SM + SUSY$

4 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
 5 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
 6 ぎず安定な状態であることがわかる。したがって、中性の LSP は WIMP であり、暗黒物質の候補にな
 7 りうる。

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

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

13 1.2 LHC

14 LHC(Large Hadron Collider) は欧州原子核研究機構 (CERN) に建設された、周長がおよそ 27 km の
 15 陽子・陽子衝突型加速器である。陽子ビームの重心系エネルギーは世界最高のエネルギーである 14 TeV
 1 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
 2 える新物理の探索が LHC の主な目的である。

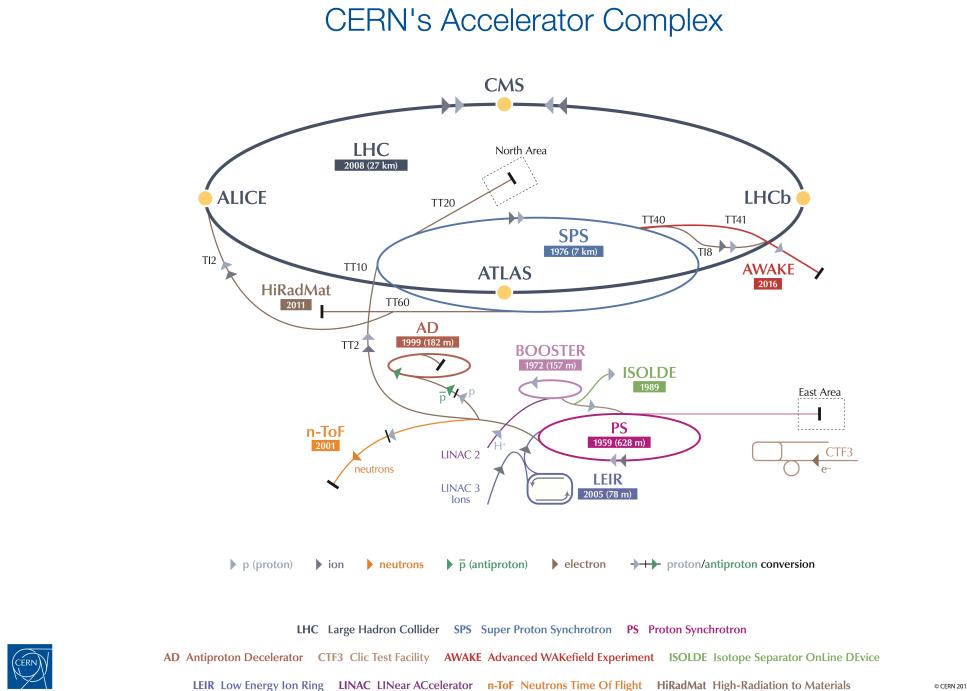


図 1.3 LHC の全体図 [5]

3 1.2.1 LHC の基本構造

4 図 1.3 に CERN に設置されている加速器・検出器の全体図を示す。陽子を生成し、加速器によって段
5 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。

6 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
7 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
8 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、
9 $2 \text{ beams} \times 2808 \text{ bunches} \times 1.15 \cdot 10^{11} \approx 6 \cdot 10^{14}$ 個の陽子を生成する必要がある。

10 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、
11 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
12 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
13 入される。LHC に投入された陽子バンチは 6.5 GeV(2018 年時点) まで加速されて、各衝突点において 2
14 つの陽子バンチが約 25 ns の間隔で衝突する。

15 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-
16 LAS(A Toroidal LHC Apparatus)、CMS(Compact Muon Solenoid)、ALICE(A Large Ion Collider
17 Experiment)、LHCb 実験が行われている。

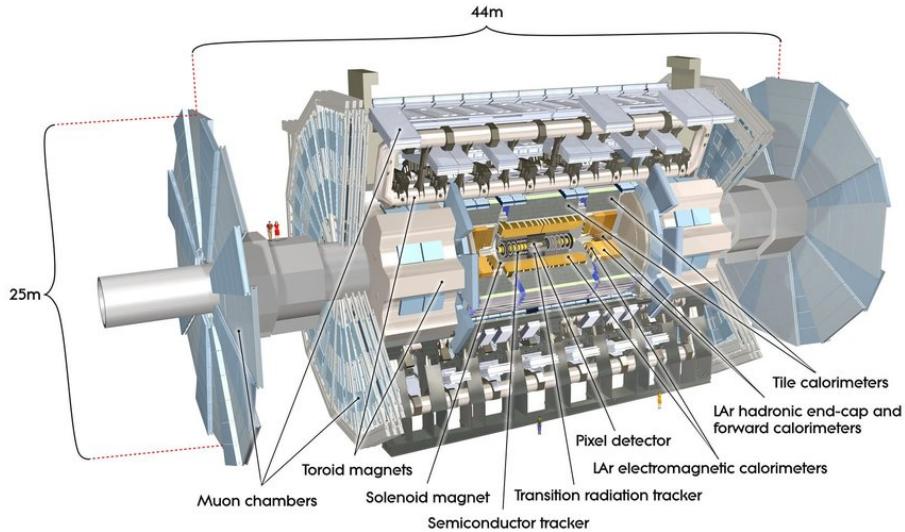


図 1.4 ATLAS 検出器の全体図 [6]。円筒の中心の内側から順に、内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリ 2 メータ、ミューオン検出器が衝突点を覆うように存在する。

6 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^* は衝突時におけるのバンチ幅の標準偏差である。

単位時間あたりに起こる物理事象の回数 N_{event} は、瞬間ルミノシティ L と反応断面積 σ を用いて式 (1.4) のように表すことができる。

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

15 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 1.4 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

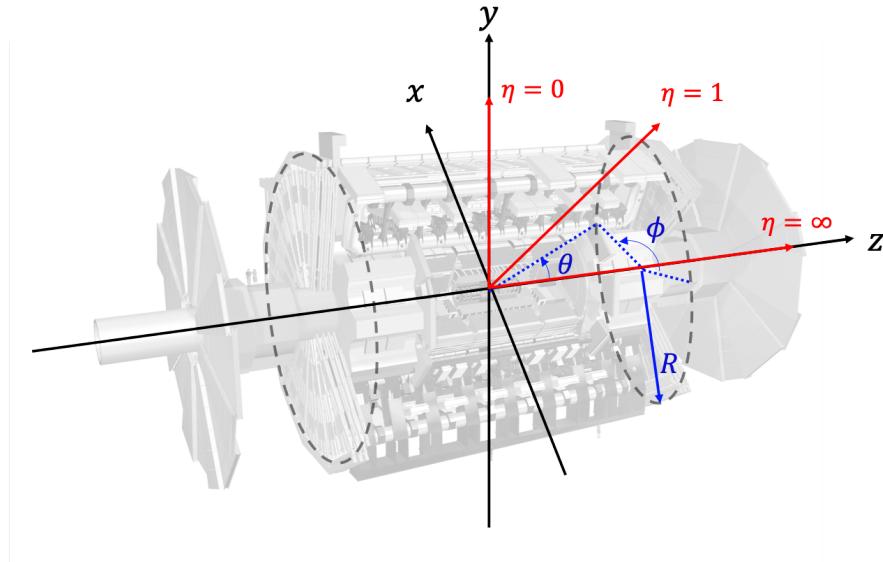


図 1.5 ATLAS 検出器で使用される座標系 [6]

があり、LHC によって加速された陽子ビームが円筒の中心軸を通過するような構造になっている。陽子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 1.5 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 1.6、図 1.8 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。

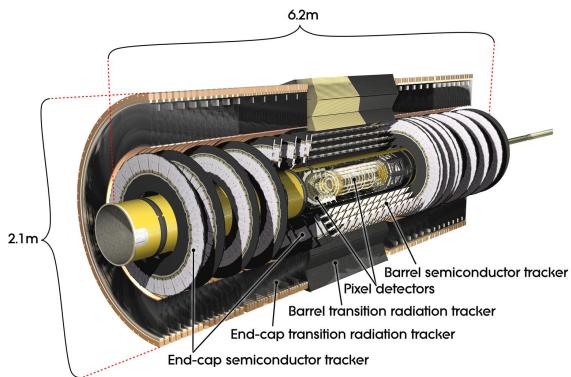


図 1.6 内部飛跡検出器の全体像。

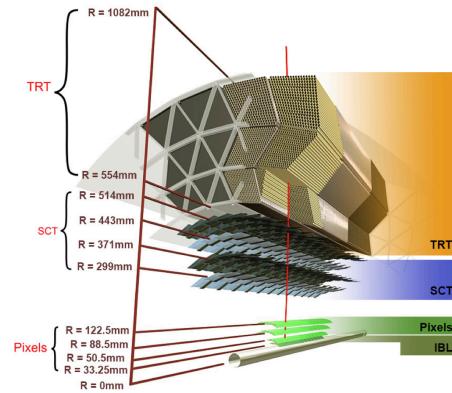


図 1.7 内部飛跡検出器の断面図。

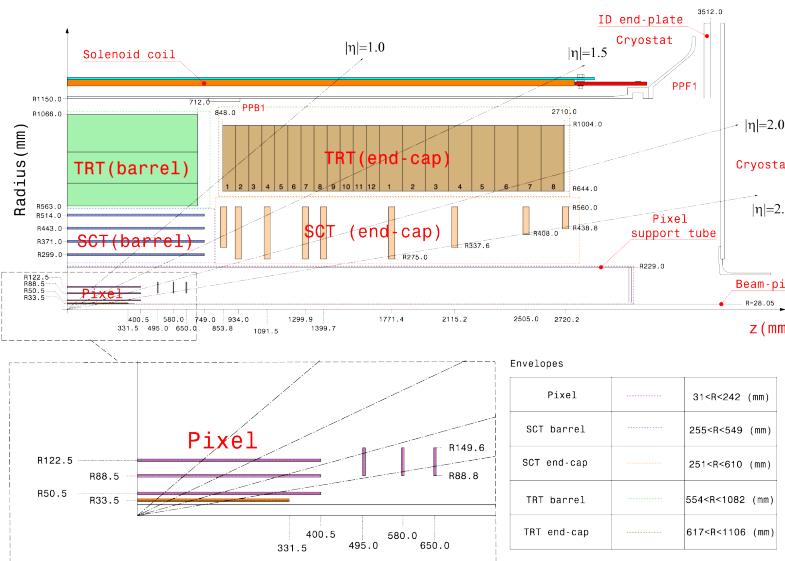


図 1.8 内部飛跡検出器の配置 [7]

8 IBL、ピクセル検出器

9 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
10 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
11 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 1.3 に示す。

12 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
13 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
14 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
15 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
16 しチップには FE-I4 と呼ばれる、 $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ のピクセルを持つ ASIC が使用されている。これらの
17 ASIC の詳細については??節に示す。

表 1.3 IBL、ピクセル検出器の配置

		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 1	$88.8 < R < 149.6$	580	48×2	4.4
	Disk 1	$88.8 < R < 149.6$	650	48×2	4.4

18 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。

24 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。

9 1.3.3 カロリメータ

図 1.9 にカロリメータの全体像を示す。ATLAS におけるカロリメータはサンプリング型のカロリメータであり、検出層と吸収層から成る積層構造である。カロリメータは内部飛跡検出器の外側に配置されており、全体で $|\eta| < 4.9$ の領域を覆うように配置されている。粒子と物質の相互作用の違いから、対象とする粒子の種類により電磁カロリメータとハドロンカロリメータが用意されている。このような構造から、カロリメータを用いて通過粒子のエネルギーと位置の測定、電子・光子とハドロンの区別、ジェットの識別を行うことができる。

電磁カロリメータは、ソレノイド磁石の外側のバレル部 ($|\eta| < 1.4$) とエンドキャップ部 ($1.4 < |\eta| < 3.2$) の領域に設置されている。検出層に液体アルゴン^{*2}、吸収層に鉛 ($Z = 82$) が用いられており、高エ

^{*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。

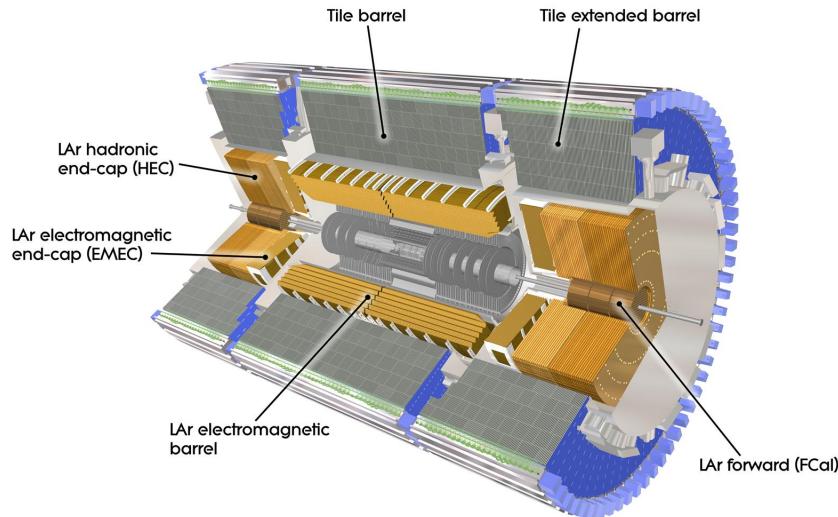


図 1.9 カロリメータの全体図 [8]

- 18 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
 19 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
 20 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
 21 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
 22 別は、内部飛跡検出器中の飛跡情報を用いて行う。電磁カロリメータの厚さは $20X_0$ ^{*3} を超えるため、測
 1 定対象である電子・光子のほとんどは電磁カロリメータにおいて全てのエネルギーを失う。
- 2 ハドロンカロリメータは、電磁カロリメータの外側にあり、バレル部 ($|\eta| < 1.7$) とエンドキャップ部
 3 ($1.5 < |\eta| < 3.2$) 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
 4 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
 5 ネルギーのハドロンがハドロンカロリメータに入ると、吸収層において原子核と強い相互作用し粒子多重
 6 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。

7 1.3.4 ミューオン検出器

8 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
 9 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
 10 ($\sim 2.2 \mu\text{sec}$) 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
 11 の運動量を測定できるよう設計されている。

12 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
 13 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、
 14 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
 15 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
 16 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
 17 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

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



図 1.10 2021 年 1 月に作成された LHC の運転計画 [9]。2025 年

18 オンの通過位置測定を行う。

1.4 HL-LHC アップグレード

20 図 1.10 に LHC の運転計画を示す。LHC では、2025 年から **HL-LHC**(High Luminosity LHC)
 1 アップグレードが開始する予定である。2027 年の運転開始から瞬間ルミノシティを設計値である
 2 $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の 5-7 倍に増加させ、2037 年における運転停止までの積分ルミノシティを Run3 ま
 3 で取得予定である 300 fb^{-1} の約 10 倍にまで増加させることが目標である。
 4 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。
 5 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
 6 グレード計画について述べる。

1.4.1 HL-LHC の概要

8 LHC は 2010 年春から本格運転を開始し、長期運転停止期間 (LS: Long Shutdown) を重ねて、ピーク
 9 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
 10 ある。さらに、2025 年-2027 年における長期運転停止期間 (LS3) において LHC のアップグレードを行
 11 い、瞬間ルミノシティを現行 LHC の設計値の 5-7 倍にまで増加させる。

12 表 1.5 に現行 LHC と HL-LHC で予定されている主なビームパラメータをまとめた。式 (1.2) より、瞬
 13 間ルミノシティを増大させるには、ビーム電流 (N_b, n_b) を増強し、衝突点でのビームサイズ (ε_n, β^*) を絞
 14 り、交差角 θ_c による幾何学的損失係数 R をできるだけ大きくするよう設計する必要がある。そのため、
 15 HL-LHC ではルミノシティを大幅に向上させるために以下のような改良を計画している。

- 16 • 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,
 17 PS, SPS) について更新・アップグレードを実施

表 1.4 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

- 18 ● 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
19 りの挿入部に新たに高磁場の磁石を実装
20 ● 幾何学的損失係数 R を現行 LHC と同程度に保つため、衝突点のクラブ空洞^{*4}を導入

21 1.4.2 内部飛跡検出器のアップグレード

22 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
1 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
2 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。

- 3 ● 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
4 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
5 り高い放射線耐性を持つ検出器が要求される。
6 ● 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
7 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
1 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
2 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爾アップ耐
3 性が高い検出器が必要となる。

4 以上の理由により、ATLAS の衝突点に最も近い検出器である内部飛跡検出器の総入れ替えを計画して
5 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
6 の全体像を図 1.11 に示す。ITk は全てシリコン半導体検出器から構成され、図 1.12 に示すように、TRT
7 は廃止されて、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。

8 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
9 導入する。特に、放射線の影響が大きくなるバー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
10 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

