

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

東京工業大学 理学院物理学系物理学コース 陣内研究室
奥山広貴 (19M00398)

2021年2月24日

Abstract

The ATLAS is one of the experiments conducted at CERN located at one of the interaction points of the Large Hadron Collider(LHC). The purposes of the experiment are the precise measurements of the Standard Model (SM) and searches for particles predicted by the theories beyond the SM.

In order to acquire more statistics and to achieve more advanced measurements and searches, LHC plans to start a new program called HL-LHC to increase the integrated luminosity. The target luminosity and integrated luminosity is approximately seven times and ten times higher than those from the on-going LHC project, respectively. Due to the upgrade, it is required especially for the inner tracking detectors to have more radiation tolerance and high granularity. It is planned to replace the ATLAS inner detector to a new detector system called the Inner Tracker(ITk). Entire ITk consists of silicon detectors and covers wider solid angle acceptance than the current Inner Detector. For the production of ITk, we are planning to produce $O(10,000)$ modules and conduct a series of tests for quality control(QC tests) for individual modules. Those are carried out repeatedly in the production flow. All the QC tests should be stored to a central database, which is set up at Unicorn university in Czech Republic, to record the performance of all the modules.

“Local database” system had been developed in previous studies in order to manage data at local production sites and to synchronize information to the central DB. The system has been under test-use among production sites towards full production. There were several items left to be developed for the module production. Particularly those are the functions specialized for the module production and QC tests and the synchronizing tools between the central database and local database. For this thesis, new functionalities are developed, for example searching results, synchronizing data between the local and the central database, and also it is validated that we can make use of the whole functionalities of the system, including tools that I developed, using real modules at the laboratory.

Additionally it is confirmed that we can use the tools with the actual data at the production to measure the processing time of the services. Concerning a function for searching results, the estimated processing time is $2.6 \pm 0.1[\text{sec}]$ for 84,000 results. Concerning a function for synchronizing data between databases, two options have been implemented, i.e. downloading module information and uploading electrical readout results. The processing time for the download is $4.0 \pm 0.4[\text{sec}]$ per quad module. The time for the upload is $1.2 \pm 0.1[\text{min}]$ for 5 readout items of quad modules.

I have succeeded to develop the database functions. The system has been largely improved to the level that it can be used for the actual production. Concerning the necessary functions for managing and analyzing readout results, the developments have been completed. At the end of this thesis, the list of items to be developed is shown, e.g. synchronizing and analyzing of the other test results,

supporting tools for the processes of module assembly which will occur in worldwide bases.

概要

欧州原子力研究機構 (CERN) に設置されている大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) の 1 つの衝突点にて、ATLAS 実験が行われている。この実験は現在、素粒子物理学の基本理論となっている標準模型の精密測定や標準模型を超えた新粒子の探索を目的とし稼働している。

更なる測定、探索に向けて取得統計数の増加を狙い、LHC では 2025 年より加速器をアップグレードし、ルミノシティをあげる計画を予定しており、これを HL-LHC と呼ぶ。ルミノシティは現在の LHC の約 7 倍、積分ルミノシティは約 10 倍となる予定である。HL-LHC において、検出器には高い放射線耐性や位置分解能の向上など、現在のものよりも高い水準が要求される。そのため、ATLAS 実験では最内層に設置している内部飛跡検出器の総入れ替えを予定しており、新しく製造する検出器を Inner Tracker (ITk) と呼ぶ。ITk では全ての領域でシリコン検出器が搭載され、また現在の内部飛跡検出器よりも広い立体角をカバーする設計となっている。ITk の製造に向けてピクセルモジュール約 10,000 台を生産し、各モジュールに対して品質試験を行う予定となっている。品質試験は項目が多く、モジュール組み立て工程の中で何度も行うものである。モジュール情報及び品質試験の結果は固体性能の保持をしてチェコに設置されている中央データベースに保存する必要がある。

各組み立て機関においてモジュール及び品質試験の情報管理に使用することを目的とした「ローカルデータベースシステム」が先行研究で開発されており、いくつかの機関で試験運用が行われている。このシステムには、モジュール生産時における運用に向けて必要不可欠である開発課題が残されていた。特に品質試験に特化した機能の開発や中央データベースとローカルデータベース間の同期機能開発は、生産時には必要となる機能であるが実装されていなかった。本研究ではこれらの機能開発を行い、データベースシステムの拡張を行った。特にローカルデータベースにおける品質試験管理機能の 1 つとして結果検索機能や、データベース間の同期機能を開発した。また品質試験におけるデータベース操作の流れを確立し、データベースの機能が一連の流れの中で使用可能であることを確認した。

生産時に想定されるデータを用いて開発機能の処理時間測定を行い、その有用性を評価した。試験結果検索に関する処理時間は、84,000 の結果数に対して $2.6 \pm 0.1[\text{sec}]$ となった。データベース間の同期機能にして、モジュールのダウンロード機能と読み出し試験結果のアップロード機能を実装した。モジュールのダウンロード機能に関して、Quad モジュールのダウンロードに要する処理時間は $4.0 \pm 0.4[\text{sec}]$ であった。読み出し試験結果アップロードに関して、Quad モジュールの読み出し試験 5 項目のアップロードに要する処理時間は $1.2 \pm 0.1[\text{min}]$ であった。この時、結果ページに添付したファイルの容量は 3.9[MB] であった。

本研究において、結果としてモジュール組み立てと品質試験に向けたデータベース機能の開発に成功し、本番での使用に大きく近づいた。特に読み出し試験結果の管理機能や同期機能が完成した。その他の品質試験結果の同期や解析、世界的な組み立て工程管理のサポート等、本研究に加えて必要となる開発項目を指摘し、今後の課題とした。

目次

概要	i
第 1 章 序論	1
1.1 素粒子標準模型とその問題点	1
1.2 LHC について	5
1.3 ATLAS 実験	6
1.4 HL-LHC 実験アップグレード計画	11
第 2 章 ピクセルモジュール	17
2.1 ピクセルモジュールの構成	17
2.2 ピクセルモジュールの構成部品	17
2.3 新型モジュールの種類	21
第 3 章 モジュール組み立てと品質試験	22
3.1 組み立て工程	22
3.2 品質試験	23
3.3 検出器量産におけるデータ管理	34
第 4 章 モジュール情報及び品質試験結果管理システム	35
4.1 中央データベース	36
4.2 ローカルデータベース	37
4.3 本研究における開発項目	43
第 5 章 品質試験のデモンストレーション	58
5.1 使用したソフトウェア	58
5.2 使用したハードウェア	60
5.3 デモンストレーションの流れ	63
5.4 機能確認	64
5.5 本章のまとめ	68
第 6 章 ローカルデータベースにおける検索機能	73
6.1 実装方法	73
6.2 処理時間測定	79
6.3 改善方法と処理時間測定	82

6.4	本章のまとめ	86
第 7 章	中央データベースとローカルデータベースの同期	87
7.1	サーバーの設置場所による処理時間の違い	87
7.2	モジュール情報のダウンロード	91
7.3	読み出し試験結果のアップロード	99
7.4	本章のまとめ	106
第 8 章	まとめ	107
8.1	本論文のまとめ	107
8.2	現状と今後の課題	108
付録 A	シリコン検出器の原理	110
A.1	半導体	110
A.2	検出原理	112
付録 B	RD53A とフレキシブル基板	113
B.1	アナログ回路とデジタル回路	113
B.2	試験用電荷入射の方法	113
B.3	RD53A のデータフォーマット	113
B.4	フレキシブル基板	116
付録 C	ローカルデータベースのチュートリアルと普及状況	117
付録 D	モジュール生産状況の解析	119
付録 E	ファイル送信時におけるデータ容量と処理時間の考察	120
参考文献		123
謝辞		127

第1章

序論

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

1.1 素粒子標準模型とその問題点

1.1.1 素粒子標準模型

現在素粒子物理学で基礎となっており、多くの実験事実を説明している理論を「標準模型」[1] と呼ぶ。標準模型はスピン 1/2 のフェルミオンである 6 種類の「クォーク」と 6 種類の「レプトン」、スピン 1 の 4 種類の「ゲージボソン」及びスピン 0 の「ヒッグスボソン」から成る。表 1.1、1.2 に一覧を示す。2012 年 7 月に CERN で新粒子の発見が発表され、これがヒッグス粒子であると認定され標準模型における全ての素粒子が実験的に確認された。

自然界には電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用、重力相互作用の 4 種類の相互作用がある。標準模型は強い相互作用を記述する量子色力学 (Quantum ChromoDynamics: QCD)、電磁相互作用と弱い相互作用を統一した電弱統一理論 (Glashow-Weinberg-Salam: GWS) から成る。重力相互作用は標準理論では扱っていない。強い相互作用は色荷 (Color) を持ち、 $SU(3)_C$ の対称性を持つ。8 種類の g によって力が媒介される。電弱相互作用は $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ の対称性を持つ。力を媒介する粒子として W_1 、 W_2 、 W_3 と B が存在する。このうち W_1 、 W_2 が混合して W^\pm 、 W_3 、 B が混合して Z 、 γ となる。

1.1.2 ヒッグス機構と結合定数

ここではヒッグス機構と結合定数について説明する [13]。標準模型のラグランジアンに質量項を導入すると、ゲージ不変性を破ってしまう。これは素粒子が実際に質量を持つ事実と矛盾する。ここで標準模型がゲージ不変性を保ちながら素粒子が質量を持つために、標準模型のラグランジアンにヒッグスセクターを導入する。ここで導入するヒッグスセクターは複素スカラー場 (ヒッグス場) ϕ を用いて以下とする。

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = (\partial_\mu \phi)^\dagger (\partial^\mu \phi) - V(\phi) \quad (1.1)$$

$$(1.2)$$

表 1.1 標準模型のフェルミオン。

世代	クォーク	電荷 [e]	質量 [MeV/c ²]	レプトン	電荷 [e]	質量 [MeV/c ²]
1	<i>u</i>	2/3	~2.3	<i>e</i> ⁻	-1	0.511
	<i>d</i>	-1/3	~4.8	ν_e	0	< 2.2 × 10 ⁻⁶
2	<i>c</i>	2/3	~1280	μ^-	-1	105.7
	<i>s</i>	-1/3	~95	ν_μ	0	< 0.19
3	<i>t</i>	2/3	~1.73 × 10 ⁵	τ^-	-1	1777
	<i>b</i>	-1/3	~4200	ν_τ	0	< 18

表 1.2 標準模型のボソン。

記号	名称	相互作用	スピン	電荷 [e]	質量 [GeV/c ²]
γ	光子	電磁	1	0	0
W^\pm	荷電弱ボソン	弱	1	± 1	80.4
Z	中性弱ボソン	弱	1	0	91.2
g	グルーオン	強	1	0	0
H	ヒッグスボソン	-	0	0	125

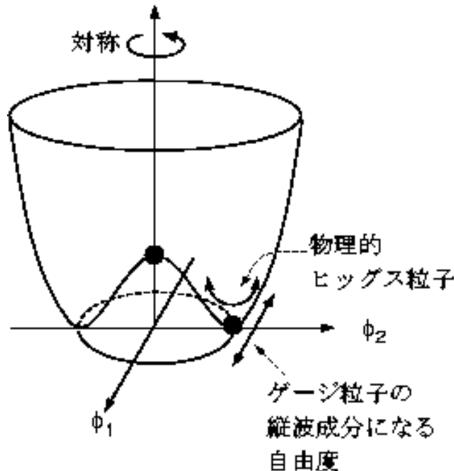


図 1.1 ヒッグスボテンシャル [9]。

ここでヒッグスボテンシャル $V(\phi)$ は、ゲージ対称性とくりこみ可能性の要請の下で、以下のようにする。

$$V(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2 \quad (1.3)$$

$\mu^2 < 0$ のとき、ボテンシャルが図 1.1 のような形となる。

ボテンシャルが最小となる(真空)のは原点ではなく、図におけるリング状の領域である。最小値となる点の中からある1つが選ばれ、その点が現在の真空となっている。これを「自発的対称性の破れ」と呼ぶ。ゲージ粒子の質量は真空点の縦波成分となって現れ、これがヒッグス機構においてゲージ粒子が質量を獲得する原理となる。

ここで導入したヒッグスボテンシャル $V(\phi)$ の特徴として、素粒子の質量とヒッグス粒子との結合定数が比例する。真空期待値を $\langle \phi \rangle = v/\sqrt{2}$ とおくと、 W^\pm 、 Z 、フェルミオンとヒッグス粒子の結合の強さ

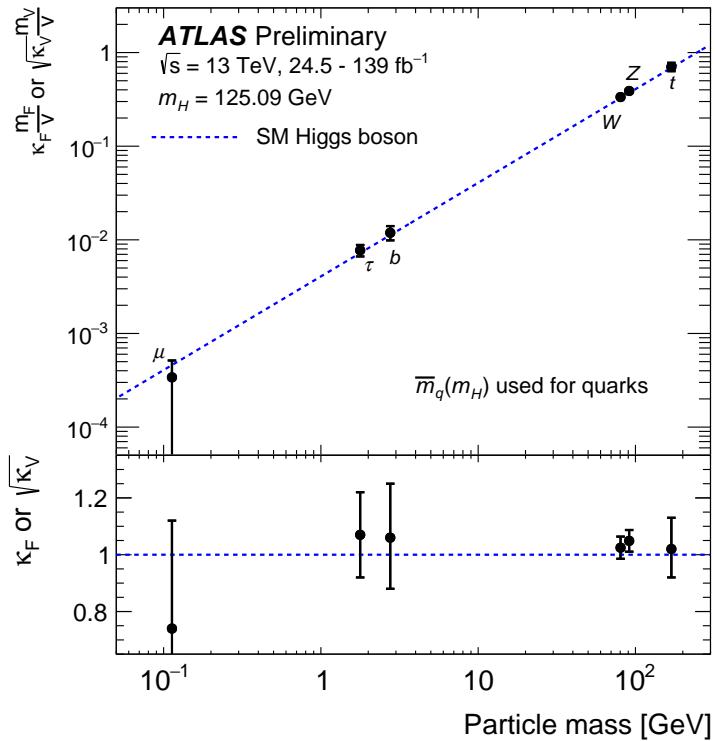


図 1.2 標準模型の素粒子の質量とヒッグス粒子との結合定数の関係 [4]。横軸は粒子の質量、縦軸は各粒子のヒッグス粒子との結合定数を示し、結合の強さを表す。各粒子の測定点が一直線状にのっており、線形性を示していることが分かる。

は以下のようになる。

$$W^\pm : \frac{g^2}{2} v = \frac{e}{\sin\theta_W} m_W \quad (1.4)$$

$$Z : \frac{(g')^2}{4} v = \frac{2e}{\sin(2\theta_W)} m_Z \quad (1.5)$$

$$\text{フェルミオン} : Y_f = \frac{\sqrt{2}}{v} m_f \quad (1.6)$$

ここで e は素電荷、 θ_W はワインバーグ角と呼ばれる。これらより、素粒子の質量とヒッグス粒子との結合定数が比例することが分かる。

これらの結合定数は LHC の実験で測定されており、線形性が見えている（図 1.2）。このヒッグスセクターの導入及び現在の標準模型は、実験事実と大きく矛盾していないことが分かる。

一方、ここで述べた標準模型におけるヒッグスセクターの導入は暫定的なものであり、任意性を持つ。例えば、現在は複素スカラー場 1 つを導入しているが、複数の場を仮定することも可能である。ヒッグス粒子の性質の精密測定によりこのヒッグスセクターの構造にせまることで、標準模型の検証ができる。

また標準模型を超える新理論ではしばしばこのヒッグスセクターの拡張を行い、標準理論における諸問題の説明を行っている。この時、標準理論とは異なるヒッグス粒子の性質を導く場合がある。ヒッグス粒子の精密測定は、標準模型を超える新理論にも影響を与える。

1.1.3 問題点と新理論

標準模型は、これまでの実験事実では説明できない以下の問題点を抱えている。

- 重力理論との統一.
- なぜ素粒子は 3 世代なのか.
- 階層性問題.
- 強い相互作用における CP 問題.
- 暗黒物質, エネルギー.
- ニュートリノの質量.
- バリオン数の非対称性.