*4 「クラブ空洞」とは、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で開発された特殊な超伝導空洞で、電子・陽電子ビームのバンチを回転させることにより、より高いルミノシティを達成することを目指して開発された技術である。[11]

表 1.5 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

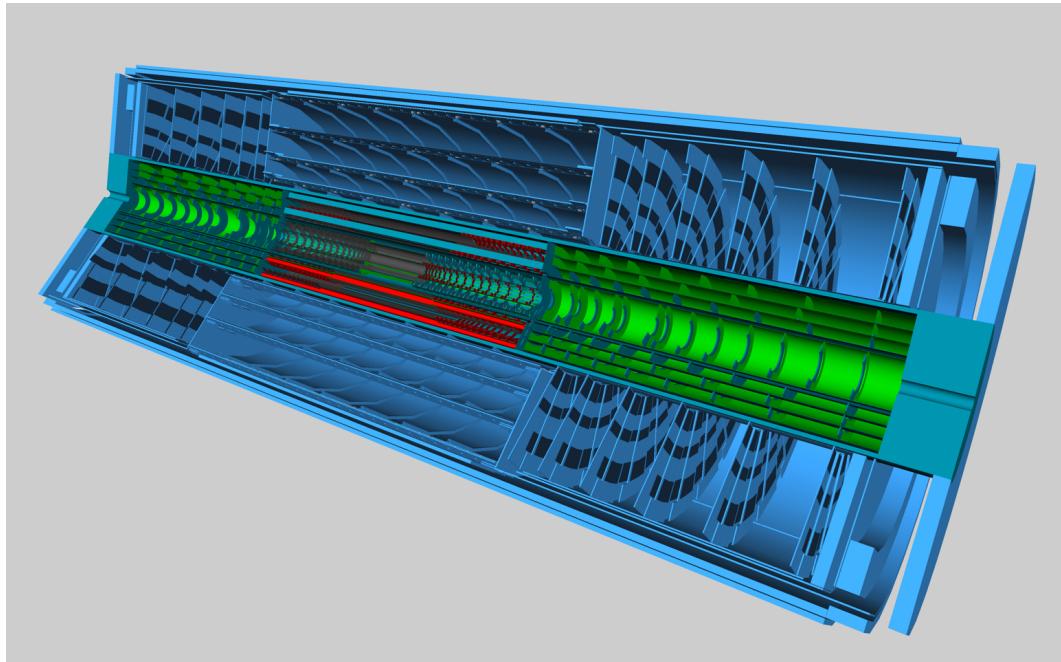


図 1.11 ITk の断面図 [12]。

- ¹¹ ズを現行ピクセルの 1/5 にすることにより、ヒット占有率を抑えることが期待される。さらに、1 衝突あたりのパイルアップが高くなることから、読み出しシステムの高速化も必要となる。
- ¹³ このようなアップグレードを行うことにより、HL-LHC における高い瞬間ルミノシティ環境下においても、高い飛跡再構成効率における解析を行うことができる。さらに、現行 LHC の検出範囲外であった $2.7 < |\eta|$ が検出可能になることにより、フェイクレートを抑えつつ、3 GeV 以上のミューオンを 99% 以上の効率で検出、さらには 1 GeV 以上の電子やパイオニア 85% 以上の効率で検出可能となる。

¹⁷ 1.4.3 HL-LHC physics

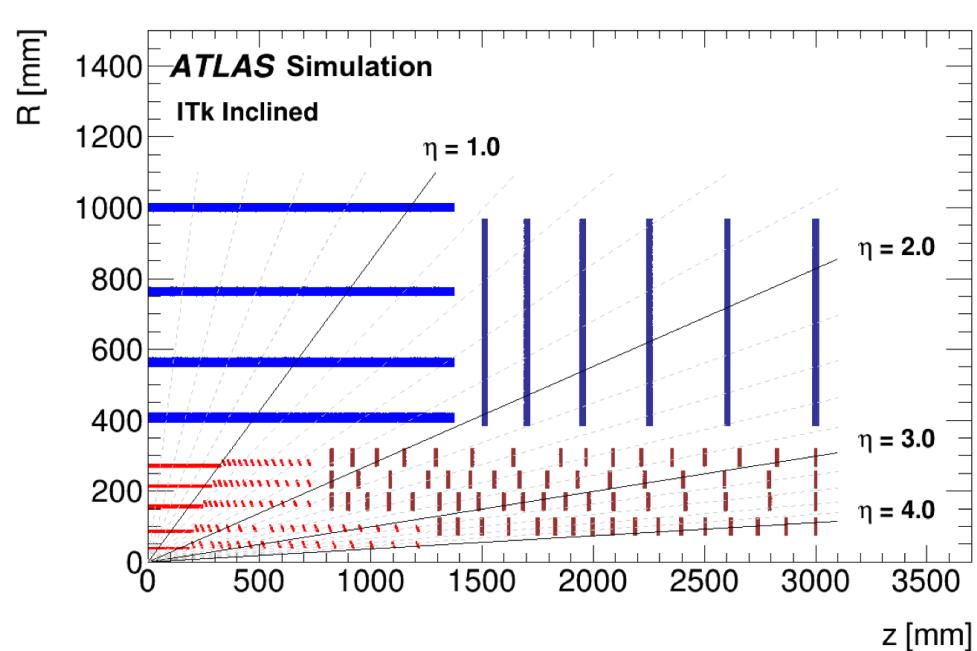


図 1.12 ITk の断面図 [12]。

18 第2章

19 シリコンピクセル検出器

20 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
 21 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
 22 クセル検出器について説明する。

23 2.1 シリコン検出器

24 本節では、シリコンを例に半導体の主な性質と検出原理について述べる。

25 2.1.1 半導体検出器の一般論

26 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
 27 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
 1 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
 2 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
 3 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
 4 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
 5 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
 6 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。電子は低い準位から順に占有される
 7 ため、価電子帯の準位は充満し、伝導帯には電子が一部のみ存在するかほとんど存在しない。

8 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
 9 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
 10 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
 11 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
 12 ンドギャップ E_g を超えるエネルギーを与え、価電子帯の電子が励起し伝導帯に移る。伝導帯の電子や価
 13 電子帯におけるホール（正孔）が結晶中で外部電場により自由に動くことができ、電流が流れる。半導体
 14 ではバンドギャップ $E_g \simeq 1 \text{ eV}$ である。 $T = 0 \text{ K}$ では、全ての電子は価電子帯にあり、伝導帯には電子
 15 は存在しない。室温 $T = 300 \text{ K}$ ではバンドギャップ E_g は熱エネルギー kT の数 10 倍であり、かなりの
 16 数の電子が価電子帯から伝導帯へ熱的に励起されている。そのため、半導体は低温では不良導体となり室
 17 温では導体となり電流を流すことができる。絶縁体は $E_g > 9 \text{ eV}$ と大きなバンドギャップを持つため、

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

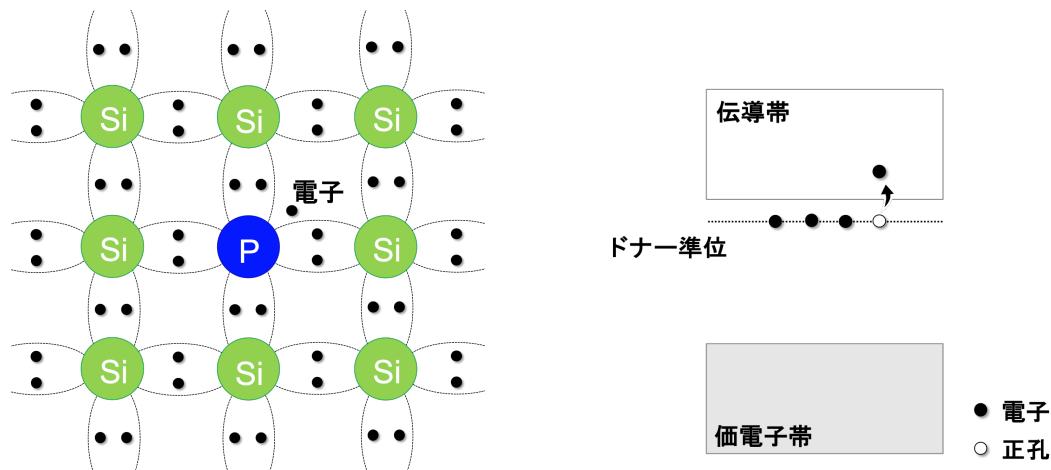


図 2.1 n 型半導体の結晶構造とバンド構造。

₁₈ 伝導帯にいる電子の数は非常に少なく電流は流れない。

₁₉ 2.1.2 n 型半導体と p 型半導体

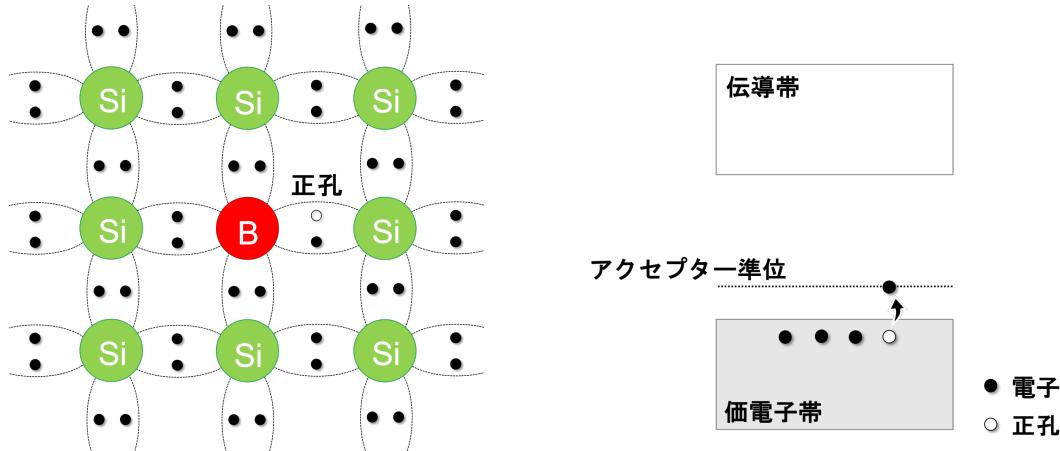
₂₀ 先述したように、半導体は常温で電導性を持つが、導体と比較すると伝導帯に存在する電子は少なく電
₂₁ 流は非常に小さい。そこで、半導体に不純物を少量添加することにより新たな準位が生じて禁制帯内に新
₂₂ たなバンド構造を作ることができる。添加する不純物の種類により、n 型半導体と p 型半導体に分類さ
₂₃ れる。

₂₄ 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
₂₅ ン (P) で置き換えた場合である。4 価の元素であるシリコンを 5 価のリンで置き換えることにより、価電
₁ 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
₂ 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
₃ る。添加された 5 価の元素のことをドナーと呼ぶ。

₄ 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
₅ ウ素 (B) で置き換えた場合である。4 価の元素であるシリコンを 3 価のホウ素で置き換えることにより、
₆ 価電子中の電子が不足し正孔が多くなる。これによって得られる正孔の結合エネルギーは、半導体のバン
₇ 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
₈ 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 価の
₉ 元素のことをアクセプターと呼ぶ。

₁₀ 2.1.3 半導体検出器の動作原理

₁₁ 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
₁₂ 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
₁ 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
₂ 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
₃ 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
₄ 由な電子や正孔は、拡散電位が作る電場 V_{bi} により空乏層領域外に移動する。この電荷による電位の変化
₅ を電気信号として読み出すのが半導体検出器である。



n型半導体 p型半導体



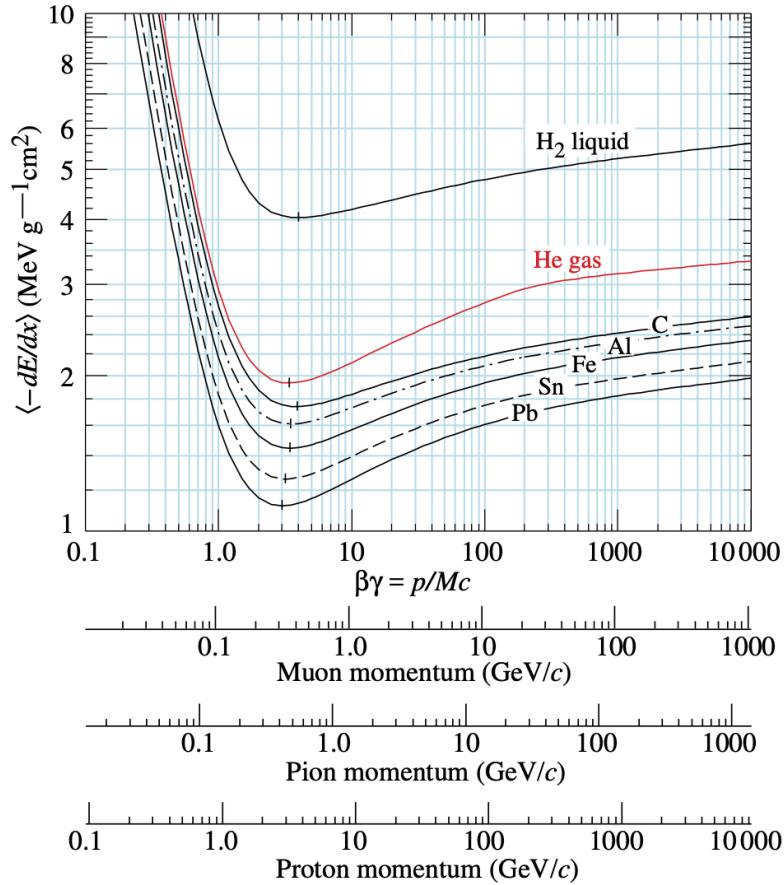
6 pn 接合から得られる空乏層幅は数 μm 程度である。さらに、拡散電位が作る電場では電荷収集に不十分であり、半導体検出器を飛跡検出器として使用するためにはより大きな電位と広い空乏層幅が必要である。そこで、空乏層幅を広げるために、半導体に外部電場をかける。
 7 空乏層幅 W とバイアス電圧 V の関係は式 (2.1) で表される。

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

10 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。
 11 $V > 0$ 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著しく異なる pn 接合を用いることが多い。よって式 (2.1) は式 (2.2) のように書き直すことができる。

$$W \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon}{eN} V} \quad (2.2)$$

2 ここで N は p 型と n 型の内、小さい方のドープ濃度である。このことから、検出器の空乏層幅は逆バイ
 3 アス電圧の平方根に比例することがわかる。

図 2.4 エネルギー損失と β の関係 [16]。

4 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。

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

5 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
6 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。 $\beta\gamma \approx 3$ あたりで、エネル
7 ギーは最小値に達する。エネルギー損失が最小となる粒子を MIP(Minimum Ionizing Particle) と言う。
8 $\beta\gamma \leq 4$ 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
9 ルギー損失は $1 \text{ MeVg}^{-1}\text{cm}^2$ と $2 \text{ MeVg}^{-1}\text{cm}^2$ の間にあることがわかる。

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
11 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
12 当たりに生成される電子正孔対の数は $\mathcal{O}(10) [\mu\text{m}^{-1}]$ 程度となる。

13 2.2 放射線損傷

14 ATLAS 実験において、シリコン検出器は、ビーム衝突点のすぐ近くに配置される。そのため、陽子衝
15 突から生成される多数の中し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
16 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。この節ではそれらにつ
17 いて説明する。

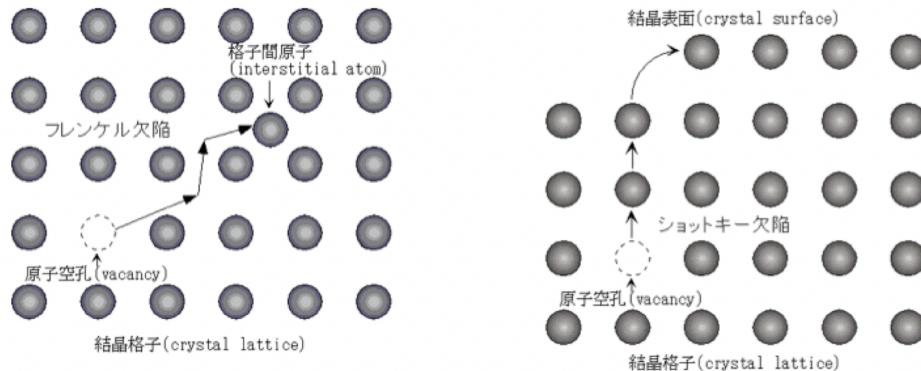


図 2.5 フレンケル欠陥とショットキーワー欠陥。

18 2.2.1 バルク損傷

19 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
20 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
21 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
22 る欠陥をショットキーワー欠陥と呼ぶ。図 2.5 にフレンケル欠陥とショットキーワー欠陥の概念図を示す。

23 フレンケル欠陥とショットキーワー欠陥はどちらも原子核欠損のため、p 型不純物として働く。これによ
1 り、検出器に以下のような影響を及ぼす。

- 2 ● 暗電流の増加

3 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
4 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
5 する。

- 6 ● バルクの型変換と全空乏化電圧の増加

7 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
1 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
2 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
3 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
4 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 ?? に示す。

5 2.2.2 表面損傷

6 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
7 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
8 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
9 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
10 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。

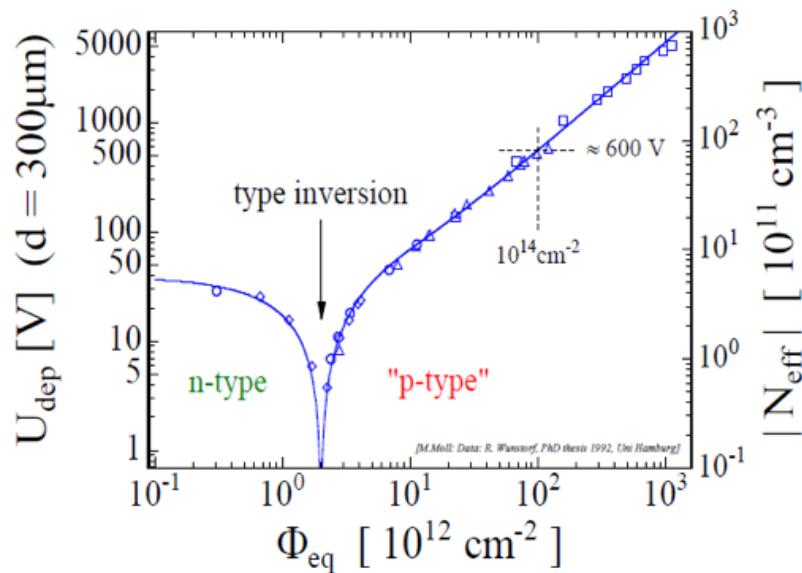


図 2.6 放射線損傷による型変換および全空乏化電圧の測定結果。

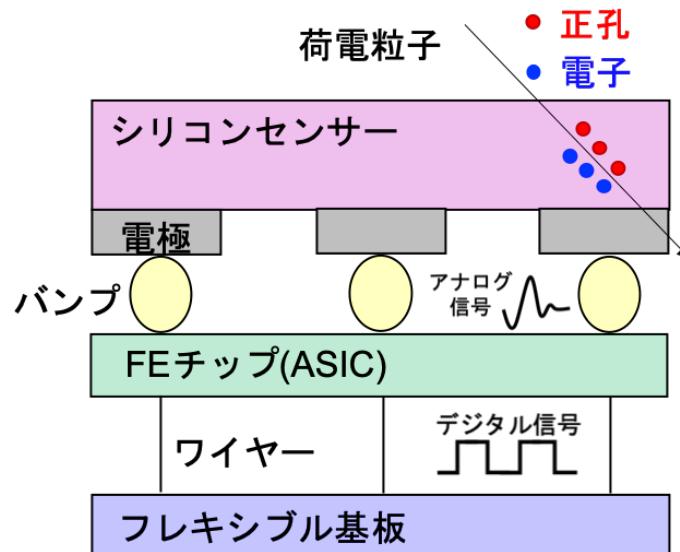


図 2.7 ピクセルモジュールの模式図。

11 2.3 ピクセル検出器

12 図 2.7 にピクセルモジュールの模式図を示す。ピクセルモジュールはシリコンセンサー、フロントエン
13 ド (FE) チップ、フレキシブル基板から構成される。この節ではそれについて説明する。

14 2.3.1 シリコンセンサー

15 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 2.8 にプラ
16 ナーセンサーと 3 センサーの模式図を示す。
17 プラナーセンサーは ATLAS 実装当時から導入されているセンサーであり、図 2.8 の左のようにセン

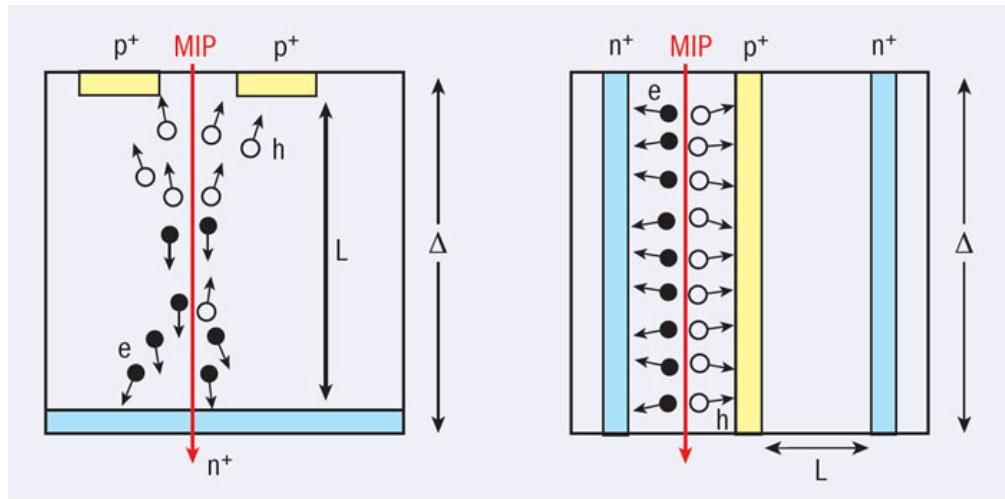


図 2.8 シリコンセンサーの模式図。

18 サーのバルク部の表面に n^+ 型半導体と p^+ 型半導体を埋め込んだ構造をしている。 n^+ 型半導体電極は
19 センサー面において格子状に配列し、それぞれの電極から独立した信号を読み出すことができる。IBL
20 およびピクセル検出器ではバルク部に n 型半導体を用いた、 n^+-in-n 型と呼ばれるものを用いている。
21 n^+-in-n 型の場合、空乏層は p^+ 型インプラントと n 型バルクの境界から成長する。そのため、荷電粒
22 子が空乏層を通過した際に信号を n^+ 電極において検知するためには、空乏領域を n^+ 電極まで広げる
23 必要があり、完全空乏化しなければならない。さらに、バルク部の n 型半導体は放射線損傷により p 型
24 に型変換を起こし、空乏化の挙動が変化する。HL-LHC では放射線損傷の影響がより大きくなることが
25 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、ITk では n^+-in-p 型のセンサーを用いる。
26 n^+-in-p 型の場合、空乏領域が n^+ 電極と p 型バルクの境界から空乏領域が成長するため、完全空乏化し
1 なくても荷電粒子の通過により生じる電子を検知することができる。 p 型半導体は放射線損傷により完全
2 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り、放射線による影響が大きくなるが、部分的に
3 空乏化による運用が可能なため放射線耐性を保つことができる。

4 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
5 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
6 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
7 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
8 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
9 である。

1 2.3.2 ASIC

2 ASIC(Application Specific Integrated Circuit) は特定用途向けに複数機能を実装した集積回路のこ
3 とである。センサーの電極で収集された電荷は、バンプを通って ASIC に送られる。ASIC では受け取っ
4 たアナログ信号を增幅、整形、デジタル処理を行い後段の読み出し基板に信号を送る。図 2.9 にセンサー
5 で発生した電荷が ASIC から読み出されるまでの概略図を示す。

6 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
7 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
8 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。

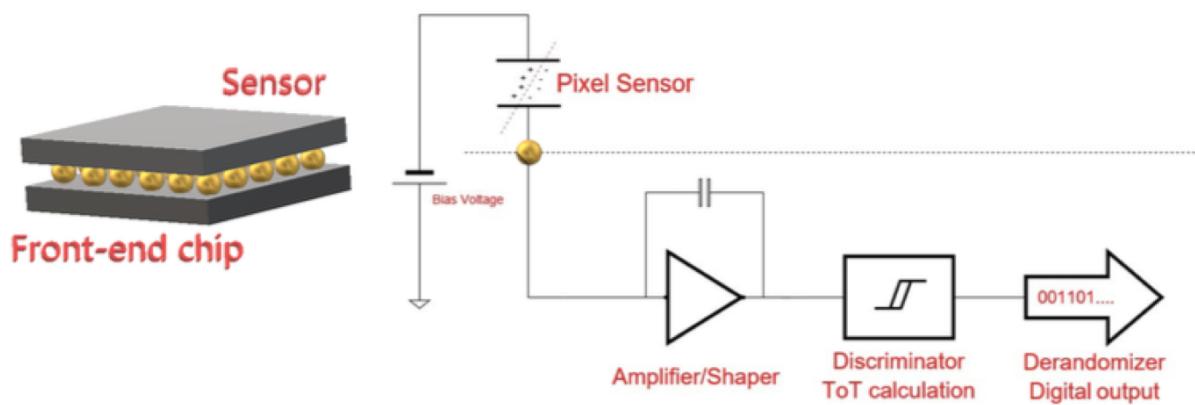


図 2.9 シリコンセンサーの模式図。

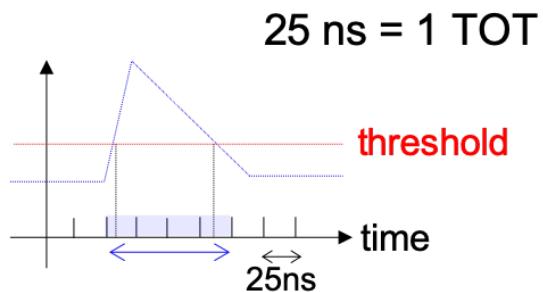


図 2.10 アナログ信号を ToT に変換する概念図。

- この電流から得られるアナログ信号を ASICにおいて増幅、整形を行う。アナログ信号はアンプ回路により増幅され、三角波になるよう波形整形が行われる。信号処理されたアナログ信号が Threshold を超えた時間幅を測定し、デジタル信号に変換する。このデジタル信号を **Time over Threshold (ToT)** と呼ぶ。アナログ信号を ToT に変換する概念図を図 2.10 に示す。時間幅は 25 ns 間隔のクロックの数で取得するため、デジタル信号として取得することができ、この信号が後段のフレキシブル基板へ転送される。
- ピクセル検出器では **FE-I3** という ASIC を用いている。さらに読み出し速度等の性能を向上させたものが、IBL に用いられている **FE-I4** である。また、HL-LHC アップグレードに向けて新たな ASIC の開発が進んでいる。ITk に搭載する新型 ASIC は ITk pix v2 と呼ばれており、プロトタイプである RD53^{*2} および ITk pix v1^{*3} の施設が進んでいる。それぞれの ASIC の主な仕様の比較を表 2.1 に示す。

^{*2} RD53A は試験・比較のための 3 種類のアナログ回路を持っている。

^{*3} ITk pix v1 は v2 と多くの特徴や機能が共通である。

表 2.1 各 ASIC の主な仕様。

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

9 第3章

10 現行ピクセルモジュールの電荷較正

11 本章では、ASIC 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
 12 荷に較正する方法について説明する。

13 3.1 アナログ回路

14 3.2 チューニング

15 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
 16 に ASIC のチューニングを行う。Threshold および任意の値に対する ToT の目標値をそれぞれ表 3.1、
 17 表 3.2 に示す。

表 3.1 各 Layer における Threshold の値。

Layer 名	2015 年 (4 fb^{-1})	2016 年 (39 fb^{-1})	2017 年 (50 fb^{-1})	2018 年 (63 fb^{-1})
IBL	2500 ($\text{ToT} > 2$)	2500 ($\text{ToT} > 2$)	2500 ($\text{ToT} > 2$)	2000 ($\text{ToT} > 2$)
B-Layer (中心付近)	3500 ($\text{ToT} > 3$)	3500 ($\text{ToT} > 3$)	5000 ($\text{ToT} > 5$)	4300 ($\text{ToT} > 3$)
B-Layer (前方付近)	3500 ($\text{ToT} > 3$)	3500 ($\text{ToT} > 3$)	5000 ($\text{ToT} > 5$)	5000 ($\text{ToT} > 5$)
Layer1	3500 ($\text{ToT} > 3$)	3500 ($\text{ToT} > 5$)	3500 ($\text{ToT} > 5$)	3500 ($\text{ToT} > 5$)
Layer2	3500 ($\text{ToT} > 3$)	3500 ($\text{ToT} > 5$)	3500 ($\text{ToT} > 5$)	3500 ($\text{ToT} > 5$)
Disk	3500 ($\text{ToT} > 3$)	3500 ($\text{ToT} > 5$)	4500 ($\text{ToT} > 8$)	3500 ($\text{ToT} > 5$)

表 3.2 各 Layer における ToT のチューニングの値。

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)	30ToT(20 ke)	30ToT(20 ke)	30ToT(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)

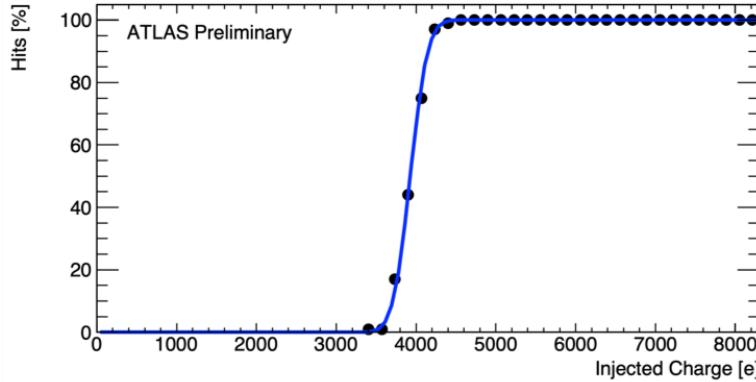


図 3.1 検出効率と試験電荷の関係。

18 チューニングには、ある ASIC 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
 19 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
 20 に、global チューニングを行い、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
 1 の段階では、全ピクセルから得られる分布の分散は大きいため、local チューニングを行い各ピクセルが
 2 返す値を目標値にさらに近づける。
 3 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。
 4 Threshold および ToT スキャンの方法を以下に述べる。

5 Threshold スキャン

6 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
 1 を増加させつつ検出効率を測定し、図 3.1 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
 2 カーブと呼ばれている。図 3.1 中の青線は S カーブふのフィッティングであり、式 (3.1) のような誤差関
 3 数を用いて定義される。

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

4 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 83.5% と
 5 16.5% となる試験電荷の幅をノイズと定義する。

6 ToT スキャン

7 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
 8 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
 9 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。

10 3.3 電荷較正

11 3.4 電荷較正における問題点

₁₂ 第4章

₁₃ 電荷補正の最適化

₁₄ 4.1 これまでの補正方法

₁₅ 4.2 電荷較正の補正

₁₆ 4.3 データが欠陥した際の補正

₁₇ 4.4 本章のまとめ

¹⁸ 第5章

¹⁹ 次世代ピクセル検出器の量産

²⁰ HL-LHC アップグレードに向けた内部飛跡検出器の総入れ替えのため、次世代ピクセル検出器の開発
²¹ が進められている。現在、ITk に搭載するピクセル検出器量産の各組み立て工程における試験やそのシス
²² テム確立のため、試作器を用いたデモンストレーションが行われている。

²³ 日本では新型器量産の際に約 2000 個のモジュールを生産する予定である。次世代ピクセル検出器の量
²⁴ 産の際に、効率の良い量産と統合されたピクセル検出器選定を行うため、品質試験結果を統合管理するシ
²⁵ ステムの開発が必要となる。

²⁶ 5.1 次世代ピクセル検出器の組み立て部品

¹ 量産工程は、各組み立て機間に届いたセンサーと ASIC から作られるペアモジュールとフレキシブル基
² 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。

³ 5.1.1 ペアモジュール

⁴ ペアモジュールはセンサーと ASIC をバンプ接合することにより作られる。クアッドモジュールではセ
⁵ ンサー 1 枚に対して ASIC 1 枚、トリプレットモジュールではセンサー 1 枚に対して ASIC 1 枚から構成
⁶ される。ペ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
⁷ 成し、それにより得られる信号を ASIC を用いて增幅・整形を行う。図 5.1 にペアモジュールの全体図を
⁸ 示す。

⁹ 5.1.2 フレキシブル基板

¹⁰ フレキシブル基板はセンサーの裏側(図 5.1 の上面)に接着、およびワイヤー配線により ASIC と電気
¹¹ 的に接続される。フレキシブル基板の全体図を図 5.2 に示す。フレキシブル基板は、以下の 3 つの役割を
¹² 持つ。