現在上にあげた標準模型の諸問題を解くために以下のような理論が考案されている。

- 超対称性.
- 余剰次元.
- テクニカラー.
- プレオン模型.
- アクション.
- シーソー機構.

上にあげた中から特に超対称性 [5] について簡単に説明する。超対称性とはボソンとフェルミオンを入れ替える演算に対する対称性である。つまり標準模型の各粒子に対応した、スピンが $1/2$ だけ異なる超対称性粒子の存在を予言する理論である。クォーク、レプトン、ゲージボソン、ヒッグスに対する超対称性粒子をそれぞれスクォーク、スレプトン、ゲージーノ、ヒグシーノと呼ぶ。標準理論ではヒッグス場として 1 つの複素スカラーフィールを導入したが、超対称性を導入すると最低でも 2 つの場を必要とする。この場合 8 個の独立な成分が現れ、標準模型粒子としてゲージボソン (W^\pm, Z) とヒッグス粒子 (H^\pm, H^0, h^0, A^0) が予言される。これらには対応する超対称性粒子が存在し、観測時には電荷を持つ粒子、中性粒子がそれぞれ混合し、質量固有状態 ($\tilde{\chi}_{1,2}^\pm$)、($\tilde{\chi}_{1,2,3,4}^0$) として現れる。超対称性は上にあげた問題点において、暗黒物質、階層性問題を説明できる可能性を持っている。

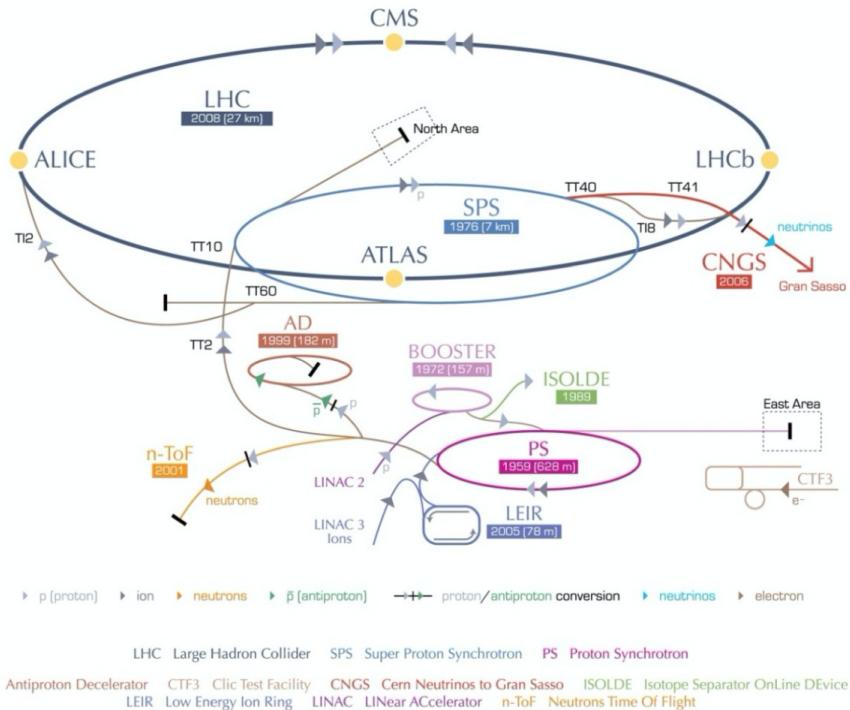


図 1.3 加速器の全体像 [6]。図は CERN に設置されている加速器の全体像を示す。陽子はいくつかの前段加速器で段階的に加速され LHC に入射する。LHC 上には 4 つの衝突点が存在し、それぞれ ALICE、LHCb、CMS、ATLAS 実験が行われている。

1.2 LHC について

1.2.1 加速器

LHC は CERN の地下およそ 100 m に設置されている周長 26.7 km の大型ハドロン衝突型加速器である。バンチと呼ばれる陽子のかたまりを 7 TeV まで加速し、衝突させる。世界最大エネルギーの加速器である。

陽子ビームの加速は 4 つの前段加速器を用いて行う。始めに水素ガス中の水素原子から電子を分離することで陽子を生成する。その後最初の線形加速器 (Linear Accelerator: LINAC)、陽子シンクロトロンブースター (Proton Synchrotron Booster: PSB)、陽子シンクロトロン (Proton Synchrotron: PS)、スーパー陽子シンクロトロン (Super Proton Synchrotron) で加速されたのち LHC に入射する。CERN にある加速器の概要を図 1.3 に示す。LHC には 4 つの衝突点があり、それぞれ ALICE(A Large Ion Collider Experiment)、LHCb、CMS(Compact Muon Solenoid)、ATLAS(A Troidal LHC Apparatus) 実験が行われている。それぞれの衝突点には崩壊粒子の飛跡やエネルギーを測定するための検出器が設置されており、取得したデータを元に多様な物理解析が行われている。

1.2.2 ルミノシティ

陽子ビームの強度を表すパラメータとして瞬間ルミノシティ \mathcal{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 1.7 で与えられる。

$$N = \mathcal{L} \times \sigma \quad (1.7)$$

ここで \mathcal{L} は時間に対して一定としている。一般に積分ルミノシティは瞬間ルミノシティを時間積分した量 $\int \mathcal{L} dt$ である。

\mathcal{L} の定義を式 1.8 に示す。

$$\mathcal{L} = \frac{N_b^2 n_b f_{\text{rev}} \gamma_r}{4\pi \varepsilon_n \beta^*} F \quad (1.8)$$

γ_r : 陽子ビームのローレンツ因子.

N_b : 1 バンチ当たりの陽子数.

n_b : 1 ビーム当たりのバンチ数.

f_{rev} : ビームの回転周波数.

ε_n : ビーム軸に垂直な平面でのビームの広がり.

β^* : 衝突点における振幅の大きさ.

F : 幾何学的損失係数.

F は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 1.9 で表される。

$$F = \left(1 + \left(\frac{\theta_c \sigma_z}{2\sigma^*} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (1.9)$$

θ_c : 衝突時ビーム交叉角.

σ_z : 衝突時における z 方向のバンチ分布の標準偏差.

σ^* : 衝突時における xy 方向のバンチ分布の標準偏差.

現行 LHC の瞬間ルミノシティは $1 \times 10^{-34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である [10]。

1.3 ATLAS 実験

初めに ATLAS 実験に用いる座標系と用語について説明する。まず衝突点を原点として右手座標系を定義しており、ビーム軸を z 軸、これに対して垂直な平面を $x - y$ 平面とする。 z 軸の正方向を Side-A、負方向を Side-C と呼ぶ。 x 軸方向は原点からみて LHC リングの中心に向かう方向であり、 y 軸は上に向かう方向である。方位角 ϕ は z 軸周りの角度であり、極角 θ は z 軸とのなす角である。ATLAS 実験では、極角 θ は以下のように擬ラピディティ η で表される。また極角 θ と擬ラピディティ η の関係図を図 1.4 に示す。

$$\eta = -\ln \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (1.10)$$

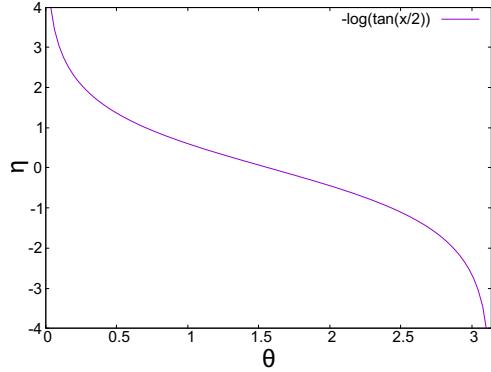


図 1.4 極角 θ と擬ラピディティ η の関係図。横軸は式 1.10 における極角 $\theta(0 \leq \theta \leq \pi)$ 、縦軸は擬ラピディティ η を表している。図のように、 η への変換により定義域が実数全体に広がる。

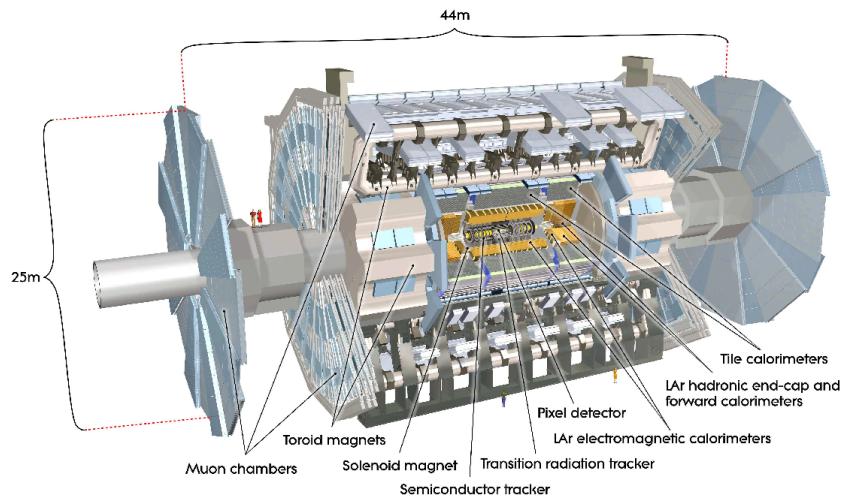


図 1.5 ATLAS 検出器の全体像 [7]。内側から内部飛跡検出器、ソレノイド磁石、カロリメータ、トロイド磁石、ミューオン検出器が設置されている。

1.3.1 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は複数の検出器から構成され、陽子の衝突によって生成された粒子の運動量、エネルギーを測定することができる。最内層に内部飛跡検出器が設置されていて、次に超電導ソレノイド磁石、カロリメータ、トロイド磁石、ミューオン検出器の順に設置されている。衝突点から見た立体角のほとんどを検出器で覆うような設計となっている。ATLAS 検出器の全体図を図 1.5 に示す。

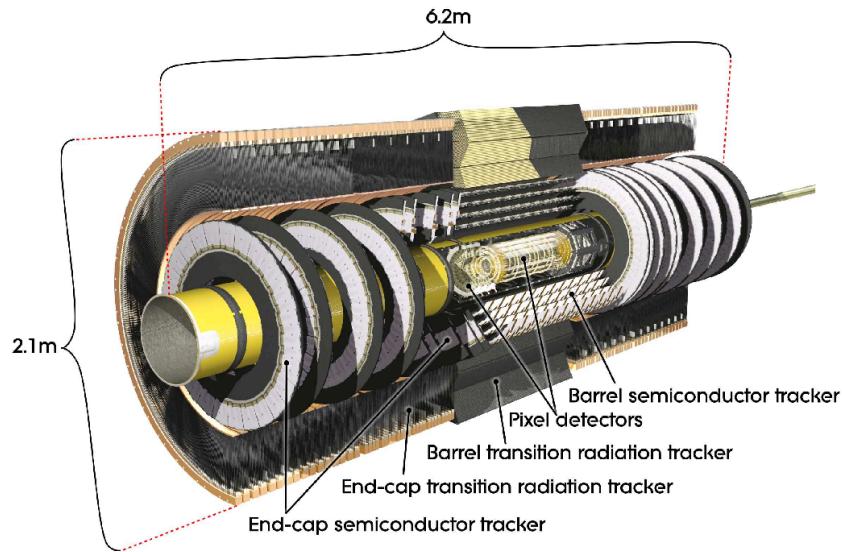


図 1.6 内部飛跡検出器の全体像 [7]。内側からピクセル検出器、ストリップ検出器、遷移放射検出器が設置されている。また円筒状のバレル部とディスク上のエンドキャップ部を構造として持つ。

1.3.2 内部飛跡検出器

ATLAS 検出器の最内層に位置する検出器である。内部飛跡検出器は粒子の飛跡測定をするための検出器であり、粒子の運動量や衝突点、崩壊点を計算する。検出器の外側には超伝導ソレノイド磁石が設置されており、2 T の磁場が z 方向にかけられる。これにより荷電粒子はローレンツ力を受け、軌跡が曲がる。

内部飛跡検出器は 3 つの検出器で構成され、内側からピクセル検出器、ストリップ検出器、遷移放射検出器の順に設置されている。ピクセル、ストリップ検出器は階層構造になっており、粒子は複数の検出器を通過する。それぞれの検出器で取得した通過位置をつなぎ合わせることで粒子の飛跡を計算することができる。