¹³ フレキシブル基板は、以下の 3 つの役割を持つ。

- ¹ ● ASIC からの信号輸送

² センサーから得られた信号は ASIC で増幅・整形され、フレキシブル基板に送られてくる。フレキ
³ シブル基板は送られてきた信号を後段の PC へ送る。

- ⁴ ● 電源の供給

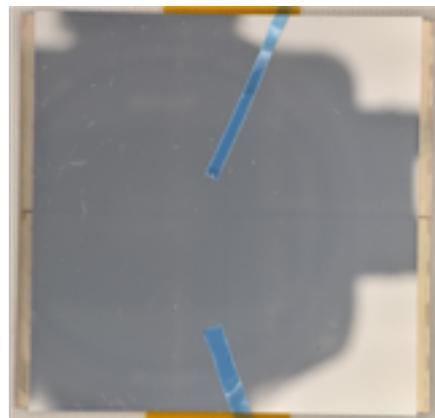


図 5.1 ベアモジュールの全体図。センサー側から見たものであり、左右に ASIC がはみ出している。これはフレキシブル基板につながるワイヤーのためのパッド部分である。

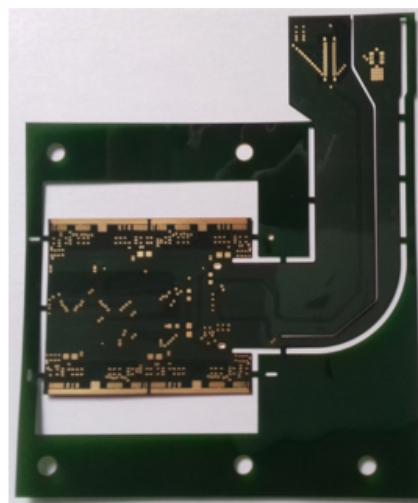


図 5.2 フレックス基板の全体図 [12]。

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

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

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

5.1.3 モジュールキャリア

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

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

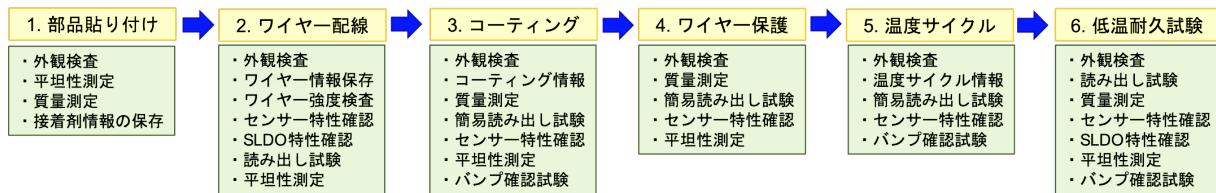


図 5.3 ピクセル検出器の組み立て工程。

¹⁸ 置^{*1}を用いて最低 $-45 [^{\circ}\text{C}]$ までモジュールの周囲温度を下げる。その際、ピクセル検出器に結露が発生すると損傷のリスクを伴う。そのため、キャリア内に乾燥窒素ガスを流し込むことで氷点下におけるピクセル検出器への結露を防いでいる。

5.2 次世代ピクセル検出器の組み立て工程

²² 次世代ピクセル検出器の組み立て工程を図 5.3 に示す。組み立て工程ではフレキシブル基板とベアモジュールの接着から始まり、ワイヤー配線、パリレン高分子によるコーティング、ワイヤー保護を行いピクセルモジュールが完成する。その後、温度サイクル試験および低温耐久試験において、運転時に想定される温度環境において組み立てたモジュールが運用できるかの試験を行う。本節では、組み立て工程、およびモジュールの温度耐久についての試験についての説明を示す。

ベアモジュール・フレキシブル基板の接合

³ モジュールの組み立て工程は、組み立て機間に輸送されたベアモジュールとフレキシブル基板の接合から始まる。輸送された各部品の受け取り時の品質試験を行った後、ベアモジュールとフレキシブル基板の接合を行う。専用治具を用いて行うことにより、フレックス基板の位置の交差は $\pm 50 \mu\text{m}$ 、平面度は $25 \mu\text{m}$ の精度で接合を行うことができる。

ワイヤーボンディング

⁸ フレキシブル基板と ASIC を電気的に接合し、電源の供給や、ASIC からの信号を読み出すため、フレキシブル基板と ASIC 間をワイヤーで接続する。この組み立て工程をワイヤーボンディングと呼ぶ。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。ワイヤーボンディング後からは、モジュールの電気的な読み出しが行うことができるため、これ以降の全ての組み立て工程では読み出し試験を行い正常に動作するかの確認を行う。

パリレンコーティング

¹⁴ モジュールのセンサーと ASIC の端の部分での放電を防ぐこと、湿気や化学物質からの保護を目的としてパリレンコーティングを行う。パリレンはパラキシリレン系ポリマーの略である。パリレンは結晶性が高く絶縁耐力に優れ、周波数に依存せず低い誘電率・誘電正接特性を持っており、湿気や腐食性ガスへの耐性も併せ持つ。

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

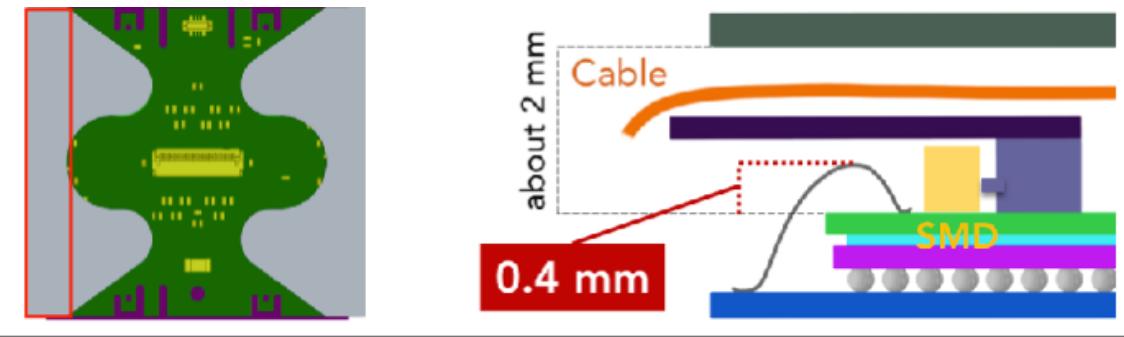


図 5.4 ワイヤー保護用の構造体。炭素系の素材である CFRP を用いて作成する。図を作る。

18 ワイヤー保護

19 ワイヤーは直径 25 μm と非常に細いため、力が加わると損傷してしまう可能性がある。特に、ITk を
20 実装する際にモジュールのケーブルがワイヤーに触れてしまい、読み出しが正常にできなくなる恐れがある。
21 このような問題を避けるため、図 5.4 に示すような構造体を用いて、ワイヤーを保護する。

22 温度サイクル

23 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
24 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
25 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
26 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 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
2 にさらされる。そのため、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、
3 $-55^\circ\text{C} < T < 60^\circ\text{C}$ の温度サイクルを 1 回を行う。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、ASIC 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。

6 低温耐久試験

7 ITk 運転におけるピクセル検出器の周囲温度は $-15^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$ である。組み立てたモジュールが
1 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
2 は、温度制御筐体を用いてモジュールの周囲温度を -15°C に保ちつつ ASIC の回路読み出し試験を行
3 う。読み出し試験は 1 時間に 1 度行われる。

4 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
5 の遠隔監視等の技術が必要となる。

6

7 To do: ITk 稼働の際にモジュール周囲温度が低い理由を二章に書く。

8 <https://arxiv.org/pdf/2003.00055.pdf>,

9 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/8/10/P10003/pdf>

10

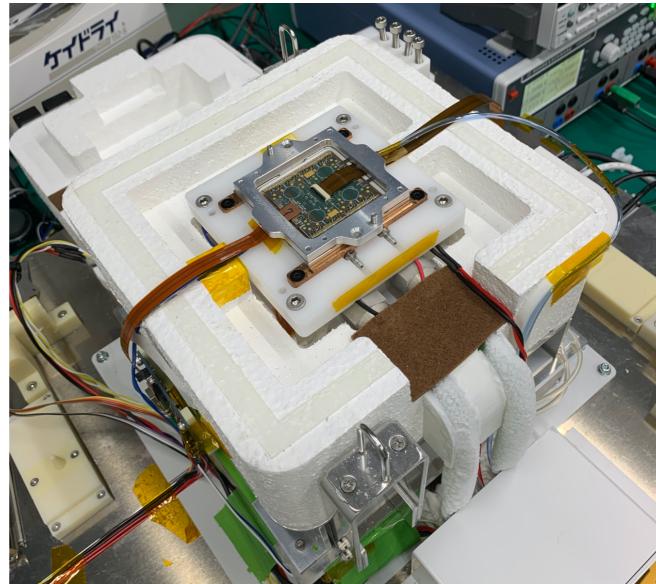


図 5.5 読み出し試験のセットアップ [7]

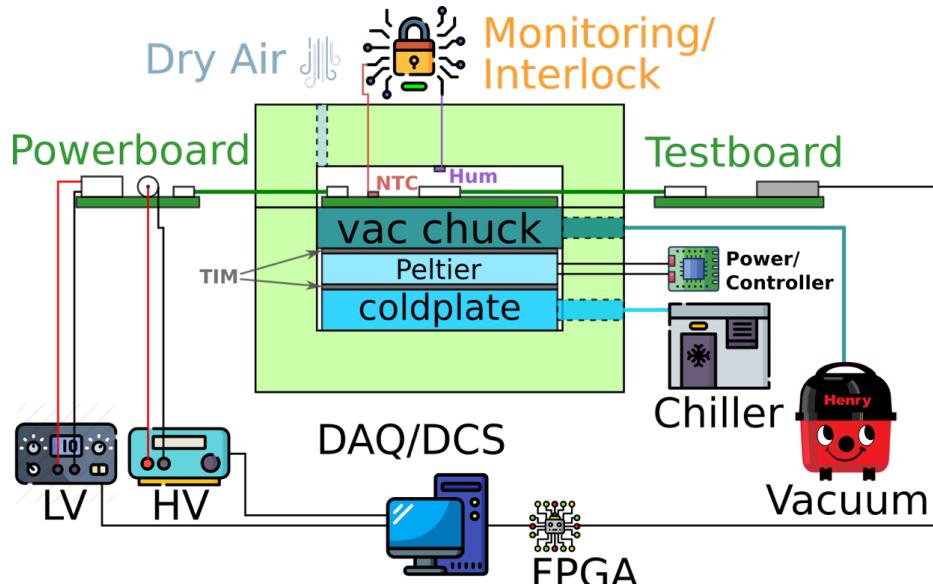


図 5.6 読み出し試験の全体図 [7]

11 5.3 品質試験

12 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
13 う。図 5.3 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、ASIC の回路読み出し試験は
14 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。

15 5.3.1 外観検査

16 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
17 とを目視で確認する。特に、ASIC とフレックス基板を電気的に接合するためのワイヤーの接着位置が正

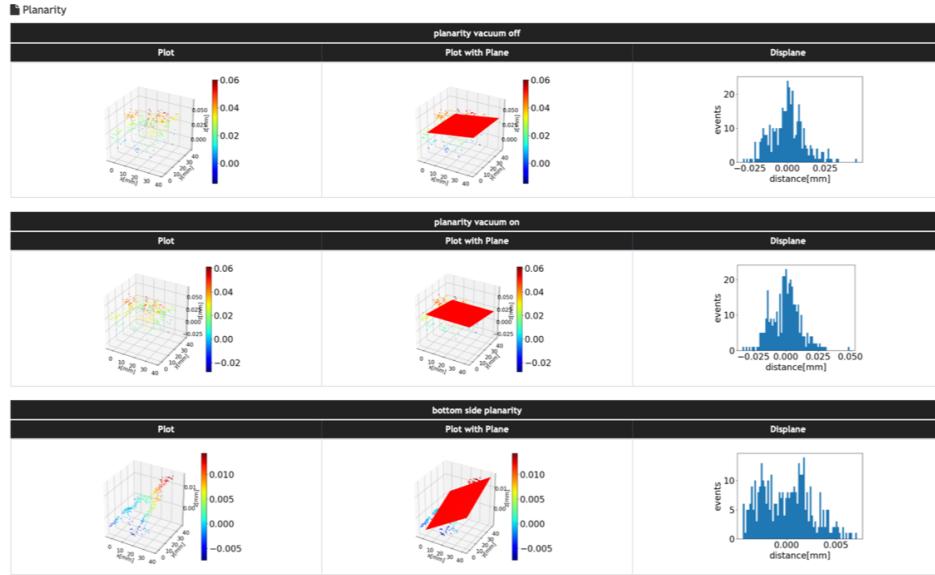


図 5.7 平坦性測定の結果

18 しいか、断線がないかを確認することが重要である。目視で確認する際は、モジュール全体の高解像度画
19 像を 36(縦横 6×6) 分割して得られる拡大画像を用いて細かく検査を行う。また、ワイヤー部分について
1 は約 500 本のワイヤーを目視で漏れなく検査することは困難且つ労力を伴うため、ワイヤーの断線や接続
2 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。

3 5.3.2 平坦性測定

4 モジュール上の 3 次元位置座標を取得することにより、歪み具合を計算することができる。図 5.7 に平
5 坦性測定結果を示す。

6 5.3.3 質量測定

7 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
8 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。

9 5.3.4 センサー IV 特性

10 センサーの電流-電圧特性を調べることにより、モジュール製造工程におけるセンサーの損傷や HV の
11 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、leakage current が 80 V で $2 \mu\text{A}$ 、降伏電圧
12 が 120 V、3D センサーについては leakage current が 25 V で $2 \mu\text{A}$ 、降伏電圧が 35 V 程度となるのが
13 想定される結果である。また、測定は ASIC からの消費電力による発熱を避けるため、ASIC への LV
14 を切った状態で行われる。Todo: 2 章を書きつつ、センサーの詳細を調べ直す。

1 5.3.5 SLDO VI 特性

2 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
3 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。ASIC 回路内部で一定の電圧

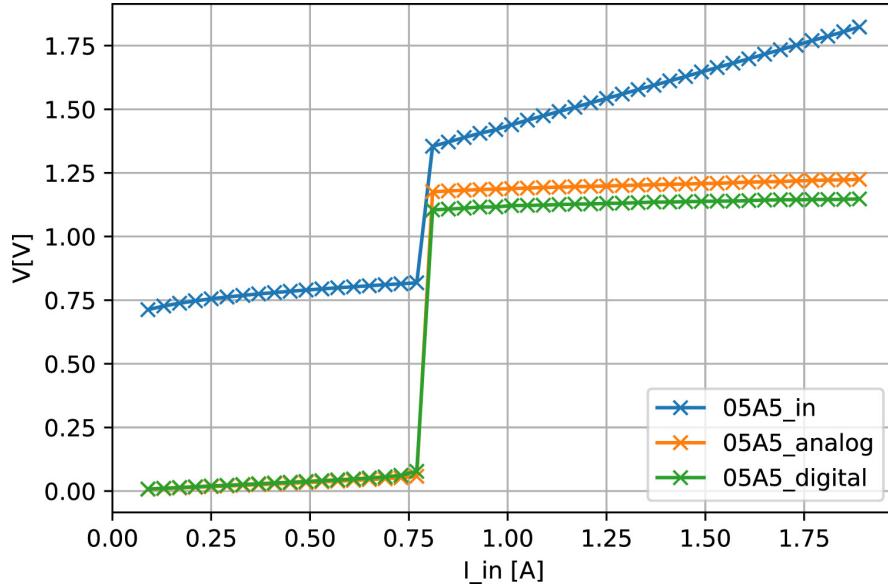


図 5.8 SLDOVI

- 4 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
5 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。
6 ASIC 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
7 用に用いる。図 5.8 に ASIC 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
8 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
9 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。
- 10 さらに、SLDO VI 特性についての品質試験を行う際には、ASIC が低温においても正常に動作するか
11 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
12 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。

表 5.1 Start at temperature criteria [17]

Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	Grade
-35	1
$-35 < T \leq -20$	2
$-20 < T \leq -5$	3
$-5 < T \leq 10$	4
$10 < T$	5

13

14 5.3.6 読み出し試験 [18]

- 15 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
16 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
17 同様に図 5.5 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

18 -35°C (正常に起動できない場合は 15°C ずつ温度を上げて試験)、Threshold 測定や ToT 測定等の通常の読み出し試験では $-20^{\circ}\text{C}, 20^{\circ}\text{C}$ である。

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

23 ● Digital scan

24 Digital 回路の応答を確認する。

25 ● Analog scan

26 Analog 回路の応答を確認する。

1 ● Threshold scan

2 Threshold を確認する。

3 ● ToT scan

4 ToT を確認する。

5 ● Noise scan

6 Noise を確認する。

7 ● Source scan

8 放射線を照射し、応答を確認する。

9 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。

10 ● Global threshold tuning

11 ASIC 全体のピクセルにおける Threshold を一括チューニングする。

12 ● Pixel threshold tuning

13 各ピクセル毎に Threshold 値チューニングする。

14 ● Global ToT tuning

15 ASIC 全体のピクセルにおける ToT 値を一括チューニングする。

16 ● Pixel ToT tuning

17 各ピクセル毎に ToT 値をチューニングする。

表 5.2 Powering overview for the on-detector system [12]

on-module	Nominal LV current per module	5.6 A
	LV nominal	1.4 V
	Nominal Power per module	7.85 W
	Chip power per area	0.5 W/cm ²
	Sensor power per area	< 0.1 W/cm ²
DCS power		0.15-0.28 W per quad module
Cooling system capability		0.7 W/cm ²

表 5.3 Pixel Failure Categories

Failure Name	Scan Type	Criteria
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

18 5.3.7 モジュール特性

19 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。

- 20 • FE chip version

21 モジュールの部品となっている ASIC 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。

- 2 • Thickness

3 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
1 ぞれセンサーの厚みが 150 μm と 300 μm である。

- 2 • Roof

3 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。

- 4 • IrefTrim

5 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
6 4 μA の電流を生成する。IrefTrim はワイヤー接合の際に 4bit の値で決められる。

- 7 • Pull-up register

8 Compare VREF_A_Trim at DAC count 16 with VDDA on hybrid after power-up

9 For the chip to start up, VDDA \approx 1.14A

10 If this is lower, you need to add a pull-up resistor!

11 NTC に関係がある？

12 表 5.4

- 13 • PCB-Bare Orientation

14 フレックス基板とペアモジュール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。

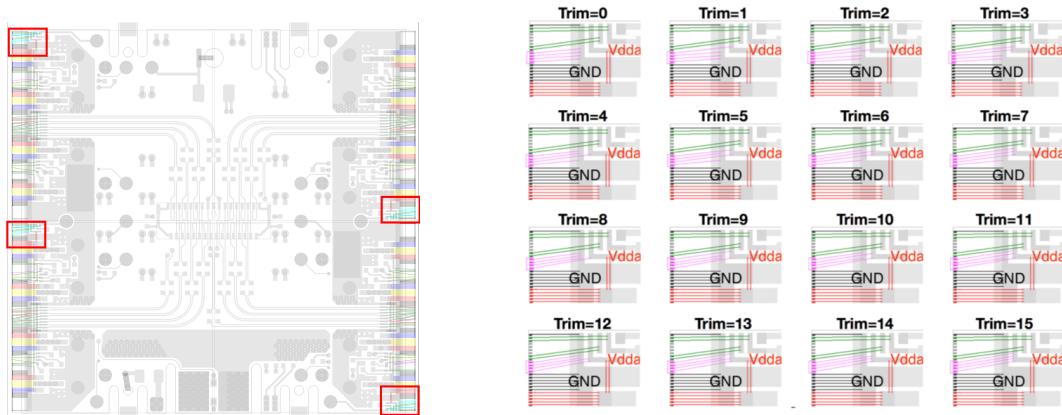


図 5.9 クアッドモジュールの Iref/Irim 部分を表す部分(左図)とワイヤーの配線と Iref 値の関係。ピンク色のワイヤーの配置により 4bit の Iref 値を表すことができる。

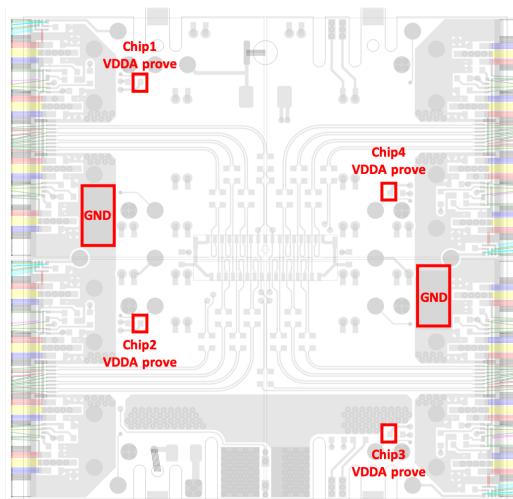


図 5.10 Pull-up Register

¹⁵ Iref Trim

¹⁶ ワイヤーボンディング後に、Iref Trim 値を確認する。

¹⁷ Pull-up Register

表 5.4 Pull-up Grade

Start-up VDDA [V]	Pull-up Resistor が必要か	Pull-up Resistor の値 [Ω]	VDDA no zouka
$V_{DDA} \leq 1.09$	Yes	150	0.1
$1.09 < V_{DDA} \leq 1.14$	Yes	300	0.05
$1.14 < V_{DDA}$	No	n/a	n/a

18 Bare PCB Orientation

19 ベアモジュールの見た目は図 5.1 のように、 180° 回転対称になっている。そのため、フレックス基板と
20 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、
21 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
22 基板の向きについての特性を書き直す必要がある。

23 **5.4 量産における試験結果管理**

24 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
25 験を行う。試験項目によって結果データの形式は異なる。各品質試験のデータの形式およびデータサイズ
26 を表 5.5 に示す。品質試験結果に加えて、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

表 5.5 品質試験のデータ

試験項目	内容	データ形式	データサイズ
読み出し試験	ASIC 上の各ピクセルの結果	JSON file	629 MB

26 のデータも適切に管理する必要がある。

27 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
28 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
29 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。KEK に
30 おける量産についてデータサイズは ?? TB になると想定される

31 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
32 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
33 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、
34 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
35 管理すると以下のような問題が想定される。

4 ● データの不整合

5 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
6 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
7 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
8 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
9 だけ整形しなければならないため非常に面倒である。

10 ● データの重複

11 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
12 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
13 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
14 ある。

15 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
16 として、データベースシステムの開発を行っている。

- 6 このシステムについて、次章において説明する。

7 第6章

8 モジュール量産におけるデータベースシ 9 ステム

10 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
11 テムを開発している。

12 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。

13 6.1 量産に用いるデータベースの概要

14 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
15 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
16 タベースとローカルデータベースの関係を図 6.1 に示す。

17 本節ではそれについての概要を示す。

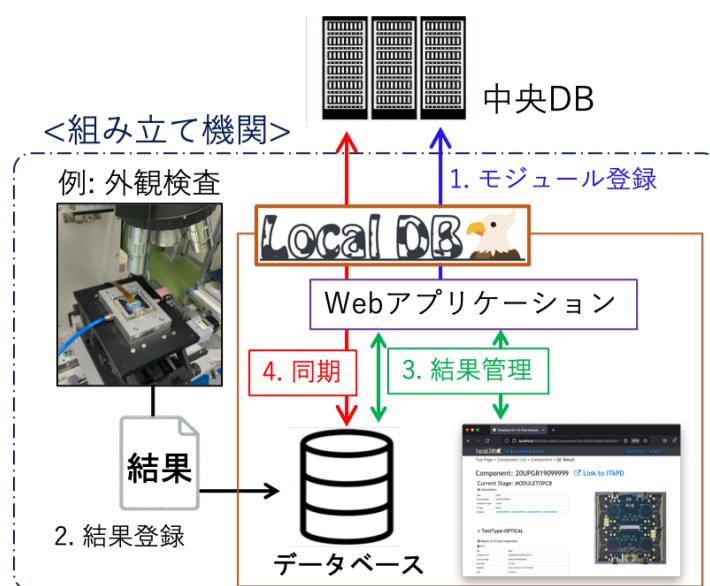


図 6.1 中央データベースとローカルデータベース

18 6.1.1 中央データベース

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

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

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

32 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。運転前後の読み出し試験やその他の試験の結果の比較を行うことにより、センサーへの放射線損傷や不良ピクセルの推移等を確認することができる。ITk は約 10 年間の運転が予定されており、少なくとも 20 年間は検出器についてのデータが利用できるようにしておく予定である。

1 6.1.2 ローカルデータベース

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

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

- 11 • 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。
- 12 • ピクセル検出器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。
- 13 • 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。

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

16 6.2 ローカルデータベースの構造

17 ローカルデータベースの構造の全体像を図 ?? に示す。ローカルデータベース

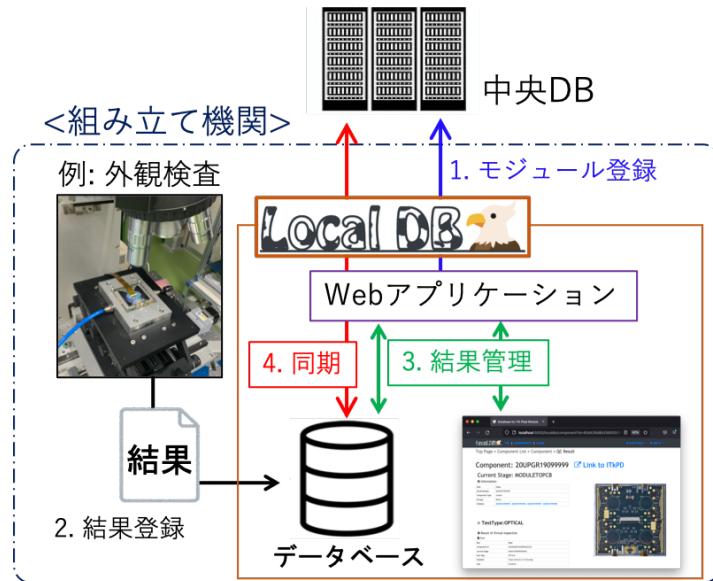


図 6.2 品質試験結果を操作するシステムの全体像

18 6.2.1 MongoDB[19]

19 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、オーブ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うが、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。

3 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。図 ??に MongoDB のデータを保管するための概念図を示す。

8 各ドキュメントは ObjectId という 12 byte の ID によって管理される。Object 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 Object 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、Object 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紐付けを行い、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

```
14 _____
15 1 {
16 2 {
17 3   "_id": ObjectId("6038c960b9a87924947df638"),
```

*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。

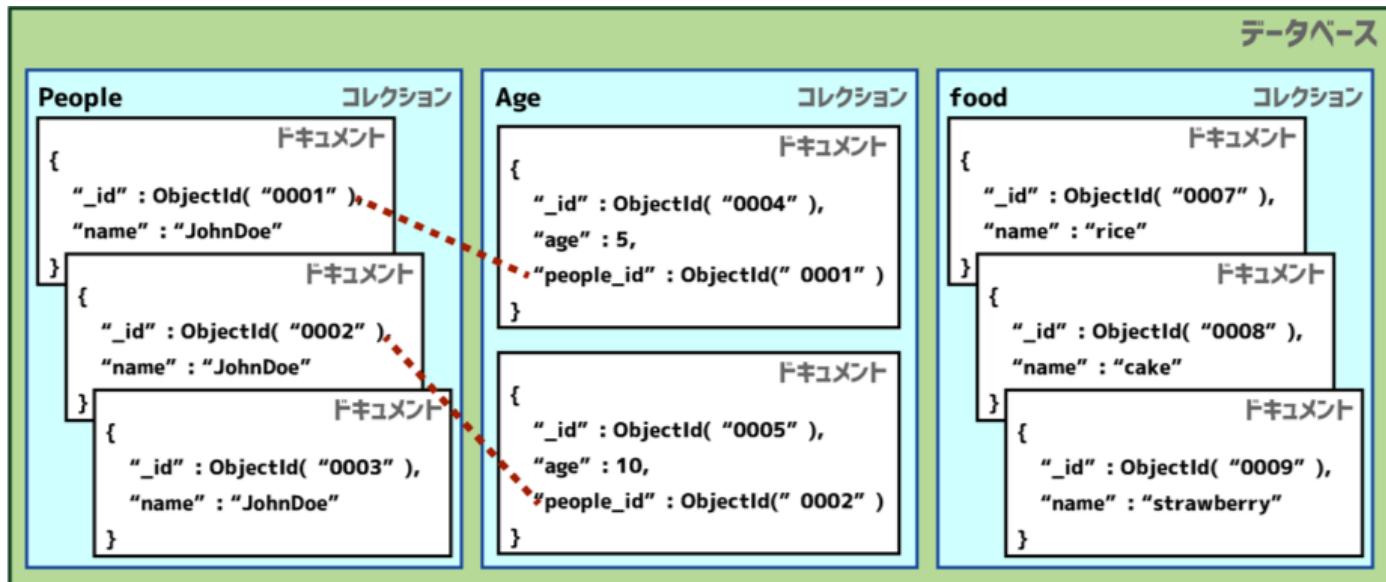


図 6.3 MongoDB の全体像

```

18     4      "year": 2015,
19     5      "title": "The_Big_New_Movie",
20     6      "info": [
21     7          "plot": "Nothing_happens_at_all.",
22     8          "rating": 0
23     9      }
24    10  }
25  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。

- JSON 形式でデータを保持するため整形が容易である。

We love JSON format.

- 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

表 6.1 ローカルデータベースのコレクション [2]

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	登録ユーザの情報
	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

- ¹⁸ 検出器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、
¹ 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
² 検出器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。
³ 各コレクション間の関係を図 6.4 に示す。

⁴ 6.2.2 ウェブアプリケーション

⁵ 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
⁶ 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
⁷ 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
⁸ 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
¹ 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
² 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。
³ ウェブアプリケーションの処理を図 6.5、ブラウザ上の表示を図 6.6 に示す。利用者が見るウェブブラ
⁴ 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
⁵ 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
⁶ 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
⁷ を用いている。また、ウェブブラウザにおいて、動的な処理を行う際には JavaScript を利用している。
⁸ 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
⁹ きるように設計している。

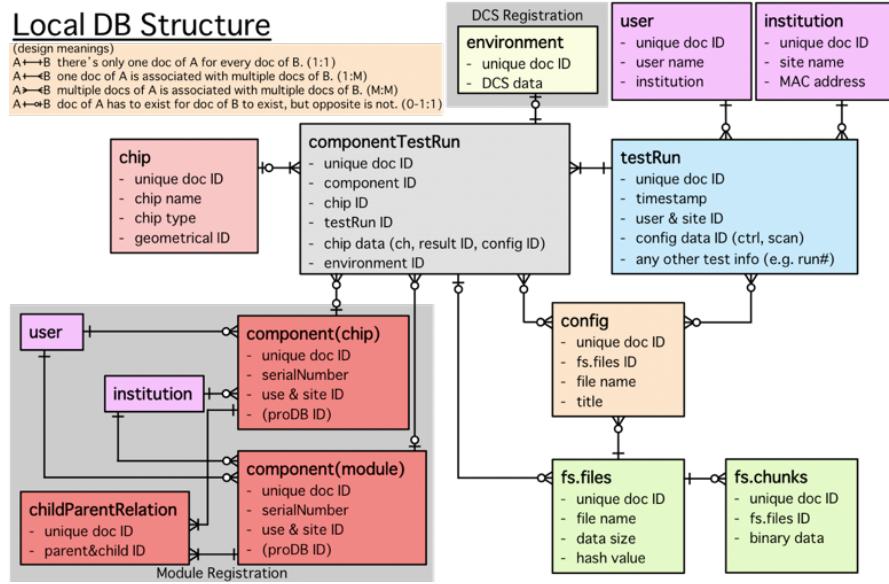


図 6.4 ローカルデータベースの構造

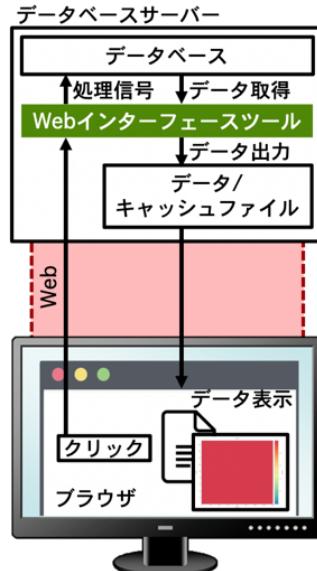


図 6.5 ローカルデータベースシステムの全体像

6.3 モジュールの品質試験に必要な開発項目

10 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
11 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。

12 1. データベース構造の設計

13 図 6.4 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
14 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 [4, 3] によって定義され、非読
15 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
16 行った奥山氏と私が開発を行った。

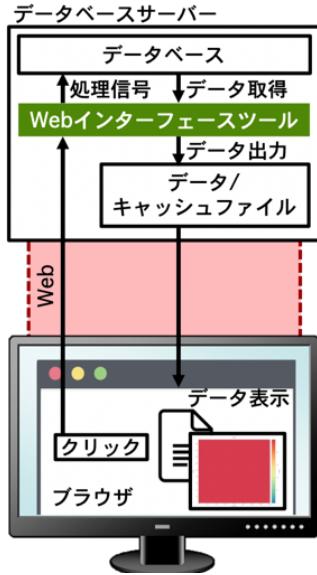


図 6.6 ローカルデータベースシステムの全体像

2. 試験結果管理機能

2-1. 読み出し試験

読み出し試験の結果の閲覧および解析機能は先行研究 [2, 3] によって開発が行われた。読み出し試験はピクセルの読み出し性能の不良判定するのに重要な試験であり、各組み立て工程で品質に変化がないこと、あるいは不良ピクセルが発生した際にどの工程で問題があったかを発見することが重要である。本研究では、各工程間で評価できる機能を追加した。これについて 7.1 に示す。

2-2. 非読み出し試験

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。閲覧機能について、7.1 に示す。

3. モジュール組み立て工程管理機能

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

4. 中央データベースとの同期機能

これまで、モジュールを中央データベースからダウンロードする機能、および読み出し試験の結果を中央データベースと同期する機能の開発が先行研究 [2] によって行われてきた。しかし、モジュールを中央データベースへ登録、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。

18 第7章

19 試験結果データ管理システムの開発

20 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、ピクセル検出器の品質管理の
 21 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示す。

- 22 1. 品質試験結果の表示機能 (7.1)
 - 23 – 非読み出し試験結果の閲覧機能
 - 24 – ピクセル検出器特性の閲覧機能
 - 25 – 読み出し試験結果比較機能
- 26 2. 品質試験結果の管理機能 (7.2)
 - 27 – 組み立て工程管理機能の改良
- 1 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)
 - 2 – ピクセル検出器情報の登録機能
 - 3 – 品質試験結果のアップロード機能
 - 4 – 品質試験結果のダウンロード機能

5 7.1 品質試験結果の表示機能

6 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
 7 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
 8 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、非読み出し試験結果登録用
 9 GUI の開発者と協力し、ローカルデータベース内でのデータの保管方法と結果の閲覧機能の開発を行っ
 10 た。さらに、先行研究で開発された読み出し試験結果の解析機能を拡張し、別の試験結果と比較する機能
 11 の開発を行った。

12 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。

13 7.1.1 非読み出し試験結果閲覧機能の概要

14 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
 15 る機能は未実装であった。ピクセル検出器次世代器量産における品質試験を管理するためには、非
 16 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
 17 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

18 行った。以下に詳細を示す。

19 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。
 20 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。