内部飛跡検出器の全体図を図 1.6 に示す。

ピクセル検出器

内部飛跡検出器の最内層に位置する検出器である。ピクセル検出器はバレル部が 4 層、エンドキャップ部が 6 層で構成される。バレル部の最内層から順に IBL(Insertable B-Layer)、B-Layer、Layer-1、Layer-2 と呼ばれる。

ピクセル検出器の全体図を図 1.7 に示す。

ピクセル検出器の各層は、モジュールと呼ばれる最小単位の検出器をいくつも搭載している。ピクセルモジュールを図 1.8 に示す。このピクセルモジュールの詳細については 2 章で述べる。

ストリップ検出器

ストリップ検出器はピクセル検出機の外側に設置されており、バレル部が 4 層、エンドキャップ部が 18 層となっている。ストリップモジュールは、 $80 \mu\text{m}$ ピッチのシリコンマイクロストリップセンサーを 2 枚重ねた構造をしている。センサーの重ねる角度をずらすことによって、二次元の入射位置測定が可能となる。

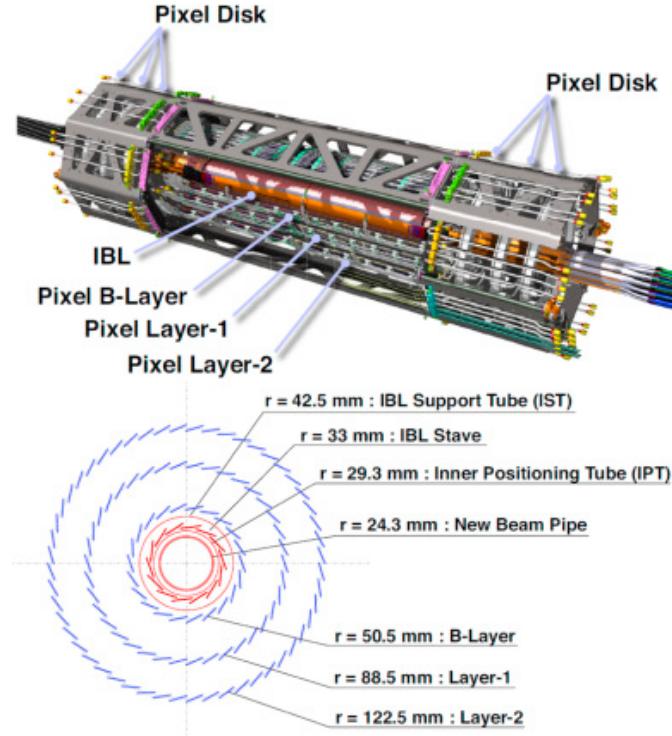


図 1.7 ピクセル検出器の全体像 [8]。上図はピクセル検出器の全体を模式的に表したものであり、下図はビーム軸方向から見たピクセル検出器の断面図である。バレル部の 4 層は内側から IBL、B-Layer、Layer-1、Layer-2 と呼ぶ。

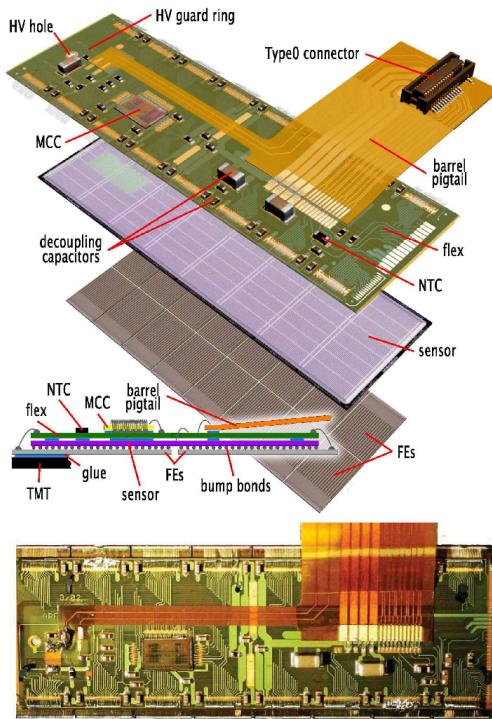


図 1.8 ピクセルモジュールの全体像 [7]。ピクセル検出器は、最小単位としてモジュールと呼ばれる構造を持ち、図はモジュールの全体像を示している。モジュールは、荷電粒子が通過し、信号を生成するセンサー部、AD 変換を行う FE チップ部、データ転送等を行うフレキシブル基板から構成される。

遷移放射検出器

纖維放射検出器は内部飛跡検出器の最外層に設置される検出器であり、バレル部が73層、エンドキャップ部が320層で構成される。この検出器はイオン化検出器であるドリフトチューブを重ねて構成される。チューブの中心にはアノードとしてワイヤーが張られ、その周りは混合ガスで満たされている。荷電粒子がドリフトチューブを通過すると、混合ガス中の分子をイオン化する。発生した電子はチューブ内でドリフトし、これを収集することで電気信号を得る。

1.3.3 力口リメータ

カロリメータは内部飛跡検出器の外側に設置されている検出器であり、荷電粒子のエネルギー測定を行う。主に電子・光子のエネルギー測定を目的とする電磁カロリメータと、ハドロンのエネルギー測定を目的とするハドロンカロリメータに分けられる。内側から電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータの順に設置されている。電子や光子が電磁カロリメータを通過する際、電子対生成や制動放射を繰り返し、電磁シャワーと呼ばれる粒子群となる。このシャワーの合計エネルギーを取得することで、元の電子・光子のエネルギー測定を行う。ハドロンカロリメータはハドロンのエネルギーを測定する。ハドロンが通過すると、崩壊を繰り返し粒子シャワーを形成する。この合計エネルギーを取得し、元のハドロンのエネルギー測定を行う。

1.3.4 ミューオン検出器

ミューオン検出器はATLAS検出機の最外層に設置されている。主にミューオンの通過位置測定とトリガー信号の生成を担う。ミューオン検出器はガスで満たされたドリフトチューブを重ねて構成される。ドリフトチューブを通過したミューオンはガス中の分子をイオン化する。生成された電子をチューブ内のワイヤーで収集し、その到達時間からミューオンの通過位置を測定する。

表 1.3 現行 LHC と HL-LHC の比較 [10]。瞬間ルミノシティは 7 倍、積分ルミノシティは 10 倍になることが見積もられており、取得統計数の増加が期待できる。

	LHC	HL-LHC
重心系エネルギー	14	14
瞬間ルミノシティ [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	1×10^{34}	7×10^{34}
積分ルミノシティ [fb^{-1}]	300	3,000
1 バンチ交叉あたりの反応数	27	140

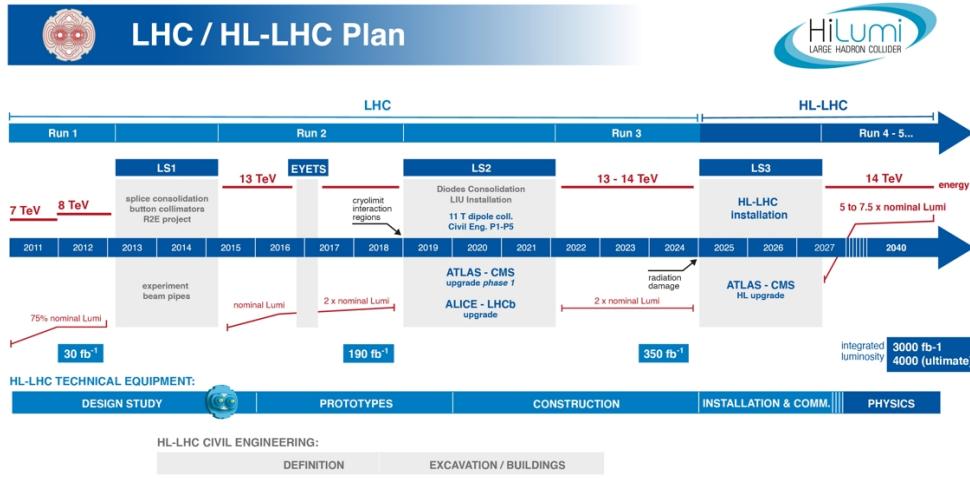


図 1.9 HL-LHC 運転計画 [11]。2025 年の初めより HL-LHC の導入、2027 年の途中より本運転が始まる。

1.4 HL-LHC 実験アップグレード計画

LHC では加速器のアップグレードを予定しており、これを HL-LHC アップグレード計画と呼ぶ。詳細を以下に示す。

1.4.1 概要

HL-LHC ではルミノシティ [9] を上げることで、衝突頻度を大きくし、取得統計数を増やす。LHC と HL-LHC の比較を表 1.3 に示す。

LHC の運転計画を表 1.9 に示す。2025 年の初めより HL-LHC の導入が始まり、2027 年の途中から HL-LHC 運転開始の予定となっている。

1.4.2 素粒子物理に対するモチベーション

HL-LHC の素粒子物理に対するモチベーションに 1 つとして、ヒッグス粒子の性質の精密測定があげられる。LHC、HL-LHC における粒子の質量とヒッグス粒子の結合定数の関係と統計誤差の見積もりをまとめたものを表 1.10 に示す。統計誤差が向上する見込みであり、より精密な標準模型の検証を行うこ

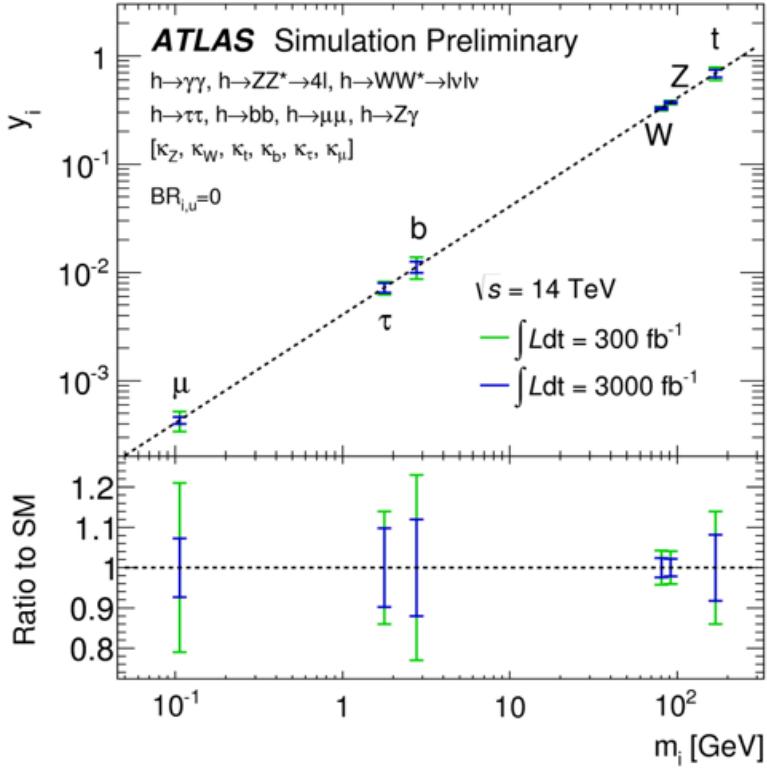


図 1.10 LHC、HL-LHC における粒子の質量とヒッグス粒子の結合定数の関係と統計誤差の見積もり [13]。図において青線、緑線がそれぞれ LHC、HL-LHC の測定における統計誤差の見積もり値を示している。統計誤差は向上する見込みであり、標準模型の精密検証をすることができる。

とができる。

1.4.3 内部飛跡検出器のアップグレード

HL-LHC のアップグレードによりルミノシティが増加するのに伴い、検出器には以下のような性能が要求される。

- 放射線耐性の向上。

統計量に伴い、放射線量も増加するため高放射線耐性が要求される。

- 高速読み出し。

1 バンチ交叉あたりの反応数 (パイルアップ) の増加に伴いトリガーレートが増加するため、現行よりも高速な読み出しが要求される。HLLHC 運転時の最内層の検出器において、FE チップあたりの想定ヒット数は 223.0、各ピクセルが持つヒット情報は 4 bit、想定トリガーレートは 1 MHz であり、FE チップを 4 枚搭載したモジュールでは $223.0 \times 4 \times (1 \times 10^6) \times 4 \simeq 4 \text{ Gb/s}$ の読み出しスピードが必要である。実際の要求値は 5.12 Gb/s であり、現行の検出器のスピード 160 Mb/s ではこの要求を満たすことができない。

- 検出器の細密化。

パイルアップが約 5 倍になるため、これらの衝突点を区別するためにはより細密な検出器を使用する必要がある。図 1.11 にイメージを示す。

HL-LHC に向けて内部飛跡検出器はアップグレードを予定しており、検出器の総入れ替えを行う。アッ

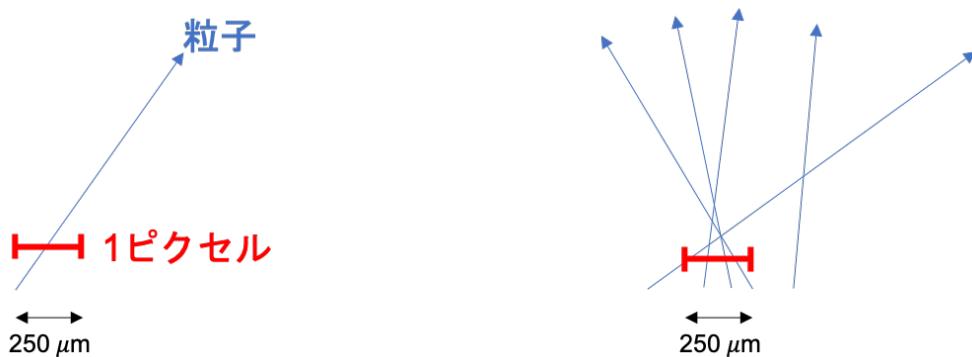


図 1.11 パイルアップ数増加のイメージ。図において青線が粒子、赤線が現行ピクセル検出器の 1 ピクセルの長さを示しており、 $250 \mu\text{m}$ である。左図が LHC、右図が HL-LHC の様子を表している。HL-LHC ではパイルアップが約 5 倍に増えるため、図のように 1 交叉あたりの発生粒子数も増える。これらを区別し、精度良く粒子の衝突点を計算するには今までよりも細密な検出器を設置する必要がある。

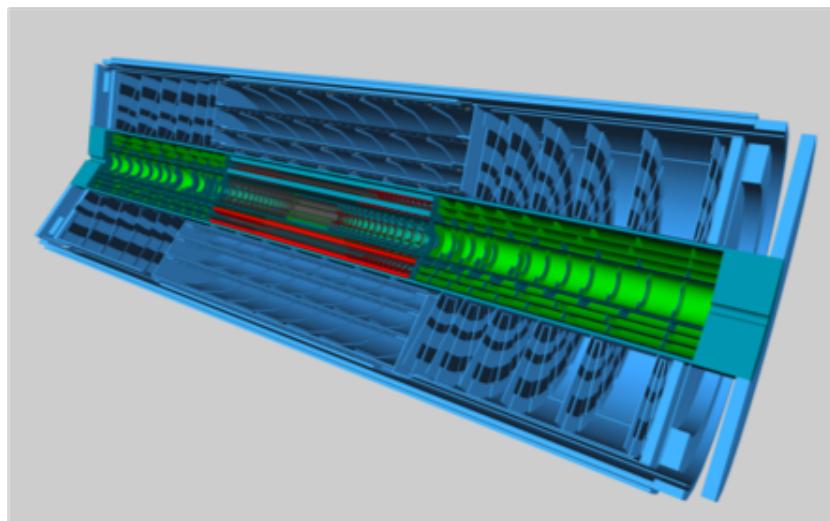


図 1.12 ITk の全体像 [12]。図は ITk 全体の模式図を示している。ITk はピクセル検出器(緑の領域)とストリップ検出器(青の領域)から構成される。

プグレード後の検出器を **Inner Tracker(ITk)** と呼ぶ。模式図を図 1.12 に示す。

ITk の構成と現行ピクセル検出器との比較

図 1.13 に ITk のビーム軸方向の断面図を示す。ITk はピクセル検出器とストリップ検出器で構成される。ピクセル検出器はバレル、傾斜バレル、エンドキャップ部で構成され、バレル部は 5 層となっている。

ピクセル検出器の配置に関して、現行と ITk の比較を表 1.4 に示す。またモジュール数の比較を表 1.5 に示す。ITk では現行に比べ、 η が大きい領域まで検出器を設置するため、その分使用するモジュール数も増える。

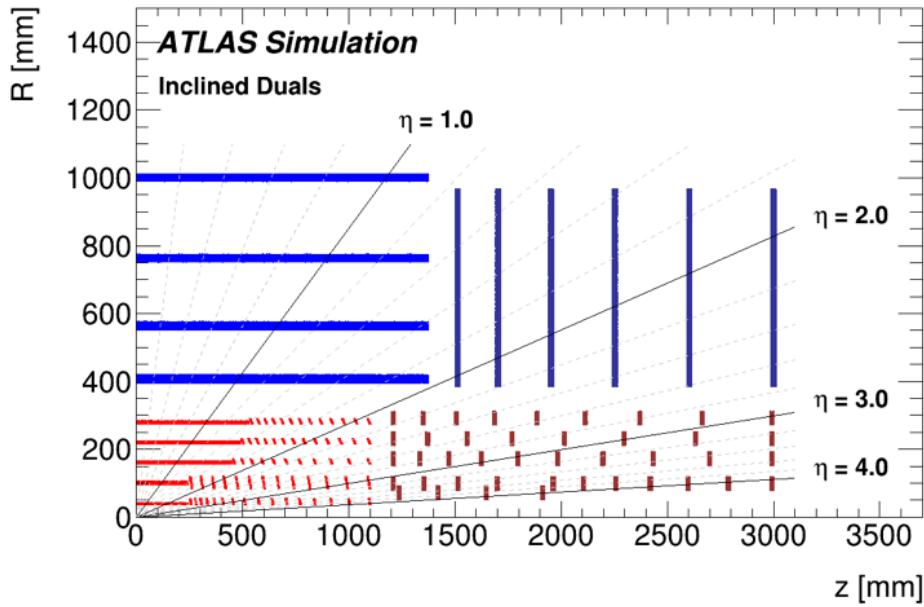


図 1.13 ITk の断面図 [12]。ITk はピクセル検出器とストリップ検出器から構成され、バレル部はそれぞれ 5、4 層の構造を持つ。ピクセル検出器はバレル部、傾斜バレル部、エンドキャップ部に分かれ、 $|\eta| < 4.0$ までの範囲をカバーし、粒子の飛跡測定をすることができる設計となっている。

表 1.4 ピクセル検出器設置領域の比較。表は現行と ITk におけるピクセル検出器設置領域の比較を示す。 η の範囲に関して、括弧内は度数法の値を示す。ITk では遷移放射検出器を使用しないため、ピクセル検出器の半径方向のカバー領域が増え、層の数は 4 から 5 となる。また前方方向に生じる粒子測定を行うために、 η の領域も拡大している。

	現行	ITk
$r[\text{mm}]$	33~129	39~279
層の数 (バレル部)	4	5
$ \eta $	$< 2.5 (< 19^\circ)$	$< 4 (< 4.2^\circ)$

表 1.5 搭載するピクセルモジュール数の比較。表は現行と ITk のピクセル検出器において、各構造における搭載ピクセルモジュールの数を示している。傾斜バレル部、エンドキャップ部はリングと呼ばれる構造が z 軸方向に層になっており、括弧内の数字は各層におけるリング構造の数を示す。ITk ではバレル部で現行の約 2 倍になっているのに加え、傾斜バレル部、エンドキャップ部に多くのモジュールを搭載する設計となっていることが分かる。

層	バレル部		傾斜バレル部		エンドキャップ部	
	現行	ITk	現行	ITk	現行	ITk
1	280	192	—	512(32)	—	64(8)
2	286	240	—	520(26)	—	242(22)
3	494	660	—	660(22)	—	320(20)
4	676	960	—	1040(26)	288(6)	352(16)
5	—	1300	—	1300(26)	—	468(18)
合計	1736	3352	0	4032	288	1446

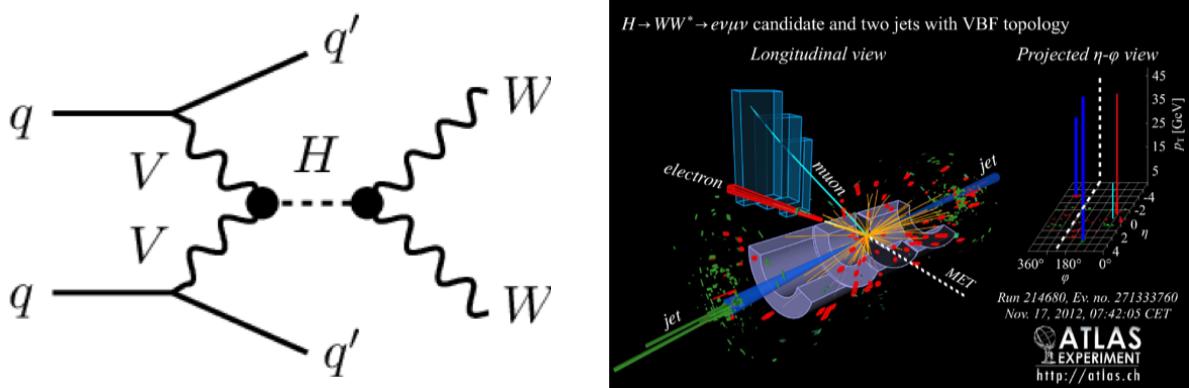


図 1.14 VBF イベントの図 [14]。図は VBF イベントの一つである $H \rightarrow WW^*$ 崩壊チャンネルを示している。左図はファインマン図、右図はそのイベントディスプレイを表す。このイベントにおいて、初めに相互作用したクオーク対は、それぞれハドロン化しじェットと呼ばれる粒子群となる。このときこれらのジェットは前方方向に大きな運動量を持つ。ITk では $|\eta| < 4.0$ の範囲をカバーしており、このようなジェットを捉えることができるため、測定精度が向上する。

表 1.6 VBF $H \rightarrow WW$ の測定における測定精度の見積もり [12]。表は 3000 fb^{-1} において、 $|\eta| < 2.7$ 、 $|\eta| < 4.0$ の領域を使用した場合の VBF $H \rightarrow WW$ イベント測定における測定精度の見積もりを示している。 $|\eta| < 4.0$ の領域を使用することで測定精度が向上する見積もりであることが分かる。

検出器の使用範囲	$ \eta < 2.7$	$ \eta < 4.0$
系統誤差	22%	12%

1.4.4 物理測定に及ぼす影響

カバーする η の範囲が大きい特徴が生む利点として、前方方向に大きな運動量を持つ粒子を含む物理イベントの測定精度向上があげられる。

この例として、ボゾン粒子結合によるヒッグス粒子生成過程 (Vector boson fusion higgs production, VBF) をあげる。VBF の 1 つのチャンネルに関するファインマン図及びイベントディスプレイを図 1.14 に示す。この衝突により生じる 2 つのクオークはジェットと呼ばれる粒子群となり、多くのジェットは図 1.15 に示すように前方方向に大きな運動量を持つ。

現行 ATLAS 検出器のカロリメータでは $|\eta| < 4.9$ の領域をカバーしている。ITk では、飛跡検出器でジェットを捉えることができる。これによりエネルギーや崩壊点測定精度の向上が期待され、VBF イベントの測定精度を向上することができる。

$VBF H \rightarrow WW$ における測定精度は表 1.6 のように見積もられる [12]。改善する大きな理由は、前方方向に生じるジェットを正確に捉えることで、VBF イベント、パイルアップのジェットを区別する精度が向上し、より正確にバックグラウンドイベントの削減をすることができるためである。

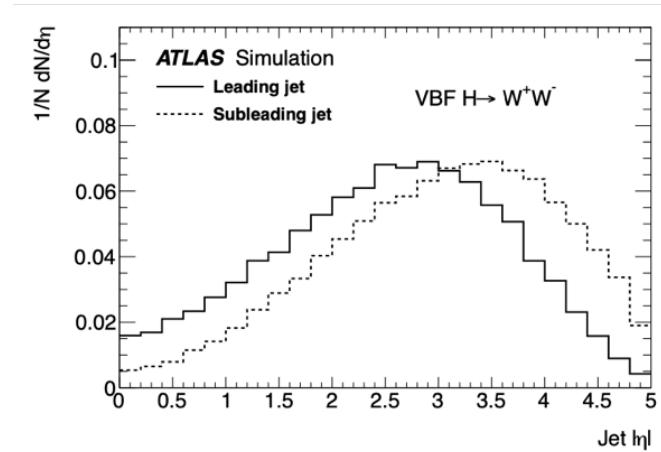


図 1.15 VBF イベントにおけるジェットの運動方向の η 分布 [12]。図はシミュレーションの結果を示している。横軸はジェットの運動方向の η 成分を示しており、縦軸はイベント数に比例する量である。“Leading jet”、“Subleading jet”は各イベントにおいて 1、2 番目に大きな運動量を持つジェットである。 $|\eta| = 3 - 3.5$ 付近にピークを持ち、多くのジェットは前方方向に大きい運動量を持つことが分かる。

第2章

ピクセルモジュール

この章ではピクセルモジュールの構成と各構成部品について説明する。

2.1 ピクセルモジュールの構成

ピクセルモジュールはベアモジュールとフレキシブル基板より構成される。ベアモジュールは荷電粒子の通過を検知し、信号を発生するシリコンセンサーと、AD 変換を行う Front-end チップ (FE チップ) で構成される。ベアモジュールが持つ FE チップの数はモジュールの種類によって異なる。モジュールの構成を図 2.1 に示す。

2.2 ピクセルモジュールの構成部品

2.2.1 シリコンセンサー

ピクセルモジュールに搭載するセンサーはシリコン半導体を用いている。センサー内部構造として pn 接合を持ち、逆バイアス電圧をかけ空乏層を広げた状態で使用する [15]。この空乏層領域に荷電粒子が通過すると、Bethe-Bloch の式 [16] に従い粒子はエネルギーを損失する。このエネルギー損失に従い、電子・ホール対が生成、これを収集することで荷電粒子の通過情報をアナログ信号として取得することがで



図 2.1 ピクセルモジュールの構成。図は Quad モジュールの構成を模式的に表したものである。モジュールは「ベアモジュール」と呼ばれる心臓部と「フレキシブル基板」を貼り付けることで作られる。ベアモジュールはセンサーと FE チップから成る。Quad モジュールの場合、1 枚のセンサーに対し FE チップは 4 枚である。センサーと FE チップは「バンプ」と呼ばれる構造で電気的に接続しており、1 ピクセルに対して 1 つのバンプ接合がなされている。FE チップとフレキシブル基板の接続には、ワイヤーが多数 ($O(100)$) 配線される。

表 2.1 センサーのスペック。

項目	プランナー	3D
ピクセルサイズ [μm^2]	50 × 50	50 × 50, 25 × 100
厚さ [μm]	100, 150	150



図 2.2 新型ピクセルモジュールに搭載するシリコンセンサーの断面図。図は新型ピクセルモジュールに搭載するシリコンセンサー断面の模式図を示している。p型半導体にn+型電極を埋め込んだn+ - in - p型と呼ばれる構造を持つ。p+側にフレキシブル基板、n+側にFEチップが付く。逆バイアス電圧を印加するとn+電極側から空乏層が広がる。

きる。

新型ピクセルモジュールに搭載するセンサーはバルク部にp、電極部にn+を用いたn+ - in - p型である。模式図を図 2.2 に示す。n+電極で電子を収集し、信号を取得する。

ITk のピクセルモジュールに使用するセンサーとしてプランナー、3D の 2 種類を開発している [12]。センサーのスペックを表 2.1 に記す。

2.2.2 読み出し FE チップ

読み出し FE チップはシリコン半導体を用いて作られた集積回路である。読み出し FE チップの主な役割は、シリコンセンサーで発生し受け取ったアナログ信号を整形、増幅したのち AD 変換し、後段に転送することである。AD 変換の方法は、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。この信号の値を **Time over Threshold (ToT)** と呼び、アナログ信号の大きさに比例する情報として扱う。