```

21 1 {
22 2   "_id" : ObjectId("6131a0532e16df12955d9c6d"),
23 3   "component" : "60b9dc51d978dc000b9232fc",
24 4   "user" : "kinoshita",
25 5   "address" : "Tokyo\u2022Institute\u2022of\u2022Technology",
26 6   "currentStage" : "MODULETOPCB",
27 7   "testType" : "MASS",
28 8   "sys" : {
29 9     "cts" : ISODate("2021-09-03T04:10:57.338Z"),
30 10    "mts" : ISODate("2021-09-03T04:10:57.338Z"),
31 11    "rev" : 0
32 12  },
33 13  "results" : {
34 14    "property" : {
35 15      "Scale_accuracy" : 0.5,
36 16      "Scale_accuracy_unit" : "g"
37 17    },
38 18    "mass_value" : 1,
39 19    "mass_unit" : "g",
40 20    "comment" : "hoge"
41 21  },
42 22  "dbVersion" : 1.01
43 23 }
```

4 先述したように非読み出し試験の結果は QC-helper によって MongoDB に登録される。全ての品質試
 5 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
 6 に格納するパラメータが異なる。

7 画像や JSON file 等のファイルデータの保存は GridFS[19] と呼ばれるインターフェースが使用さ
 8 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
 9 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
 10 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、
 11 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
 12 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
 13 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
 14 付けを行っている。

15 7.1.2 非読み出し試験結果閲覧機能

16 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
 17 ように、各ピクセル検出器のページ（図 7.1 の左）の下部に登録した品質試験結果の一覧を表示する。こ

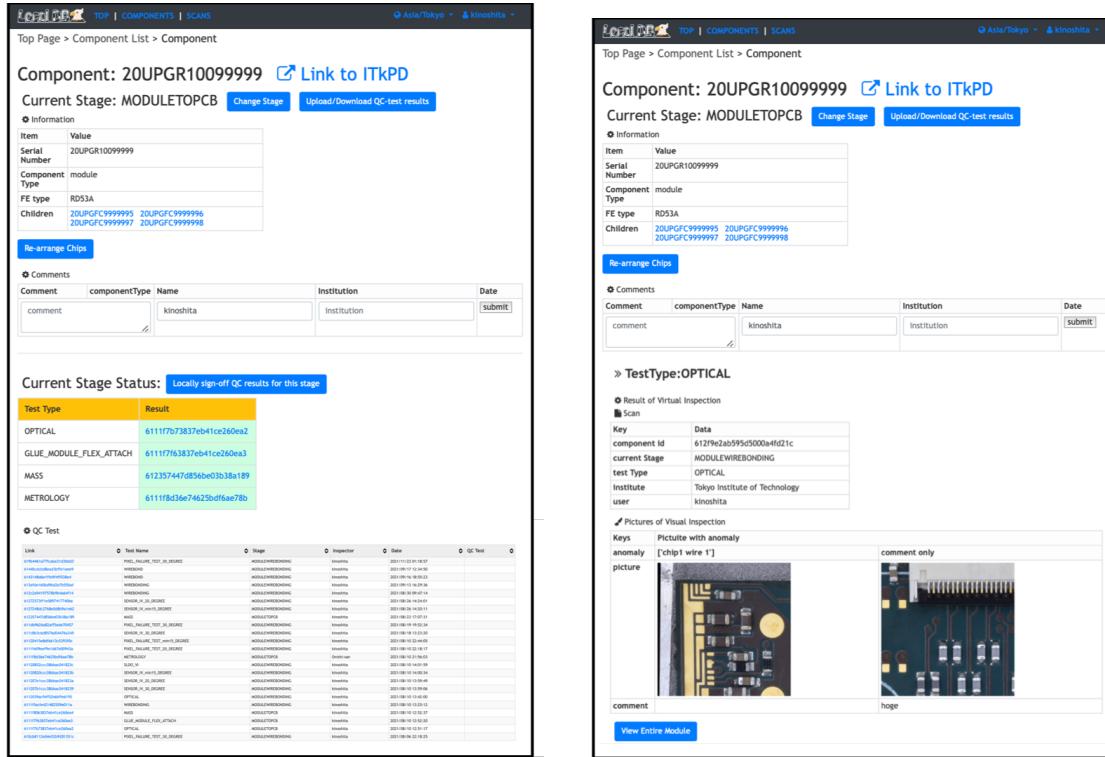


図 7.1 非読み出し試験結果のブラウザ出力。

18 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能
19 にするため、JavaScript を利用し動的に処理できるようにした。項目名をクリックするとソートすること
20 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。

1 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
2 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
3 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
4 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
5 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
6 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
7 の品質試験結果の表示画面については付録 A.1 にまとめた。

8 7.1.3 ピクセル検出器特性閲覧機能

9 ピクセル検出器の基本特性について、Iref 値や Pull-up 抵抗値はワイヤー配線後に初めて確認できる。
10 そのため、組み立て工程の途中で情報を更新する必要があり、ローカルデータベースへの基本特性の更新
11 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
12 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。
13 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
14 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
15 にまとめた。

Code 7.2 ピクセル検出器の基本特定更新情報を表すドキュメント。

16
17 1 {

```
18     2   "_id" : ObjectId("613ec032f5194763373ddad1"),
19     3   "component" : "6138924058c2e3000a0db59d",
20     4   "user" : "kinoshita",
21     5   "address" : "Tokyo\u2014Institute\u2014of\u2014Technology",
22     6   "currentStage" : "MODULEWIREBONDING",
23     7   "testType" : "IREFTRIM_FE",
24     8   "sys" : {
25       9   "cts" : ISODate("2021-09-13T03:06:25.499Z"),
26      10   "mts" : ISODate("2021-09-13T03:06:25.499Z"),
27      11   "rev" : 0
28    },
29   13   "results" : {
30     14   "value" : {
31       15   "chip1" : "1000",
32       16   "chip2" : "1000",
33       17   "chip3" : "1000",
34       18   "chip4" : "1000"
35     },
36     20   "comment" : "hoge"
37   },
38   22   "dbVersion" : 1.01
39 }
40 
```

1 7.1.4 読み出し試験結果比較機能

2 読み出し試験は組み立てたピクセル検出器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
3 正常に動作していることを確認する必要がある。表 5.3 に基づきピクセル応答評価機能が先行研究 [2] に
4 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。

- 5 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
- 6 2. キャッシュディレクトリに生成されたファイルを読み込み、
- 7 3. 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 に
8 まとめる
- 9 4. after_analysis.root にまとめられた結果を PNG の画像に変換し出力

10 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
11 めに CERN が提供している解析フレームワークである ROOT を使用している。ROOT を用いて作成し
12 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
13 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
14 ピクセルの分布を図 7.3 に示す。

15 7.2 品質試験結果の管理機能

16 ローカルデータベースの中でピクセル検出器の組み立て工程の管理及び各工程に対応する品質試験の選
17 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検出器が中央データベースで定義された

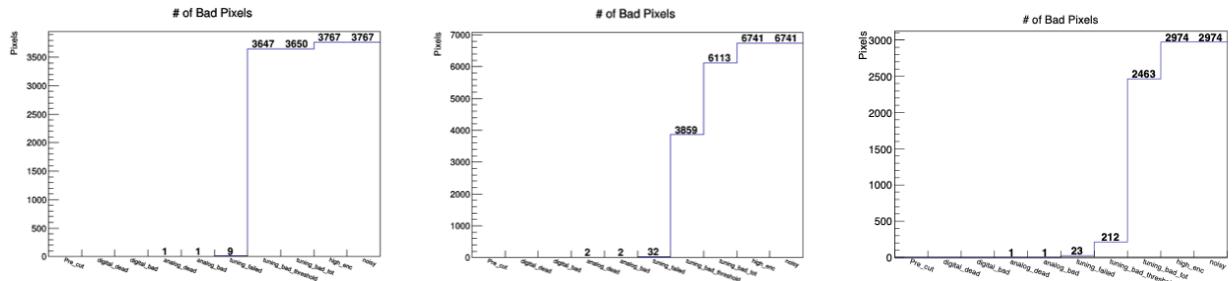


図 7.2 ピクセル応答評価機能を用いて作成したピクセル解析結果(左・中央)と2つの差分を用いた比較結果。横軸は評価基準、縦軸は該当する不良ピクセル数を表す。

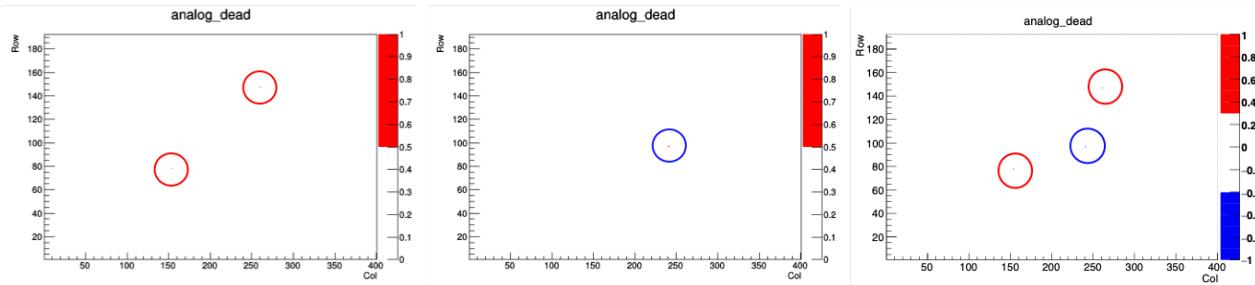


図 7.3 ピクセル解析結果における不良ピクセルの分布(左・中央)と2つの差分を用いた比較結果。各図は二次元ヒストограмであり、横軸はASICにおける各ピクセルの列番号、縦軸は行番号を示している。

18 枠組みに準拠して、組み立て工程および品質試験を適切に行うことを目指し開発が進められている。さらに、測定の失敗などでローカルデータベースに保存された不要な品質試験結果を中央データベースに同期しないために、本結果を1つ選択する必要がある。このような機能も先行研究によって開発が進められてきた。

22 先行研究において開発されたピクセル検出器の組み立て工程に対して結果を選択する機能の流れを図 7.4 に示す。

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

Code 7.3 ピクセル検出器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     1 {
6
7         2   "component": "5fa79114e615fa000a1a5976",
8
9         3   "currentStage" : "MODULEWIREBONDPROTECTION",
10
11        4   "QC_results" : {
12
13           5     "MODULETOPCB" : {
14
15               6       "OPTICAL" : "6111f7b73837eb41ce260ea2",
16
17               7       "GLUE_MODULE_FLEX_ATTACH" : "6111f7f63837eb41ce260ea3",
18
19               8       "MASS" : "612357447d856be03b38a189",
20
21               9       "METROLOGY" : "6111f8d36e74625bdf6ae78b"
22
23           10 },
24
25           11   "MODULEWIREBONDING" : {
26
27               12     "WIREBONDING" : "613efde160bd9bd2e7b55baf",
28
29               13     "WIREBOND" : "61440cdcbd8ead3bfffe1eee9",
30
31           14 }
32
33       15 }
34
35   16 }
```

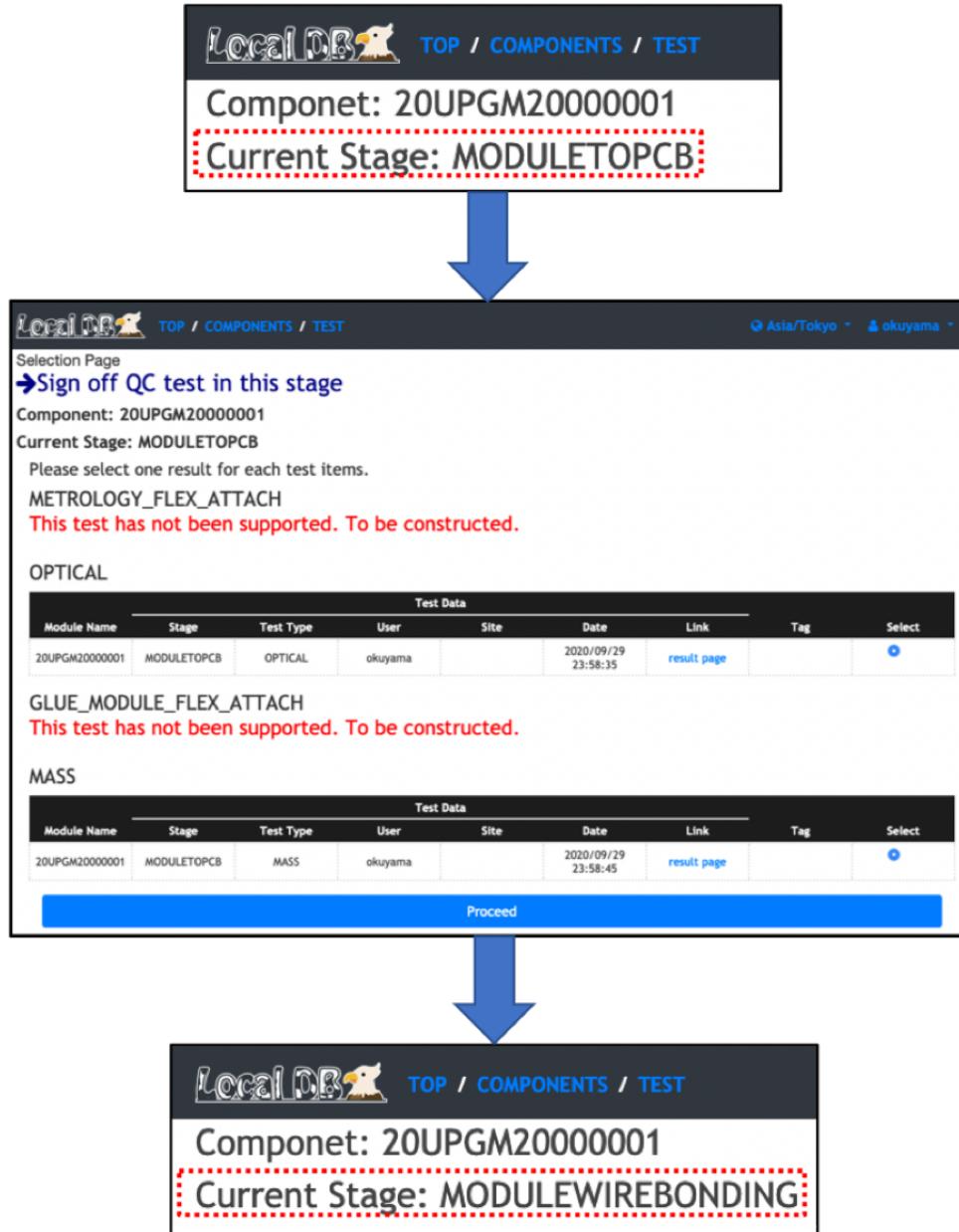


図 7.4 結果選択画面及び組み立て工程表示の例 [2]。図の上部で組み立て工程が “MODULETOPCB” である。図の中部において品質試験結果選択処理を行なっており、この図では “OPTICAL” と “MASS” の結果を選択している。この時、ローカルデータベース内部では選択された結果にタグ付けがなされる。これらの結果は中央データベースと同期される。また結果選択後は組み立て工程が自動的に更新される。図の下部では” MODULEWIREBONDING” になっていることが分かる。

```

10      14      "OPTICAL" : "6112039ac94f52b6bffe6193",
11      15      "SENSOR_IV_30_DEGREE" : "611c8b3c6d8576d04476a345",
12      16      "SENSOR_IV_20_DEGREE" : "61272573ff1e5897417740be",
13      17      "SENSOR_IV_min15_DEGREE" : "6127248dc2768e0d8b9a1e62",
14      18      "SLDO_VI" : "61120852ccc38bbac041823c",
15      19      "PIXEL_FAILURE_TEST_30_DEGREE" : "619b4461a77fcabe31d3bbd3",
16      20      "PIXEL_FAILURE_TEST_20_DEGREE" : "6111fe09eef9e1d67e00943a",
17      21      "PIXEL_FAILURE_TEST_min15_DEGREE" : "61120415e8df6613c5393f0c"