ToT の概念図を図 2.3 に示す。

RD53A

RD53A[15] は、新型ピクセルモジュールの研究、開発のために作られたプロトタイプの読み出し FE チップである。RD53A の性能を表 2.2 に示す。チップサイズ、ピクセル数は、ITk に搭載予定のモジュールが持つ FE チップの半分となっている。

FE チップ上の各ピクセルはアナログ回路部とデジタル回路部を持つ。RD53A では図 2.4 に示すように、3つの領域があり、それぞれの領域でピクセルのアナログ回路が異なる。左から順に Synchronous FE、Linear FE、Differential FE と呼ぶ。研究、開発用に 3つの領域が設けられているが、性能比較の結果 ITk に搭載するモジュールには Differential FE を用いることが決定している。なお、デジタル回路部は全てのピクセルにおいて共通である。それぞれの回路図は付録 B に示す。

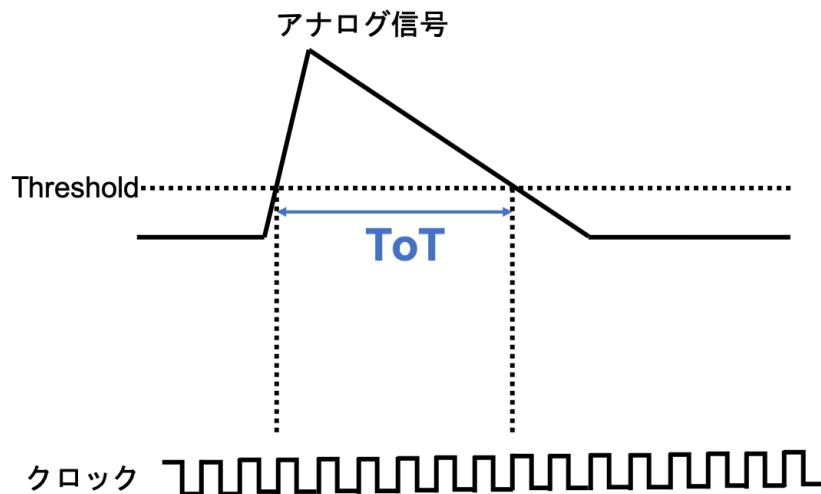


図 2.3 ToT の概念図。FE チップで生成されるデジタル信号は ToT と呼ばれる。図はその概念を模式的に表したものであり、FE チップで行われている AD 変換である。ToT はアナログ信号が Threshold 値を超えた時間幅に相当する。実際には ToT 間のクロック数 [b.c.] として取得される。ここで 1 b.c.(25 ns) は LHC における陽子バンチの交叉間隔に相当する。

表 2.2 RD53A のスペック。

チップサイズ [mm ²]	20.0 × 11.6
ピクセルサイズ [μm ²]	50.0 × 50.0
ピクセル数 [行 × 列]	400 × 192
トリガーレート [kHz]	1000
データレート [Mbps]	1280 × 4
ToT の範囲	0~15(4 ビット)
放射線耐性 [Mrad(トータルドーズ効果 [17])]	500

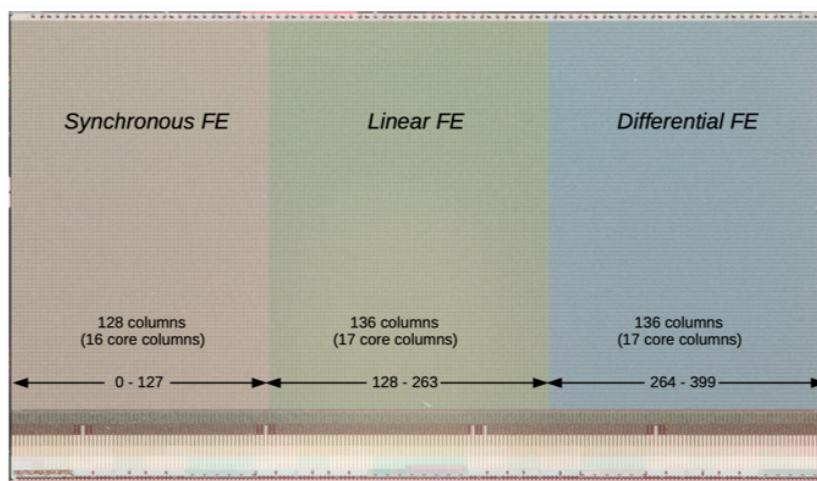


図 2.4 RD53A[15]。ピクセル数は 400 列 ×192 行となっている。図のように RD53A は 3 つの領域が設けられており、それぞれ Synchronous FE、Linear FE、Differential FE と呼ぶ。各領域のピクセルが持つアナログ回路が異なる。

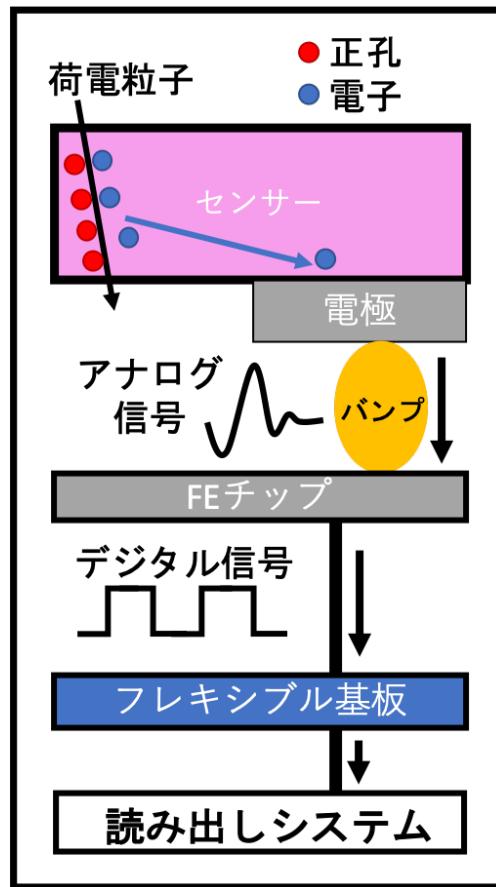


図 2.5 ピクセルモジュールにおける信号伝達の様子。図はピクセルモジュールにおける信号伝達の様子を模式的に表したものである。初めに、荷電粒子がセンサー部を通してエネルギー損失に応じた電子・ホール対を生成する。電子は電極により収集され、バンプを通してアナログ信号として FE チップに送られる。FE チップでは信号を整形、増幅後、デジタル信号に変換する。その後ワイヤーを通してフレキシブル基板、後段の読み出しシステムへ転送される。

2.2.3 フレキシブル基板

フレキシブル基板は、基板上に電子部品が搭載されたものである。FE チップからのデジタル信号を後段の回路へ転送する他、FE チップ、センサーへの電圧印加制御の役割も担う。

フレキシブル基板は材料としてポリイミドを使用している。一般的にリジット基板に使われるガラスやエポキシに比べ物質量が小さいため、粒子との相互作用確率を小さくし、物理測定に対する影響を小さくする狙いがある。

2.2.4 信号伝達

モジュールの信号伝達の様子を模式的に表したものと図 2.5 を示す。センサーで生成した信号は FE チップ、フレキシブル基板の順に送られ、後段の読み出しシステムへ転送される。

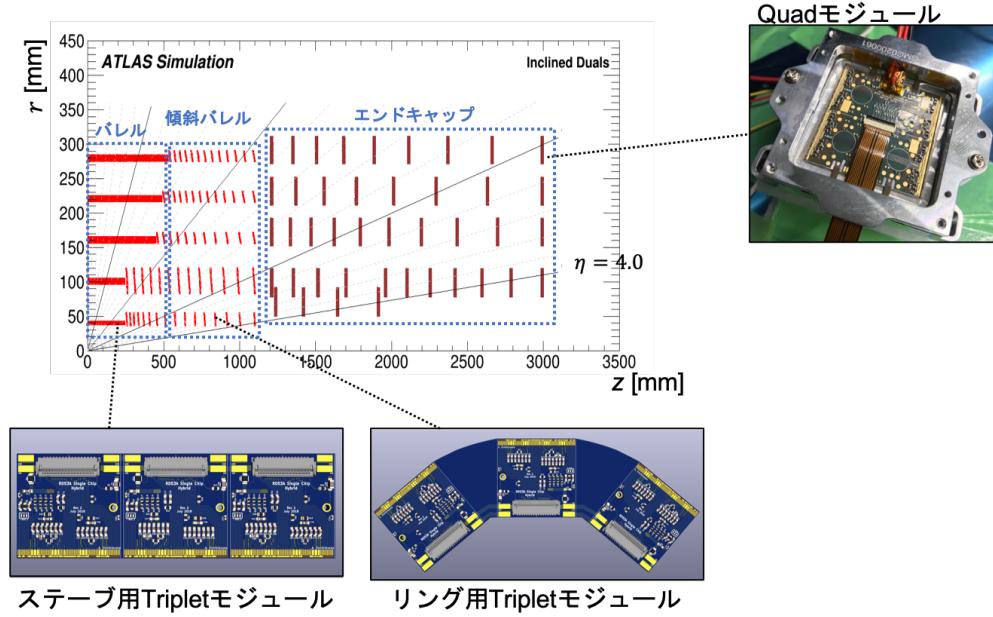


図 2.6 搭載するモジュールのプロトタイプと ITk における配置。2 種類の Triplet モジュールと Quad モジュールを搭載する予定となっている。Triplet モジュールは最内層のステープ構造、リング構造の領域に使われる。それ以外の領域には Quad モジュールが使われる。

2.3 新型モジュールの種類

現在、ITk に搭載するモジュールとして以下の 3 つのモジュールを予定している。

- ステープ用 Triplet モジュール.
- リング用 Triplet モジュール.
- Quad モジュール.

Quad モジュールはシリコンセンサー 1 つ、FE チップを 4 枚搭載する。一方、Triplet モジュールはシリコンセンサー 1 つ、FE チップを 1 枚搭載するシングルベアモジュールを 3 つ搭載する。

ITk 最内層は Triplet モジュールで構成される。バレル部を構成する Triplet モジュールをステープ用、傾斜バレル、エンドキャップ部を構成するものをリング用と呼ぶ。それ以外の全ての領域は Quad モジュールで構成する。それぞれのモジュールの図及び検出器上における位置の一例を図 2.6 に示す。

ITk に搭載するモジュールにおいて、1 つの FE チップが持つピクセル数、大きさは RD53A の 2 倍の設計となっており、それぞれ 400×384 、約 $20.0 \times 20.0 \text{ mm}^2$ である。そのため Quad モジュールの大きさは約 $40.0 \times 40.0 \text{ mm}^2$ となる。Triplet モジュールは図のように FE チップが横並びの配置となっており、ステープ用モジュールの大きさは約 $20.0 \times 60.0 \text{ mm}^2$ となる。

第3章

モジュール組み立てと品質試験

ITk に搭載するピクセルモジュールは、世界中に存在する複数の組み立て機関で製造される。またモジュールの組み立てとともに性能確認のための品質試験を行う。

本研究の主題はこのモジュール品質試験のデータ管理を行うデータベースシステムの開発である。本章ではデータ管理の対象となるモジュールの組み立て工程と品質試験の概要を説明する。開発したデータベースシステムについては 4 章で説明する。

3.1 組み立て工程

モジュール組み立て機関は、初めにベアモジュールとフレキシブル基板をそれぞれの製造機関から受け取る。組み立て工程として以下が設定されている。

1. ベアモジュール・フレキシブル基板貼り付け.
 - 受け取ったベアモジュールとフレキシブル基板を接着剤を用いて貼り付ける。
2. ワイヤー配線.
 - ワイヤー配線を行い、FE チップとフレキシブル基板を電気的に接続する。
3. ワイヤー保護.
 - ワイヤーが損傷があり断線が起きると、そのワイヤーに接続されているピクセルの読み出しができなくなる。これを防ぐため、モジュールに屋根型の構造を取り付け、ワイヤーを物理的に保護する。
4. パリレンコーティング.
 - モジュール読み出し部以外での電通や放電を防ぐため、パリレン高分子を用いてモジュールを保護する。
5. 温度サイクル試験.
 - ITk 運転時の環境温度は -45°C から 40°C まで変化しうる [18]。この温度変化に耐えうるかを確認するため、温度サイクルを行う。
6. 低温耐久試験.
 - ITk 運転時の典型的な環境温度は $-15\sim0^{\circ}\text{C}$ 付近である。これに耐えうる性能を持つかを確認するために、低温下にモジュールを長時間設置する耐久試験を行う。

流れと各組み立て工程のイメージを図 3.1 に示す。

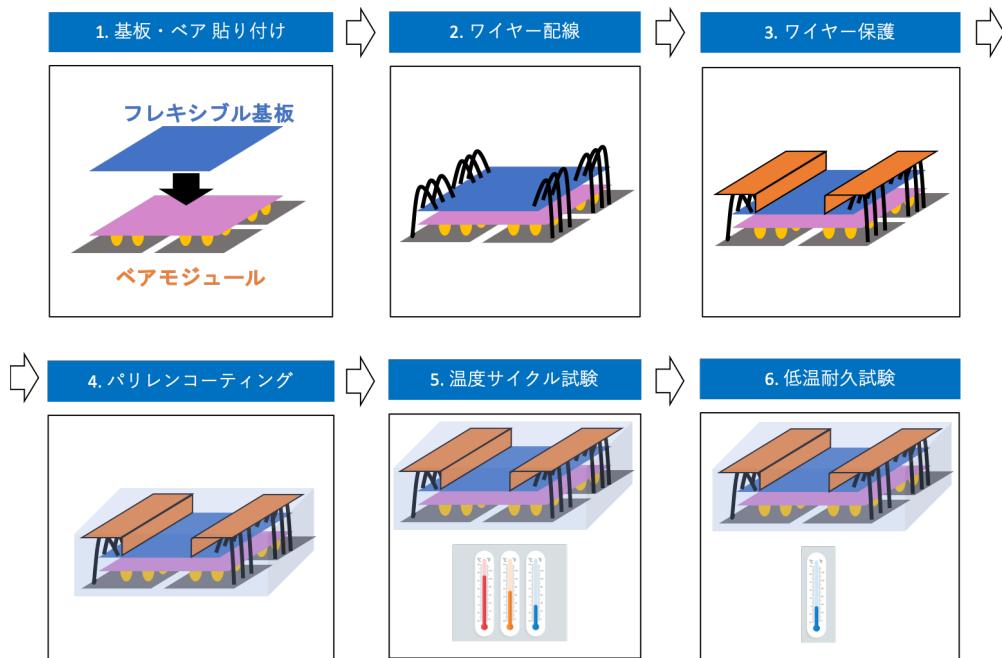


図 3.1 組み立て工程のイメージ図。モジュール組み立て機関はペアモジュール、フレキシブル基板を受け取り、それらの貼り付け、ワイヤー配線、ワイヤー保護、パリレンコーティング、温度サイクル試験、低温耐久試験の順に組み立てを行う。

3.2 品質試験

品質試験には全数検査である品質管理試験 (**Quarity Control, QC**) と、抜き取り検査である品質保証試験 (**Quarity Assurance, QA**) がある。QC は全数検査であるため、全ての個体に対してその品質を完全に保証できる。これに対して、破壊を伴う試験など製品の価値がなくなる恐れのある試験を全数に行なうことは不経済であり現実的でない。こういった試験は QA に含まれる。

本論文では QC を対象とした開発を行っており、これ以降 QC を品質試験と呼ぶ。各組み立て工程に対して行なう品質試験の代表的なものを以下に示す。

3.2.1 外観検査

モジュールの外観写真を撮り、モジュールに以下のような欠陥がないかを確認する。また外観検査の様子を図 3.2 に示す。

- 抵抗等取り付け部品の損傷.
- ワイヤーの接着位置確認.
- 回路やワイヤーの断線.
- 付着汚れ.

3.2.2 質量測定

モジュールの質量を測定する試験である。

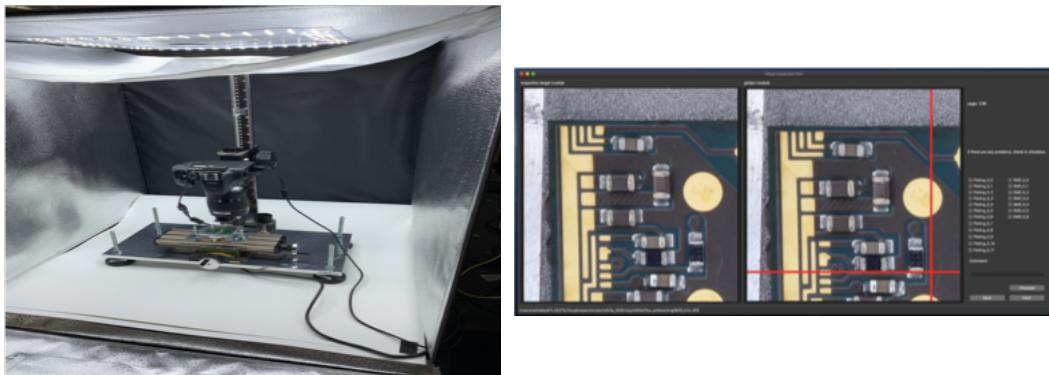


図 3.2 外観検査の様子。図は日本で実際に行われた外観検査における写真撮影の様子（左図）と撮影写真的確認画面（右図）である。左図のように、写真撮影は光量を制御するため暗箱の中で行っている。写真撮影後、右図のように撮影した写真と良好なモジュールの写真を見比べ、電気部品の損傷、回路の断線などの何らかの所見があった場合には記録をする。

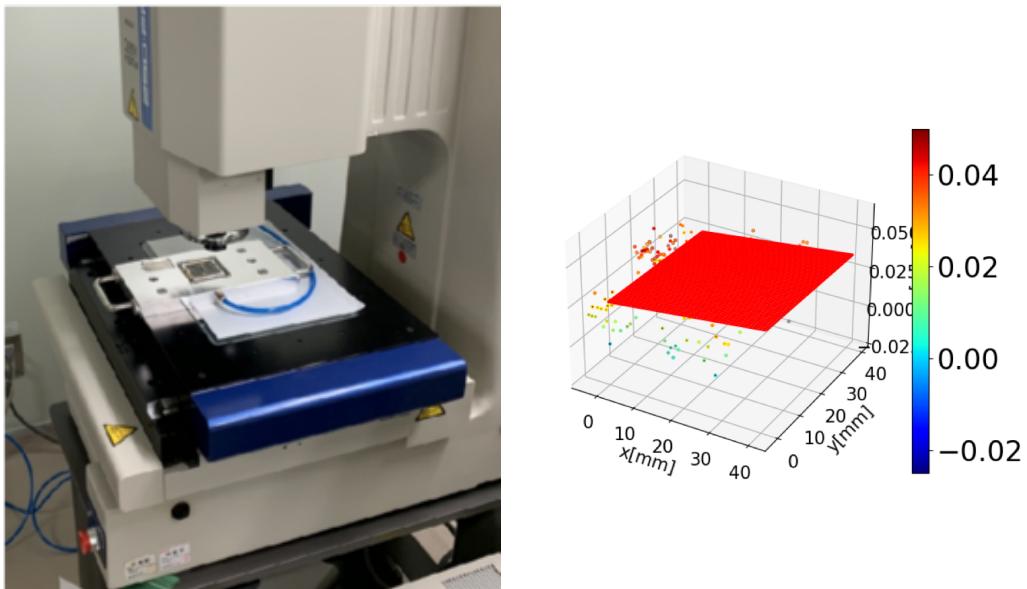


図 3.3 平坦性測定の様子。図は日本で実際に行われた平坦性測定における測定の様子（左図）と解析結果（右図）である。左図のように専用の装置を用いてモジュールの位置座標を何点か測定する。得られた測定点は右図のように図示し、平面でフィッティングを行う。フィット平面からのズレや、モジュールの厚みを計算する。

3.2.3 平坦性測定

モジュール上の位置座標を何点か測定し、モジュールの平坦度、厚さ、歪み具合等を測定する。測定の様子と解析の例を図 3.3 に示す。

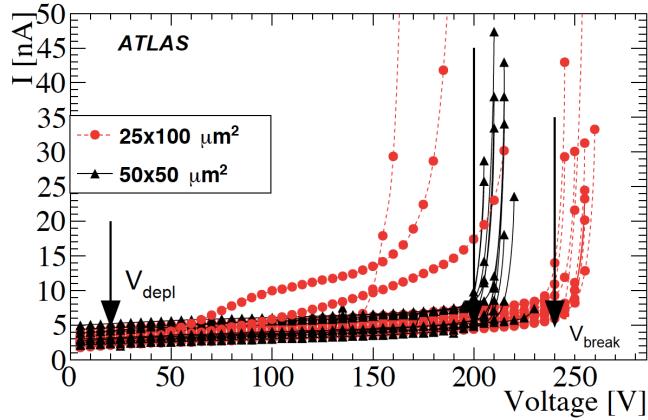


図 3.4 センサー電流-電圧特性結果の例 [6]。図は複数のセンサーに対する測定結果の例を表している。横軸にセンサーに対する印加電圧 [V]、縦軸に電流 [nA] を示す。逆バイアス電圧を印加しているため、電流がほとんど流れていらないが、ある地点から電流が急激に増加していることが分かる。この降伏電圧はセンサーにより個体差があるが、どれも 150 – 250 V 付近となっていることが分かる。

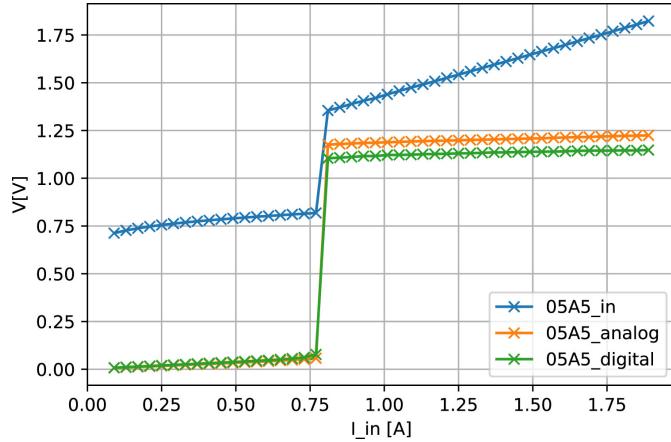


図 3.5 FE チップ電流-電圧特性試験結果の例 [20]。横軸に FE チップに対する設定電流、縦軸は測定した実際に FE チップにかかる電圧値を示している。青、橙、緑はそれぞれ回路全体、アナログ回路部、デジタル回路部に加わる電圧値である。0.75 V 付近で急激に電圧が増大しており、この段階で FE チップが機能するようになる。それ以降は線形になっているのが分かる。

3.2.4 センサー電流-電圧特性確認

モジュールのシリコンセンサーに逆バイアス電圧をかけ、電流-電圧特性をみる。印加電圧を段階的に変化させながら電流値を記録し、電圧-電流間の関係を確認する。この試験の結果の例を図 3.4 に示す。逆方向電圧では電流はほとんど流れないが、降伏電圧に達すると急激に増大する。これは pn 接合の特性 [15] であり、正常であればこの振る舞いを確認することができる。

3.2.5 FE チップ電流-電圧特性確認

FE チップに対して電圧をかけ、電流-電圧特性をみる。設定電流を段階的に変化させながら電圧値を記録し、電流-電圧間の関係を確認する。この試験の結果の例を図 3.5 に示す。FE チップは抵抗として振る舞い、電流、電圧間の関係は線形性を持つ。

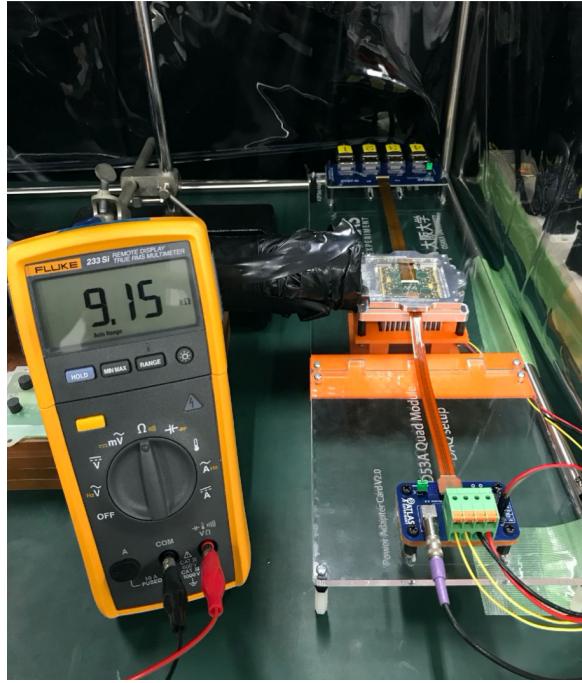


図 3.6 読み出し試験の様子。図は日本で実際に行われた読み出し試験の様子である。図の右側に見えるように、モジュールにケーブルを配線し、PCとの通信を行うことでデータ取得をする。また図の左側では抵抗値を測定している。これはモジュールに付属しているサーミスタの抵抗値を確認することで、温度情報を取得するためのものである。

3.2.6 読み出し試験

読み出し試験では、読み出し回路が正常に機能するのかを確認する。読み出し試験の様子を図 3.6 に示す。モジュールに読み出しケーブルを配線し、PC と通信を行い、データを取得する。また試験において温度、FE チップやセンサーに与える電圧、電流といった検出器の操作、環境関わる情報取得を行って、異常がないかを確認する。これらの情報を扱うシステムは「**Detector Control System, DCS**」と呼ぶ。

汎用読み出しシステム YARR

YARR(Yet Another Rapid Readout) システム [21] は、ピクセルモジュール用に開発された、PCI Express(PCIe) 接続を用いた読み出しシステムである。ファームウェア、ソフトウェアから構成される。YARR ではファームウェア上で行う処理はデータ通信やトリガー処理等の最低限に抑え、その他多くの処理をソフトウェアで担うという特徴がある。

読み出し試験に使用するファイルと変数

YARR で扱う全てのファイルは **JSON (JavaScript Object Notation)** と呼ばれる形式で記述される。

YARR を用いた読み出し試験では以下の設定ファイルが要求される。

- 試験設定ファイル.
 - 読み出し試験の初期設定や解析手法を記述する。
- ハードウェア設定ファイル.
 - 試験に用いるハードウェアの指定や設定を記述する。
- 接続設定ファイル.
 - 読み出しを行う FE チップの種類やチャンネルを記述する。
- FE チップ設定ファイル.
 - 各 FE チップ毎に出力され、全ピクセルに共通な試験の設定値、各ピクセル固有の設定値を記述する。

また試験 1 項目ごとに以下のファイルが、1 つのディレクトリに生成される。

- 試験結果ファイル.
 - 読み出し試験の結果値を記述する。各 FE チップ毎に出力される。
- 試験設定ファイル.
- FE チップ設定ファイル.
 - 試験の中で変更が加えられるため、各 FE チップにつき試験前後の 2 つのファイルが出力される。
- 試験ログ.
 - 試験情報を記録する。

後述するローカルデータベースシステムにおいてはさらに以下の設定ファイルを用いる。

- データベース設定ファイル.
- 試験者設定ファイル.
- 試験場所設定ファイル.

読み出し試験項目において以下の *Occupancy* という量が定義される。試験用電荷の入射数や発行トリアンガーハイバードの数等、発行した信号数を n_i 回、取得信号数を n_0 としたとき、

$$\text{Occupancy} = \frac{n_0}{n_i} \times 100 [\%] \quad (3.1)$$

と定義する。

読み出し試験では各 FE チップに対して「レジスタ」と呼ばれる設定値が存在し、FE チップ上の全ピクセルに対して共通なものを「グローバルレジスタ」、各ピクセル固有のものを「ピクセルレジスタ」と呼ぶ。レジスタの 1 つに Threshold 用レジスタがある。読み出し試験ではこのレジスタの調整を行う。

読み出し試験項目

以下に読み出し試験項目の一覧を示す。

レジスタの読み書き.

グローバル及びピクセルレジスタの読み書きが正常にできるのかを確認する試験.

デジタル回路読み出し.

各ピクセルのデジタル回路部に試験用電荷を入射し、信号の応答数を確認する試験. デジタル回路部の性能確認に用いる.