```

```

18    22      },
19    23      "MODULEWIREBONDPROTECTION" : {
20    24          "POTTING" : "-1",
21    25          "OPTICAL" : "-1",
22    26          "MASS" : "-1",
23    27          "SENSOR_IV" : "-1",
24    28          "REGISTER_TEST" : "-1",
25    29          "READOUT_IN_BASIC_ELECTRICAL_TEST" : "-1"
26    30      }
27    31  }
28  32 }
```

30 QC.module.status のドキュメントはピクセル検出器ごとに作成される。ドキュメント内の”currentStage”にそのピクセル検出器の現在の工程についての情報を保持し、図 7.4 で選択した結果
31 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
32 との関連付けを行っている。

33 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検出器特性についての管理機能は未実装であった。先行研究で開発された選択機能を改良し、ピクセル検出器特性を選択する機能の開発を行った。本研究で開発した機能を以下に示す。

37 7.2.1 ピクセル検出器特性の選択機能

38 ワイヤー配線後に決まるピクセル検出器の基本特性を管理するために、MongoDB 内に新たなコレ
39 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、
40 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
41 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
42 ドキュメントとの関連付けを行う。

Code 7.4 ピクセル検出器の組み立て工程を管理するためのドキュメントの一部。

```

1   1  {
2   2      "_id" : ObjectId("611a1c039c1b5786d950a17c"),
3   3      "proddbVersion" : 1.02,
4   4      "component" : "60d426d8b33600000af63e5b",
5   5      "currentStage" : "MODULEWIREBONDING",
6   6      "status" : "created",
7   7      "QC_properties" : {
8   8          "RD53A_PULL-UP_RESISTOR" : "61120d26ccc38bbac0418240",
9   9          "IREFTRIM_FE" : "61120c00ccc38bbac041823e",
10 10          "ORIENTATION" : "61120c0fccc38bbac041823f"
11 11      }
12 12  }
13 13 }
```

15 図 7.4 に示した組み立て工程に対して本結果を選択する機能に加え、組み立て工程がワイヤー配線であ
16 れば基本特性の測定結果を選択できるようにした。基本特性を選択するウェブブラウザ上の表示を図 7.5
17 に示す。この機能を用いて選択した基本特性結果の ID が Code 7.4 の”QC_properties”の各特性項目の

RD53A_PULL-UP_RESISTOR									
Test Data									
Module Name	Stage	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag	Select	
20UPGR1009999	MODULEWIREBONDING	RD53A_PULL-UP_RESISTOR	kinoshita	Tokyo Institute of Technology	2021/08/10 14:17:30	result page		<input type="radio"/>	
20UPGR1009999	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	
20UPGR1009999	MODULEWIREBONDING	IREFTRIM_FE	kinoshita	Tokyo Institute of Technology	2021/09/13 12:06:25	result page		<input type="radio"/>	

ORIENTATION									
Test Data									
Module Name	Stage	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag	Select	
20UPGR1009999	MODULEWIREBONDING	ORIENTATION	kinoshita	Tokyo Institute of Technology	2021/08/10 14:18:01	result page		<input type="radio"/>	

[Proceed](#)

図 7.5 ピクセル検出器の基本特性選択画面。

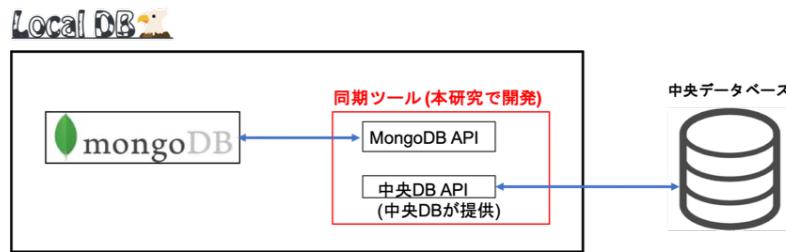


図 7.6 同期ツールの処理のイメージ

- 1 欄に記録される機能となっている。ここで記録された結果が、ワイヤー配線工程における品質試験結果と同時に中央データベースへ同期される。

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

- 4 中央データベースにおいてピクセル検出器の構成部品情報や品質試験結果を管理するために、中央データベースにそれらについての構造を定義する必要がある。中央データベースにおける構造の定義、および実装の大部分は先行研究 [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、ピクセル検出器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。
- 9 ピクセル検出器の情報や品質試験結果を中央データベースに共有するために、中央データベースとローカルデータベース間のデータ共有機能を開発する必要がある。中央データベースとの通信のために、中央データベースが開発、提供している Python パッケージを用いた。
- 12 本研究では以下の機能を実装した。

- ピクセル検出器情報の登録機能
- 品質試験結果の同期機能

7.3.1 ピクセル検出器情報の登録

- 16 ピクセル検出器の品質試験結果を管理するために、ピクセル検出器情報を中央データベース、ローカルデータベースに登録する必要がある。本研究では、ピクセル検出器情報を中央データベースに登録および

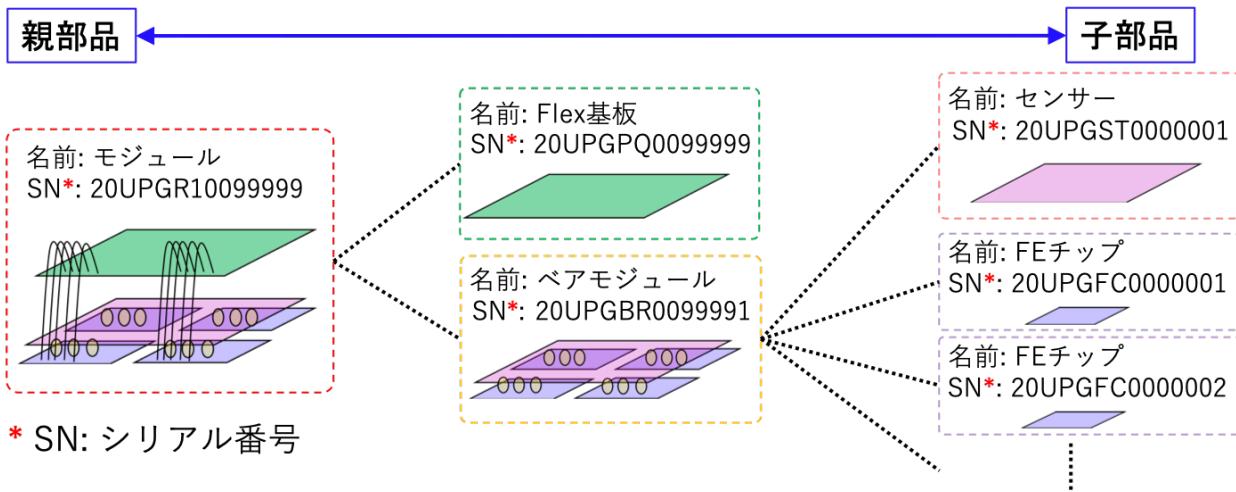


図 7.7 ピクセル検出器の親子関係。この図では、Quad モジュールを例にピクセル検出器の親子関係を示している。

- 18 ローカルデータベースに同期する機能の開発を行った。ピクセル検出器の構成部品であるベアモジュール
19 およびフレックス基板は、それぞれについての品質管理を行う機関で登録される。
20 ピクセル検出器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検出器を登録する予定であ
21 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検出器の登録機能の詳細を以下
22 に示す。

23 ピクセル検出器情報の管理方法

24 ピクセル検出器の構成部品との関係を図 7.7 に示す。ピクセル検出器と構成部品は**親子関係**を定義する
25 ことにより、部品構造の定義を行う。親子関係により部品構造を定義することにより、それぞれの部品の
26 情報を関連付けて管理することができる。ピクセル検出器の組み立てにおいて重要なのは、読み出し試験
1 結果は各 ASIC 每の結果が得られるため、ピクセル検出器に対して行った試験結果を各 ASIC と関連付け
2 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、ピクセル検出器の情報から 4 枚の
3 ASIC の情報を漏れなく得ることができる。

4 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
5 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ベアモジュールは、
6 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ベアモジュール
7 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、センサーが搭
8 載されていないピクセル検出器 (Digital モジュール) の情報についても中央データベースに登録する。そ
1 のため、ピクセル検出器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
2 レックス基板の種類が異なる。親子関係を定義する際に、あるピクセル検出器がどの種類の子部品を持つ
3 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検出器の組み立てをすることを
4 防ぐことができる。

5 ピクセル検出器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検出
6 器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。
7 「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
8 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
9 定するための 7 桁の通し番号である。さらに、ピクセル検出器のシリアルナンバーの 7 桁の通し番号の 1

表 7.1 あるピクセル検出器のタイプと組み立て可能なベアモジュールおよびフレックス基板の関係

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		

表 7.2 あるピクセル検出器のタイプと組み立て可能なベアモジュールおよびフレックス基板の関係

ベアモジュール	xxxx	フレックス基板	xxxx	ピクセル検出器	xxxx
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

- 10 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
 11 の種類、センサーの厚みの対応を表 ??に示す。また、ピクセル検出器とフレックス基板は 1 対 1 の対応
 12 をすることから、最後の 5 桁はフレックス基板と同じになるように生成される。
 13 あるピクセル検出器のタイプと組み立て可能なベアモジュールおよびフレックス基板の関係を表 7.2 に
 14 示す。

15 ピクセル検出器情報の登録機能の開発

- 16 表 7.2 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、ピクセル検出器情報を登録する機
 17 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 7.2 のように定義されたピクセル検出器の構造を中央データベースから取得
19 ii. ピクセル検出器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、ピクセル検出器を登録および構成部品を登録

21 i. ピクセル検出器の構造を中央データベースから取得

22 ピクセル検出器を中央データベースに登録する際、表 7.2 に示されている組み合わせに基づいて構成部
23 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検出器の登録を行
24 うために、登録するピクセル検出器の種類に対して、適切な種類のベアモジュールおよびフレックス基板
25 が使用されているかを確認する必要がある。

26 ローカルデータベースにおいて、適切な種類のベアモジュールとフレックス基板が使用されているこ
27 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。
28 Code 7.5 は中央データベースからピクセル検出器の構造についてのデータをダウンロードし、必要な情報
29 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検出器について共通のドキュメン
30 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
31 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
32 におけるキー値を表している。

- 33 ● 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)
34 ● ピクセル検出器を ITk に実装する際の大まかな位置情報 (subprojects)
35 ● ピクセル検出器の種類と識別コード (types)
36 ● ピクセル検出器の子部品情報 (children)

Code 7.5 ピクセル検出器の組み立て工程を管理するためのドキュメントの一部。

```
37 1 {  
38 2   "_id" : ObjectId("5bb1e1bef981520009c54bc5"),  
39 3   "dbVersion" : 1.01,  
40 4   "code" : "MODULE",  
41 5   "name" : "Module",  
42 6   "project" : {  
43 7     "code" : "P",  
44 8     "name" : "Pixels"  
45 9   },  
46 10  "subprojects" : [  
47 11    {  
48 12      "code" : "PI",  
49 13      "name" : "Inner_pixels"  
50 14    },  
51 15    {  
52 16      "code" : "PB",  
53 17      "name" : "Outer_pixel_barrel"  
54 18    },  
55 19    {  
56 20      "code" : "PE",  
57 21      "name" : "Pixel_endcaps"
```

```

18    22      },
19    23      {
20    24          "code" : "PG",
21    25          "name" : "Pixel\u208bgeneral"
22    26      }
23    27  ],
24    28  "types" : [
25    29      {
26    30          "code" : "TRIPLET_L0_STAVE_MODULE",
27    31          "name" : "Triplet\u208bL0\u208bstave\u208bmodule",
28    32          "subprojects" : [
29    33              {
30    34                  "code" : "PI",
31    35                  "name" : "Inner\u208bpixels"
32    36              }
33    37          ],
34    38          "snComponentIdentifier" : "MS"
35    39      },
36    40      ...
37    41  ],
38    42  "children" : [
39    43      "TRIPLET_L0_STAVE_MODULE" : [
40    44          "BARE_MODULE" : "PGB1",
41    45          "PCB" : "PIPT"
42    46      },
43    47      ...
44    48  ]
45  }

```

4 ii. ピクセル検出器の登録に必要な情報の入力

5 ピクセル検出器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。ピクセル検出器を登
6 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
7 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
8 ることが知られている [20]。各ピクセル検出器に必要な入力項目は 11 項目であり、日本においてはこの
9 作業を 2200 回 (ピクセル検出器の数) 繰り返すため、最大 60 個程度のピクセル検出器に対して誤った情
10 報が記録されてしまうことが想定される。

11 そこで、ローカルデータベースにおけるピクセル検出器の登録機能では、入力ミスを防ぐために入力パ
12 ラメータを必要最低限に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
13 報を抽出する手法を導入した。ピクセル検出器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
14 に示す。

- 15 ● 入力パラメータ
 - 16 – ピクセル検出器の種類情報
 - 17 – ベアモジュールのシリアルナンバー

表 7.3 ピクセル検出器登録に必要な入力情報

ピクセル検出器 基本情報	project	ピクセル検出器の場合は”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	ピクセル検出器の場合は”MODULE”を入力
	type	ピクセル検出器の種類
	ATLAS Serial Number	14桁のシリアルナンバー
ピクセル検出器 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
	フレックス基板	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

18 – フレックス基板のシリアルナンバー

19 – モジュールキャリアのシリアルナンバー

20 ● 削減したパラメータ

21 – project: 本機能ではピクセル検出器のみであるから”P”で固定

1 – subproject: ピクセル検出器の種類情報から抽出

2 – 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

3 – componentType: 本機能ではピクセル検出器のみであるから”MODULE”で固定

4 – ATLAS Serial Number: ベアモジュールおよびフレックス基板のシリアルナンバーから自動
5 生成

6 – FE chip version: ベアモジュール情報から抽出

7 – Thickness: ベアモジュール情報から抽出

8 この手法を導入することにより、ピクセル検出器の登録の際に必要な入力パラメータを半数以下に減ら
9 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検出器の登録画面を図 7.8 に示
10 す。入力ミスを防ぐために、ピクセル検出器の種類はプルダウンから選択するようにし、各部品のシリア
11 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。

12 iii. 中央データベースと通信し、ピクセル検出器を登録および構成部品を登録

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

LocalDB TOP | COMPONENTS | SCANS Asia/Tokyo kinoshita

Top Page > Register a Module to ITkPD

Register a Module to ITkPD

Please enter the Information about the Module.