アナログ回路読み出し.

各ピクセルのアナログ回路部に試験用電荷を入射し、信号の応答数を確認する試験. アナログ回路部の性能確認に用いる.

Threshold 測定.

各ピクセルの Threshold 値を測定する試験.

Threshold グローバルレジスタ調整.

Threshold グローバルレジスタの変更、基準となる Threshold に近づけるための調整.

Threshold ピクセルレジスタ調整、再調整、精密調整.

Threshold ピクセルレジスタの変更、基準となる Threshold に近づけるための調整.

ToT グローバルレジスタ調整.

ToT グローバルレジスタの変更、基準となる ToT に近づけるための調整.

ノイズ占有率測定.

各ピクセルのノイズの頻度を確認する試験.

スタックリピクセル測定.

入力電荷の有無にかかわらず、常に信号を出力するピクセルを確認する試験.

クロストーク測定.

各ピクセルのクロストークの有無を確認する試験. 隣接する Analog FE に試験用電荷を入射し、応答を確認する.

バンプ接続確認測定.

各ピクセルのバンプ接合が正常かを確認する試験. 隣接する Analog FE に大きめの試験用電荷を入射する. バンプが正常であればクロストークにより応答を確認できる.

各試験における試験用電荷入射の方法について、付録 B に示す。

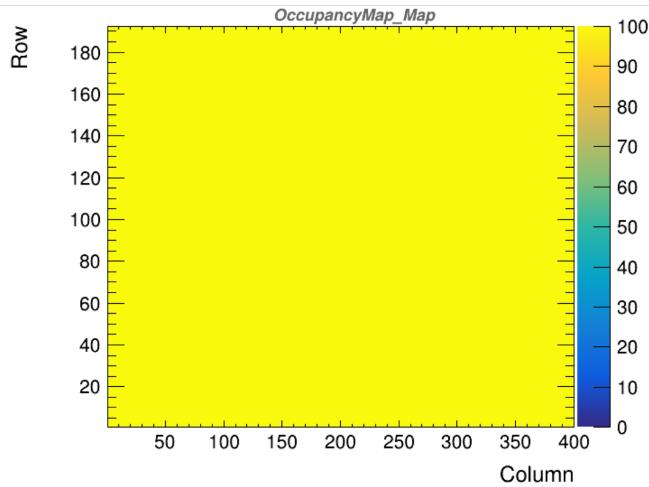


図 3.7 デジタル回路読み出しにおける *Occupancy* 分布の例。図は RD53A を用いたデジタル回路読み出しの結果であり、横軸、縦軸はそれぞれピクセルの列 (400)、行 (192) に対応する。 z 軸は各ピクセルにおける *Occupancy* の値を示している。正常なピクセルは 100 付近になることが期待され、図では全てのピクセルで 100 であると分かる。

表 3.1 デジタル回路読み出しにおける結果ファイル一覧。各ファイルは FE チップ 1 つの試験結果を記す。

ファイル名	データ	ファイルサイズ
OccupancyMap	各ピクセルの <i>Occupancy</i> を記す。	1.5 MB
Enmask	$Occupancy = 100$ のピクセルを 1、それ以外を 0 とした値を持つ。	1.3 MB
L1Dist	信号取得タイミングの分布を持つ。	0.53 kB

主な試験項目の詳細について以下で説明する。

デジタル回路読み出し

各ピクセルのデジタル回路部に試験用電荷を入射し、信号を取得する。 $Occupancy$ (式 3.1) は、入射電荷数 n_i と取得信号数 n_0 で定義される。YARR のデフォルトでは $n_i = 100$ となっている。

デジタル回路読み出しにおける *Occupancy* の二次元分布の例を図 3.7 に示す。一般にこの試験において、*Occupancy* は 100 であることが望ましい。

この試験の結果として出力されるファイルを表 3.1 に示す。

アナログ回路読み出し

各ピクセルのアナログ回路部に試験用電荷を入射し、信号を取得する。デジタル回路読み出しと同様、 $Occupancy$ (式 3.1) は、入射電荷数 n_i と取得信号数 n_0 で定義され、*Occupancy* は 100 であることが望ましい。試験結果として出力されるファイルはデジタル回路読み出しと同じ形式である。

Threshold 測定

各ピクセルのアナログ回路部に試験用電荷を入射し、入射電荷数 n_i と取得信号数 n_0 より *Occupancy* を測定する。これを入射電荷量を増加させて繰り返し行う。あるピクセルにおけるこの処理結果の例を図 3.8 に示す。

この分布を以下の式でフィッティングする。フィッティングの形に由来し、これを「S カーブフィッティ

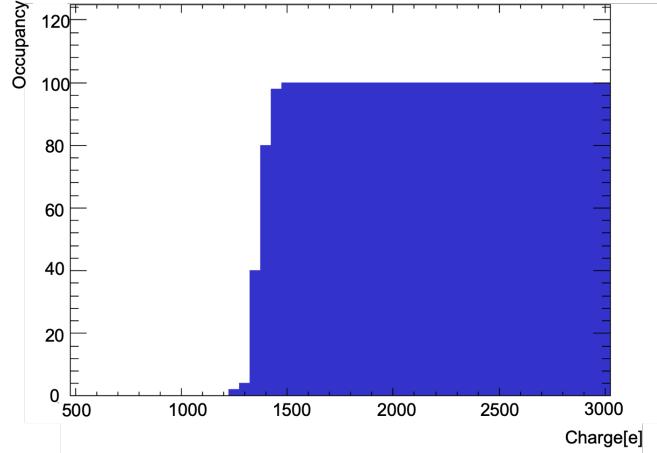


図 3.8 入射電荷量と *Occupancy* の関係。横軸はピクセルに対する入射電荷量 [e]、縦軸は *Occupancy* を示す。入射電荷量の単位 e は、電荷量 C を素電荷 $e = 1.6 \times 10^{-19}[\text{q}]$ で割ったものである。Threshold 測定の際にはこのように入射電荷量を増加させながら *Occupancy* の値を測定する。測定結果を後述する式 (3.2) でフィットし、Threshold とノイズの値を得る。

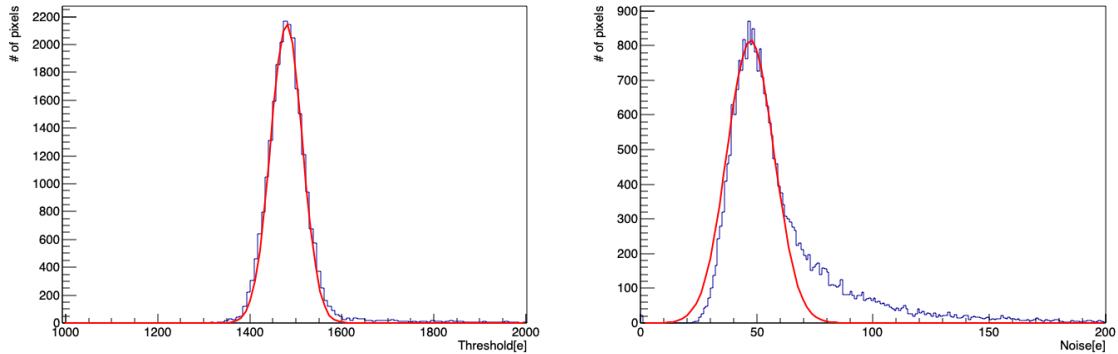


図 3.9 Threshold 値とノイズの分布。図はある FE チップ上のピクセルにおける Threshold 値(左図)とノイズ(右図)の分布を示している。また赤線はガウス関数によるフィット関数を示しており、これにより平均値と幅を取得する。

ング」と呼ぶ。

$$f(x) = 0.5 \times \left[2 - \text{erfc} \left(\left\{ \frac{x - Q}{\sigma \times \sqrt{2}} \right\} \right) \right] \times p \quad (3.2)$$

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) \quad (3.3)$$

ここで $\text{erf}(x)$ はガウスの誤差関数である [22]。

得られた Q 、 σ がそれぞれピクセルの Threshold 値、ノイズに相当する。ある FE チップにおける Threshold 値、ノイズの分布の例を図 3.9 に示す。この分布をガウス関数でフィットすることで、全ピクセルに対する Threshold、ノイズの平均値と幅が得られる。

この試験において、出力される結果ファイルを表 3.2 に示す。

ToT 測定

各ピクセルのアナログ回路部に試験用電荷を入射し、ToT を測定する。この操作を複数回(デフォルトでは 100 回)行い、平均値と幅を求める。出力される結果ファイルを表 3.3 に示す。

表 3.2 Threshold 測定における結果ファイル一覧。各ファイルは FE チップ 1 つの試験結果を記す。

ファイル名	データ	ファイルサイズ
ThresholdMap	各ピクセルの Threshold 値を記す。	2.2 MB
ThresholdDist	Threshold の分布を記す。	4.6 kB
NoiseMap	各ピクセルのノイズを記す。	2.2 MB
NoiseDist	ノイズの分布を記す。	2.3 kB
Chi2Map	各ピクセルの S カーブフィッティングにおける χ^2 の値を記す。	2.3 MB
Chi2Dist	χ^2 の分布を記す。	1.1 kB
StatusMap	各ピクセルのフィットの良さを 0 から 5 の 6 段階で記す。	1.3 MB
StatusDist	フィットの良さの分布を記す。	0.49 kB
TimePerFitDist	S カーブフィットに要した時間を記す。	3.1 kB
Scurve	あるピクセルの入射電荷量と Occupancy の関係を記す。 複数のピクセルについて出力する。	1.0 kB
sCurve	全てのピクセルの Scurve を重ね合わせた値を記す。	1.3 MB

表 3.3 ToT 測定における結果ファイル一覧。各ファイルは FE チップ 1 つの試験結果を記す。

ファイル名	データ	ファイルサイズ
MeanToTMap	各ピクセルの ToT の平均値を記す。	1.9 MB
MeanToTDist	ToT 平均値の分布を記す。	0.59 kB
SigmaToTMap	各ピクセルの ToT の標準偏差を記す。	2.2 MB
SigmaToTDist	ToT 標準偏差の分布を記す。	1.8 kB
L1Dist	信号取得タイミングの分布を記す。	0.59 kB

表 3.4 ノイズ占有率測定における結果ファイル一覧。各ファイルは FE チップ 1 つの試験結果を記す。

ファイル名	データ	ファイルサイズ
OccupancyMap	各ピクセルの Occupancy を記す。	1.3 MB
NoiseOccupancyMap	各ピクセルの NoiseOccupancy を記す。	1.3 MB
NoiseMask	$NoiseOccupancy < 10^{-6}$ のピクセルを 1、それ以外を 0 とした値を記す。	1.3 MB

ノイズ占有率測定

試験用電荷を入射せずに、周波数 f [Hz]、時間 t [sec] のトリガーをかけ、取得信号数 n_0 を測定する。YARR のデフォルトでは $f = 5000$ 、 $t = 300$ である。Occupancy(式 3.1) は、発行したトリガー数 $n_i = f \times t$ と取得信号数 n_0 で定義される。

また NoiseOccupancy を以下で定義する。NoiseOccupancy の分布の例を図 3.10 に示す。

$$NoiseOccupancy = \frac{n_0}{t} \times (25 \times 10^{-9}) \quad (3.4)$$

25×10^{-9} [sec] = 25[nsec] は 1 b.c. である。

あるピクセルにおいてノイズの量が大きいと Occupancy、NoiseOccupancy が値を持つ。読み出しにおいてはノイズは小さいことが望まれ、これらの値は 0 に近いと正常なピクセルであると言える。

出力される結果ファイルを表 3.4 に示す。

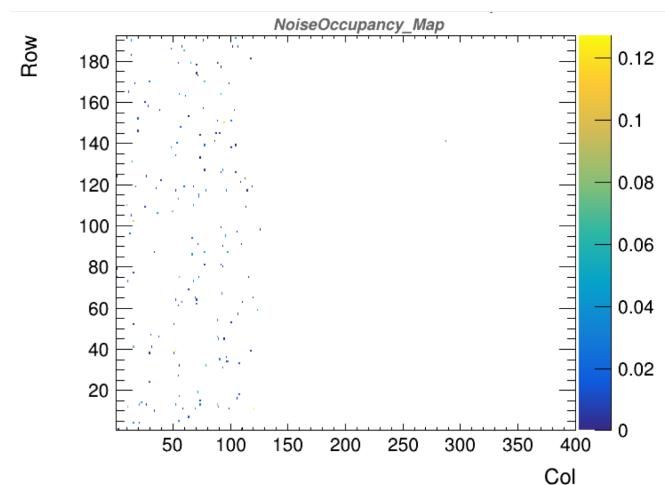


図 3.10 ノイズ占有率測定における *NoiseOccupancy* 分布の例。図は RD53A を用いたデジタル回路読み出しの結果であり、横軸、縦軸はそれぞれピクセルの列(400)、行(192)に対応する。z 軸は各ピクセルにおける *NoiseOccupancy* の値を示している。正常なピクセルでは限りなく 0 に近い値になることが期待され、図ではほとんどのピクセルが 0 となっているが、列番号が 0 から 120 付近の領域で値を大きく持つピクセルが存在する。

表 3.5 ピクセル解析の評価基準一覧 [23]。読み出し試験において各ピクセルが正常に機能しているかを判断するためにピクセル解析を行う必要があり、その判断基準が表のように定義されている。この基準一覧は不良評価であり、全ての基準に当てはまらないピクセルが良好と判断される。不良ピクセルの数や分布は、モジュールの品質を決定する 1 つの要素となり、ITk に搭載するモジュールの選択や配置の決定に用いられる。

評価名	読み出し項目	評価基準
Digital Dead	Digital scan	$Occupancy < 1$
Digital Bad	Digital scan	$Occupancy < 98 \text{ or } Occupancy > 102$
Merged Bump	Analog scan Crosstalk scan	$Occupancy < 98 \text{ or } Occupancy > 102$ High Crosstalk
Analog Dead	Analog scan	$Occupancy < 1$
Analog Bad	Analog scan	$Occupancy < 98 \text{ or } Occupancy > 102$
Tuning Failed	Threshold scan	S カーブフィット失敗 (YARR では $\chi^2 = 0$ となる)
Tuning Bad	Threshold scan ToT scan	$ Threshold - Threshold_{\text{平均}} > 5 \times Threshold_{\text{幅}}$ $ToT = 0 \text{ or } 15$
High ENC	Threshold scan	$ \text{ノイズ} - \text{ノイズ}_{\text{平均}} > 3 \times \text{ノイズ}_{\text{幅}}$
Noisy	Noise scan	$NoiseOccupancy > 10^{-6}$
Disconnected Bump	Disconnected bump scan Source scan	現段階では未決定 $Occupancy$ が FE チップ全体平均の 1%
High Crosstalk	Crosstalk scan	$Occupancy > 0 \text{ with } 25\text{ke} \text{ (sync FE)}$ $Occupancy > 0 \text{ with } 40\text{ke} \text{ (lin and diff FE)}$

Threshold 調整とピクセル解析

今後この論文では、この試験を読み出し試験と呼ぶ。以下の流れで読み出しを行う。

- デジタル回路読み出し.
- アナログ回路読み出し.
- Threshold 測定.
- Threshold グローバルレジスタ調整.
- Threshold ピクセルレジスタ調整.
- ToT グローバルレジスタ調整.
- Threshold グローバルレジスタ再調整、精密調整.
- Threshold 測定.
- ノイズ占有率測定.
- スタックピクセル測定.
- クロストーク測定.