* Required

Module Type* *** choose Module Type ***

Bare Module serial number* Bare Module serial number 1

PCB serial number* PCB serial number

Module Carrier serial number* Module Carrier serial number

Confirm

[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検出器登録画面。

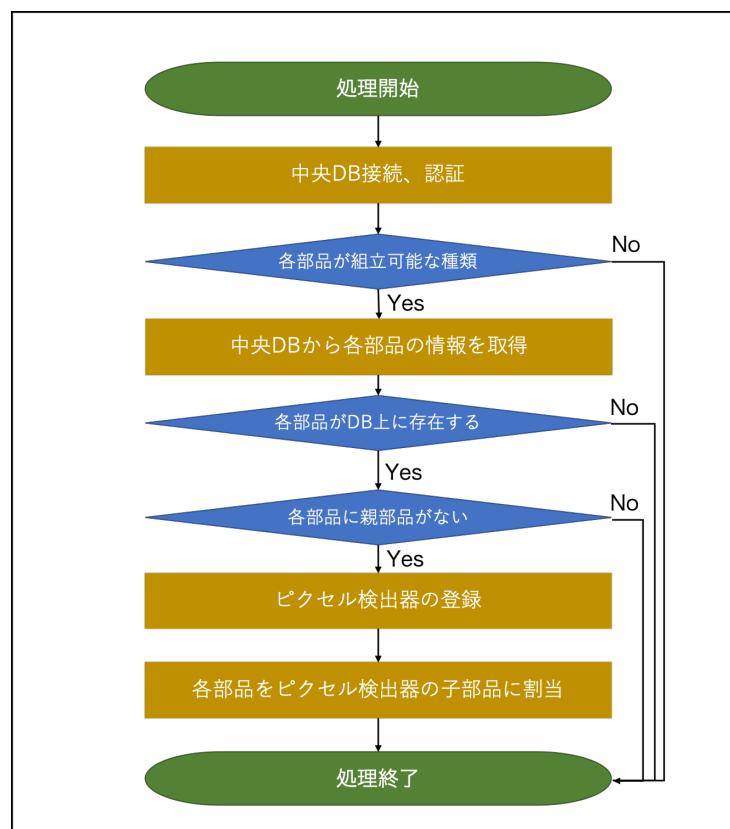


図 7.9 ピクセル検出器登録機能による処理の流れ。

18 7.3.2 品質試験結果の同期機能

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

23 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
24 機能を拡張し、全ての品質管理試験結果およびピクセル検出器の組み立て工程を中央データベースと同期
25 する機能の開発を行った。

26 中央データベースにおける品質試験結果の管理方法

27 先行研究において、中央データベースにおけるピクセル検出器の組み立て工程と付随する品質管理試験
28 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。

- 29 ● ピクセル検出器のシリアルナンバー
- 30 ● 試験日時
- 31 ● 試験機関
- 32 ● コメント
- 33 ● ローカルデータベースを再現するためのファイル

34 ※ 品質試験結果

35 ※ 品質試験特性

1 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
2 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
3 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
4 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
5 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
6 パラメータの枠を表7.4に示す。

7 品質試験結果のアップロード機能

8 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
9 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。

- 10 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
- 11 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
- 12 3. 作成した結果を中央データベースへアップロード
- 13 4. アップロードした結果にデータファイルを添付

14 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
15 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
16 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
17 設置したローカルデータベースにおいて試験結果の再現を行うことができるよう設計した。

表 7.4 中央データベースに定義したアップロードパラメータ

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 フレックス基板の 接着情報	結果	室温	float
		湿度	float
	特性	接着剤の比率	float
		バッチナンバー	string
		試験者の名前	string
	接着方法		string

表 7.5 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
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	3.9 MB	161.4 ± 10.0 [sec]

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

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

アップロード機能の性能評価

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

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

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

アップロード機能の性能評価結果を表 7.5 に示す。

読み出し試験のアップロードにかかる処理時間は $\mathcal{O}(100)$ であり、読み出し試験以外の結果については処理時間が $\mathcal{O}(1)$ となった。読み出し試験以外については数秒程度であり、1 つの工程に定義される品質試験は最大 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

*1 測定を行った 2021 年 9 月時の値

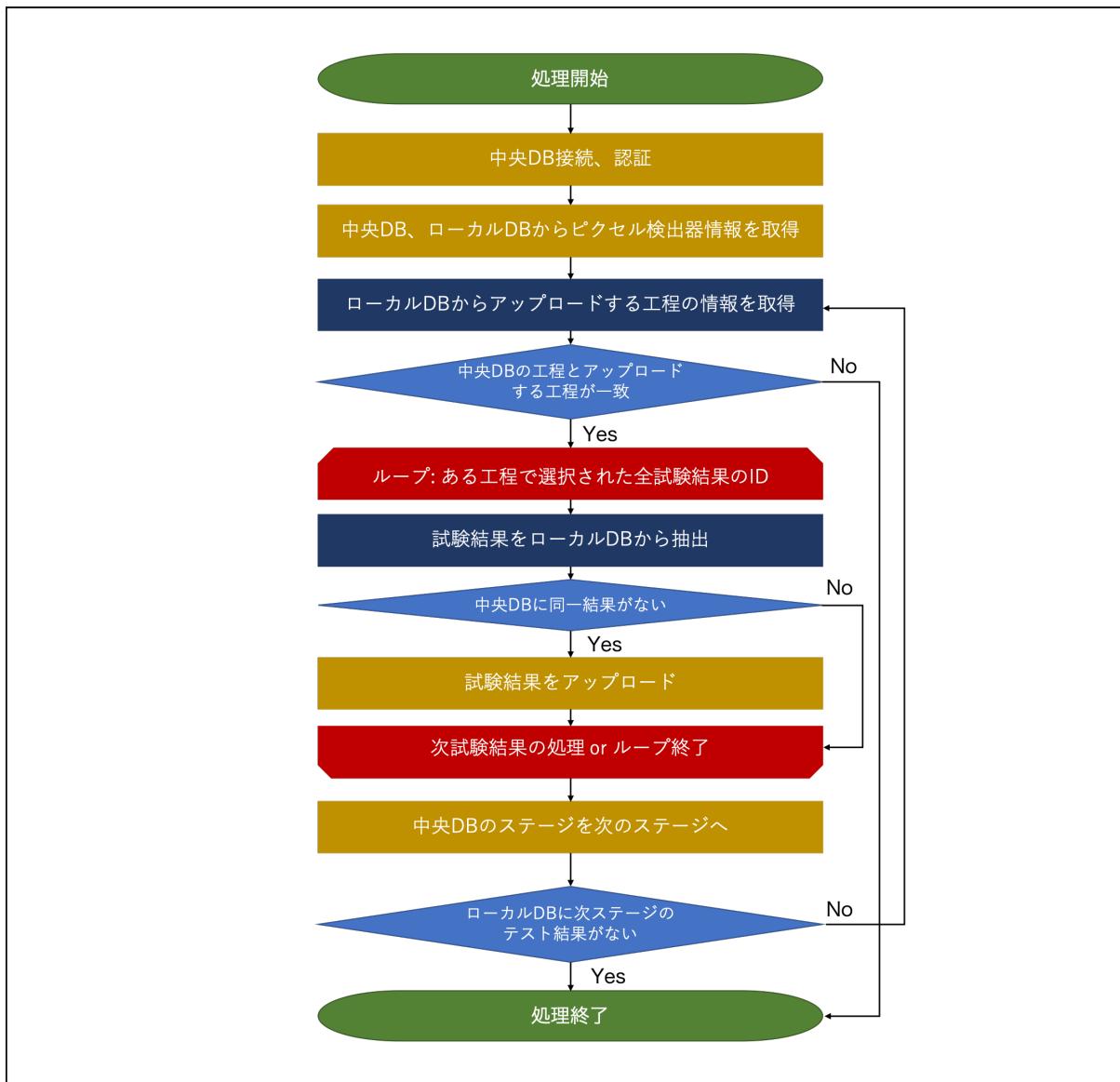


図 7.10 品質試験結果アップロード処理の流れ。

6 は、ウェブブラウザのボタンを押せば図 7.10 の流れに沿って自動で処理を行うため、休憩時間の前など
 7 行け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
 8 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
 9 る原因としては以下の 2 つが挙げられる。

- 10 • 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
 11 • 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

12 初めに中央データベースとの通信 API の処理時間について考察する。各品質試験結果をアップロードす
 13 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」、
 14 「uploadTestRunResults」をそれぞれ 1 回行い、「createTestRunAttachment」を 1 回 (ローカルデータ
 15 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
 16 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
 17 ると考えられる。

表 7.6 アップロード機能に使用される API 一覧

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

表 7.7 ダウンロードツールの処理時間

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

一方で、読み出し試験はピクセル検出器のみではなく、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。

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

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

ローカルデータベースからの読み出し試験結果の抽出処理は、先行研究 [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 ?? 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

表 7.8 アップロード機能に使用される API 一覧

まとめ方	ZIP ファイルの容量	処理時間の平均
全ての結果	10 MB	-
ピクセル検出器	29 KB	0.88 ± 0.8 [sec]
1 つの ASIC	2.5 MB	4.30 ± 0.94 [sec]

18 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
 19 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
 20 により、使用者の待ち時間は接続およびユーザー認証にかかる 3.10 ± 0.38 [sec]^{*2} となり、待ち時間を抑
 21 えることができた。

22 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
 23 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
 24 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。

26 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
 27 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
 28 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

3 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。
 4 読み出し試験はピクセル検出器のみではなく、各 ASIC 毎に作成され、結果添付ファイルは、読み
 5 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
 6 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
 7 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
 8 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。

- 9 • 全てのデータファイルを一つの ZIP ファイルにまとめる
- 10 • ピクセル検出器および各 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
 11 める

12 これらの処理時間の測定結果を表 7.8 に示す。

13 全ての結果をまとめた場合は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
 14 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
 15 確認した中で可能な添付の処理方法は、ピクセル検出器と各 ASIC の結果をそれぞれまとめる方法のみであ
 1 り、処理時間は式 (7.2) となる。

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

- 2 式 (7.2) から得られる結果は 20.4 ± 0.99 [sec] と比較して大きな改善は期待できない。

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



図 7.11 品質試験結果ダウンロード処理の流れ。

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

品質試験結果のダウンロード機能

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

さらに、全ての品質試験結果のダウンロード処理の後に、中央データベースにおけるピクセル検出器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、ピクセル検出器を輸送した後、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うことができる。

7.4 本章のまとめ

₉ 第8章

₁₀ まとめ

₁₁ 8.1 まとめ

₁₂ 8.2 今後の課題

₁₃ 付録 A

₁₄ 非読み出し試験結果のブラウザ表示

₁₅ A.1 非読み出し試験結果のブラウザ表示

₁₆ A.1.1 外観検査

₁₇ A.2 ピクセル検出器の基本特性のブラウザ表示

参考文献

- [1] ” 大学院 素粒子物理学 1 素粒子の基本的性質 ”
 南部陽一郎・木下東一郎・牧二郎・中西襄・政池明、講談社サイエンティフィック
- [2] ” 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 ”、奥
 山広貴
- [3] ” 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 ”、窪田ありさ
- [4] ” Development of DAQ test system and database for the HL-LHC ATLAS production Pixel
 detector ”、Eunchong Kim
- [5] ” The CERN accelerator complex ” ,
<https://cds.cern.ch/images/OPEN-PHO-ACCEL-2013-056-1> CERN Document Server
- [6] Joao Pequenao. Computer generated image of the whole ATLAS detector. Mar 2008.
- [7] ”Study of the material of the ATLAS inner detector for Run 2 of the LHC”, <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/PAPERS/PERF-2015-07/ATLASCollaboration>
- [8] ”Computer Generated image of the ATLAS calorimeter”, <https://cds.cern.ch/images/CERN-GE-0803015-01>
- [9] <https://hilumilhc.web.cern.ch/content/hl-lhc-project>
- [10] ”The High-Luminosity upgrade of the LHC: Physics and Technology Challenges for the Accelerator and the Experiments”, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/706/2/022002/pdf>
- [11] ””, <https://www2.kek.jp/ja/news/topics/2007/crab.html>
- [12] ”ATLAS Inner Tracker Pixel Detector Technical Design Report”, <https://cds.cern.ch/record/2285585/files/ATLAS-TDR-030.pdf>
- [13] ATLAS Collaboration. “Combined measurements of Higgs boson production and decay using up
 to 80 fb-1 of protonproton collision data at $\sqrt{s} = 13$ TeV collected with the ATLAS experiment”.
 CERN Document Server. 2019-9 更新. <http://cdsweb.cern.ch/record/2629412/>, (2021-1)
- [14] <https://atlas.kek.jp/main/movie/photos/physics/index.html>
- [15] <https://home.cern/science/physics/dark-matter>
- [16] Particle Data Group, 33. Passage of particles through matter 1
<https://pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2018-rev-passage-particles-matter.pdf>
- [17] ”RD53A Module Testing Document”, Lingxin Meng
<https://cds.cern.ch/record/2702738/files/ATL-COM-ITK-2019-045.pdf>
- [18] ”Digital module electrical testing”, Massimiliano Antonello

- 12 <https://cds.cern.ch/record/2723333/files/ATL-COM-ITK-2020-020.pdf>
- 13 [19] "MongoDB Documentation"
- 14 <https://docs.mongodb.com>
- 15 [20] "Practical Plant Failure Analysis", Neville W. Sachs, P.E.

謝辞

16

17 shaji

図目次

18	1.1	ヒッグス場との結合定数と素粒子の質量	3
19	1.2	超対称性粒子	4
20	1.3	LHC の全体図	5
21	1.4	ATLAS 検出器	6
22	1.5	ATLAS 検出器	7
23	1.6	内部飛跡検出器の全体像。	8
24	1.7	内部飛跡検出器の断面図。	8
1	1.8	内部飛跡検出器の配置	8
2	1.9	ATLAS カロリメータ	10
3	1.10	LHC の運転計画	11
4	1.11	ITk の断面図	13
5	1.12	ITk の断面図	14
6	2.1	n 型半導体の結晶構造とバンド構造	16
7	2.2	p 型半導体の結晶構造とバンド構造	17
8	2.3	pn 接合の様子	17
9	2.4	エネルギー損失と β の関係。	18
1381	2.5	フレンケル欠陥とショットキ一欠陥	19
1382	2.6	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	20
1383	2.7	ピクセルモジュールの模式図	20
1384	2.8	シリコンセンサーの模式図	21
1385	2.9	シリコンセンサーの模式図	22
1386	2.10	アナログ信号を ToT に変換する概念図	22
1387	3.1	検出効率と試験電荷の関係	25
1388	5.1	ベアモジュール	28
1389	5.2	フレックス基板	28
1390	5.3	ピクセル検出器の組み立て工程	29
1391	5.4	ワイヤー保護用の構造体	30
1392	5.5	読み出し試験のセットアップ	31
1393	5.6	読み出し試験の全体図	31
1394	5.7	平坦性測定の結果	32
1395			

1396	5.8	SLDOVI	33
1397	5.9	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。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。	36
1399	5.10	pull-up Resistor	36
1400	6.1	中央データベースとローカルデータベース	39
1401	6.2	品質試験結果を操作するシステムの全体像	41
1402	6.3	MongoDB の全体像	42
1403	6.4	ローカルデータベースの構造	44
1404	6.5	ローカルデータベースシステムの全体像	44
1405	6.6	ローカルデータベースシステムの全体像	45
1406	7.1	非読み出し試験結果のブラウザ出力。	48
1407	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。横軸は評価基準、縦軸は該当する不良ピクセル数を表す。	50
1409	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。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。	50
1412	7.4	結果選択画面及び組み立て工程表示の例	51
1413	7.5	ピクセル検出器の基本特性選択画面	53
1414	7.6	同期ツールの処理のイメージ	53
1415	7.7	ピクセル検出器の親子関係	54
1416	7.8	ローカルデータベースを用いたピクセル検出器登録画面	59
1417	7.9	ピクセル検出器登録機能による処理の流れ	59
1418	7.10	品質試験結果アップロード処理の流れ	63
1419	7.11	品質試験結果ダウンロード処理の流れ	66

1420 表目次

1421	1.1 標準模型での物質の構成粒子	2
1422	1.2 標準模型での力を伝える粒子	2
1423	1.3 IBL、ピクセル検出器の配置	9
1424	1.4 HL-LHC でのビームパラメータ	12
1425	1.5 HL-LHC でのビームパラメータ	13
1426	2.1 各 ASIC の主な仕様	23
1427	3.1 各 Layer における Threshold の値	24
1428	3.2 各 Layer における ToT のチューニングの値	24
1429	5.1 Start at temperature	33
1430	5.2 Powering overview for the on-detector system	34
1431	5.3 Pixel Failure Categories	35
1432	5.4 Pull-up Grade	36
1433	5.5 品質試験のデータ	37
1434	6.1 ローカルデータベースのコレクション	43
1435	7.1 あるピクセル検出器のタイプと組み立て可能なベアモジュールおよびフレックス基板の関係	55
1436	7.2 あるピクセル検出器のタイプと組み立て可能なベアモジュールおよびフレックス基板の関係	55
1437	7.3 ピクセル検出器登録に必要な入力情報	58
1438	7.4 中央データベースに定義したパラメータ	61
1439	7.5 アップロード機能の処理時間の測定結果	62
1440	7.6 アップロード機能に使用される API 一覧	64
1441	7.7 ダウンロードツールの処理時間	64
1442	7.8 アップロード機能に使用される API 一覧	65