この試験の中では読み出し回路の性能確認に加えて、各ピクセルが持つ Threshold、ToT をある共通値に近づける調整を行う。

測定後、試験結果の解析を行い、モジュール上の各ピクセルが正常かどうかを判断する。設定されている評価基準を表 3.5 に示す。不良ピクセルには評価基準に応じた評価名が付けられる。

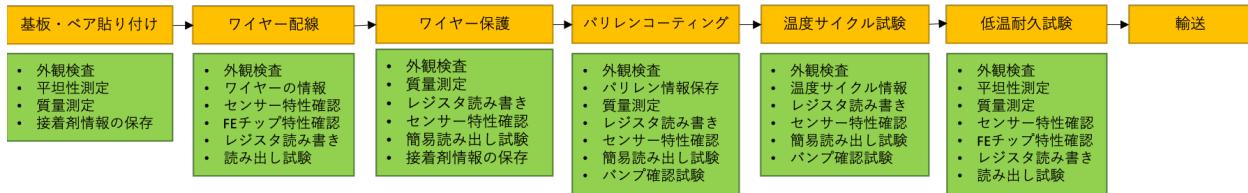


図 3.11 組み立て工程と対応する品質試験一覧。節 3.1 で述べた各組み立て工程において、複数の品質試験を行う必要がある。図は各組み立て工程と対応する品質試験一覧を示している。試験数は 30 程度存在する。

簡易読み出し試験

品質試験項目の 1 つに、以下の項目を扱う簡易読み出し試験がある。

- レジスタの読み書き.
- デジタル回路読み出し.
- アナログ回路読み出し.
- Threshold 測定.
- ToT 測定.
- バンプ接続確認測定.

3.2.7 各組み立て工程における品質試験

各組み立て工程と品質試験項目を図 3.11 に示す。図より、1 モジュールに対して行われる品質試験は 30 程度存在することが分かる。

3.3 検出器量産におけるデータ管理

ITk の製造に向けて、世界的に約 10,000 のモジュール量産を予定している。そのため世界に約 25 箇所ある組み立て機関では $O(100) \sim O(1,000)$ のモジュールを作る。例として日本では約 2,000 個の Quad モジュール生産を予定している。

また上述したように 1 モジュールに対して 30 程度の品質試験を行う。日本のように 2,000 モジュール作る機関であれば約 6,000 の試験結果が得られる。この数の品質試験結果を正確に管理することが必要となる。特に読み出し試験については、1 試験につき更に細かい項目に細分化され、項目、結果ファイルも多様である。これらの情報は最終的に共通のデータベースに保存する必要があり、各組み立て機関で適切に管理する必要がある。

本研究では各組み立て機関におけるモジュール情報及び品質試験のデータ管理を簡易化することを目的として、データベースシステムの構築を行った。このシステムについて 4 章で説明する。

第4章

モジュール情報及び品質試験結果管理システム

3章で述べたように、モジュール組み立て及び品質試験を世界中で行う。これらの情報はデータベースシステムを用いて管理することが決定していて、現在この開発を行っている。システムは、ITkの製造に関わる全情報を保存する中央データベースと、各組み立て機関に設置し、データ管理を行うローカルデータベースから成る。データベースシステムの模式図を図4.1に示す。

本章ではこれらのデータベースの概要と、本研究における開発項目を説明する。

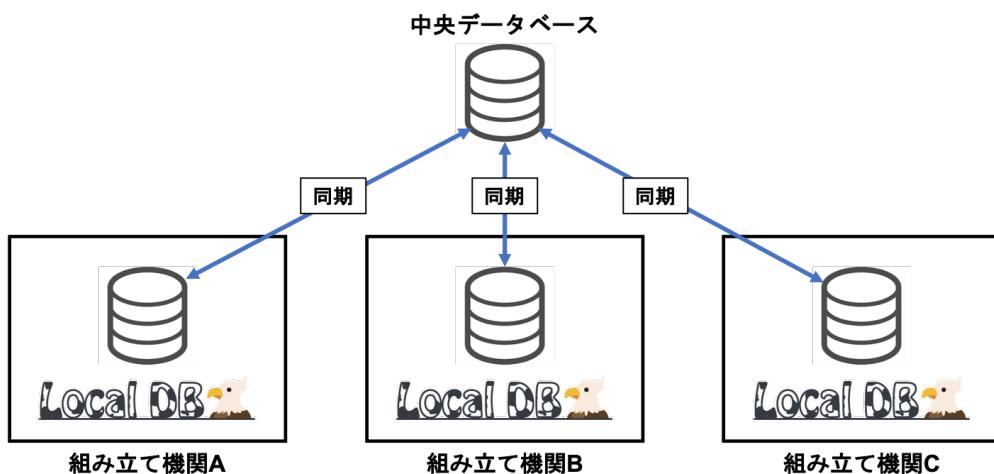


図4.1 データベースシステムの模式図。モジュール情報と品質試験を管理するデータベースはITkの製造に関わる全情報を保存する中央データベースと、各組み立て機関に設置し、データ管理を行うローカルデータベースからなる。全モジュール組み立て機関はローカルデータベースを設置しデータを管理する。中央データベースに全ての情報を保存するために、データベース間は同期が行われる必要がある。

4.1 中央データベース

4.1.1 中央データベースの概要

概要

中央データベースは、ITk の製造に関する全ての情報の保存を目的として開発されたデータベースである。ユニコーン大学 [24] が開発、運用を行っていて、チェコにデータベースサーバーが設けられている。ITk の製造にあたって、シリコンセンサやフレキシブル基板といった小さな部品から製造を行い、それらを用いたモジュールの組み立て、複数モジュールを搭載したステープやリングの組み立てを経て ITk が完成する。また各組み立て段階において、品質試験を行う。これらの過程における全ての構成部品の情報、及び品質試験結果を中央データベースに保存する。

意義

中央データベースを扱う重要な目的の 1 つに、ITk に用いるモジュールの選別とその配置の決定があげられる。中央データベースに保存された品質試験結果を解析し、ITk に搭載するモジュールを選別を行う。また、モジュールの配置も品質を考慮して決定する。例として以下の 2 つをあげる。

1. $|\eta|$ が小さい領域には、不良ピクセルが少なく品質の良いモジュールを搭載する。
2. 不良ピクセルの領域や不良モジュールが固まらないようにする。

項目 1 に関して、ヒッグスなど物理解析で興味の対象となる粒子の多くは相対的に大きい質量をもち、 $|\eta|$ の小さい領域に生成される。図 1.14 のイベントディスプレイでも、ヒッグス粒子から生成される電子やミューオンが持つ $|\eta|$ は小さいことが分かる。そのため、 $|\eta|$ が小さい領域には品質の良いモジュールを配置する。項目 2 に関して、不良ピクセルやモジュールの領域がばらけるようにモジュールの配置を決定する。

次に中央データベースに保存された情報は、検出器運転時の参考値として扱われる。モジュールを例にだとすると、読み出し試験を行った際の最適な設定値を中央データベースに保存するため、実際の運転時に参照することができる。また運転前後での検出器性能比較を行うことができる。

4.2 ローカルデータベース

4.2.1 ローカルデータベースの意義と概要

中央データベースでは、前述したようにモジュール情報のみならず ITk の製造に関わるすべての情報を管理する。データベースの機能としては、製造を通して汎用的に使えるものになっている。モジュールの組み立て及びその品質試験に関しては3章で述べたように工程が複数に渡り、行う品質試験の数も多い。1つの組み立て機関で多いところでは数千個のモジュールを作ることになるため、データ管理が簡単にかつ円滑に進むようになっているのが好ましい。このような理由から、組み立て機関での生産性、利便性に特化し、円滑な生産をサポートすることを目的としたデータベースシステムを開発しており、これを「ローカルデータベース」と呼ぶ。システムの概要図を図4.2に示す。オープンソースのサービスであるMongoDB[25]と、ローカルデータベース用ウェブアプリケーションを併用することで、データ管理や中央データベースとの同期を行うシステムとなっている。ここで開発しているウェブアプリケーションはPythonのウェブフレームワークであるFlask[26]を使用している。

ローカルデータベースシステムは以下のような利点を持ち得る。これらの利点を持つシステムの開発、実装を行うことが開発課題となっている。

- ローカルにデータベースサーバーを立てるため通信が速く、円滑にデータ管理を行うことができる。
- モジュールの組み立て工程を管理し、組み立て工程に応じた試験項目の表示や解析を行うことで生産者の適切な処理を助ける。
- モジュールに特化したデータ管理、結果解析を行うことで異常をいち早く検知できる。
- 試験者情報や試験時間など、品質試験結果以外の必要な情報を正確に管理できる。

一方で欠点として、ローカルデータベースと中央データベース間で同期を正確に実行することが技術的に困難であることがあげられる。この問題は本研究で取り組んだ内容であり、以下により解決する。それぞれの詳細については後述する。

- 同期ツールの開発.
- データベース操作の流れの確立.
- 操作方法の普及に向けたチュートリアル、ドキュメント作成.

4.2.2 先行研究と開発課題

先行研究で開発された項目と、本研究で取り組んだ開発課題を以下に示す。

先行研究[27]においてデータベースシステムの設計と開発がなされ、図4.2におけるいくつかの項目が開発された。以下に実装項目を記す。

- 読み出し試験結果保存のためのMongoDB内部構造の設計.
- YARRからMongoDBへの読み出し試験結果アップロード機能.
- 試験結果のソート及び閲覧が可能な、Flaskを用いたウェブアプリケーションの開発と実装.

モジュールの組み立て、品質試験に向けたデータ管理、そしてローカルデータベースの利点を活かすに

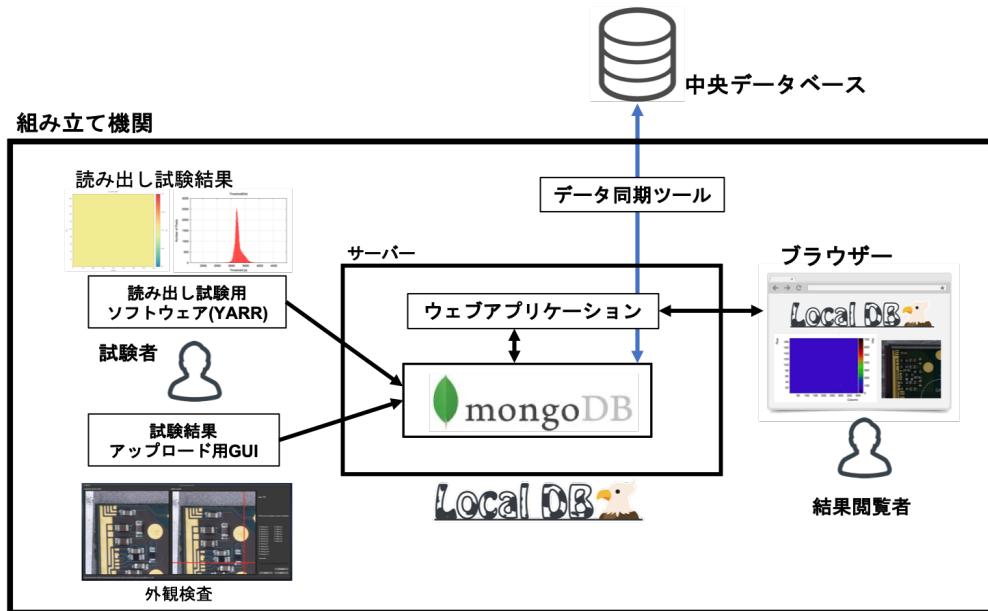


図 4.2 ローカルデータベースシステムの概要。各組み立て機関で MongoDB とローカルデータベース用ウェブアプリケーションの立ち上げを行い、独自にデータ管理をするシステムとなっている。ウェブアプリケーションには Python パッケージである Flask を使用している。品質試験者は図のようにいくつかのソフトウェアを用いて試験結果を MongoDB に保存する。保存された結果はウェブアプリケーションによって閲覧することができる。また結果は中央データベースに集める必要があるため、同期ツールを用いて試験結果の共有を行う。

は以下のような開発課題が残されていた。

1. 中央データベースの内部構造の実装 (節 4.3.1).
2. 中央データベースとローカルデータベース間の同期ツールの開発 (節 4.3.2).
3. ローカルデータベースにおける品質試験に特化したデータ管理と機能提供.
4. 量産時におけるデータベース操作の流れの確立 (節 4.3.7).

本研究ではこれらの開発課題に対して取り組みを行なった。特に開発項目 3 に関しては、以下の機能の開発、実装を行なった。

- (i) 品質試験者及びシステムユーザ管理機能及びコメント付加等の各種ユーザ機能 (節 4.3.3).
- (ii) 組み立て工程の管理と品質試験結果の選択機能 (節 4.3.4).
- (iii) 読み出し試験におけるピクセル解析ツールの開発 (節 4.3.5).
- (iv) 読み出し試験結果の検索機能 (節 4.3.6).

なお先行研究で開発したデータ構造やウェブアプリケーションは既に複数の機関で試験運用されていたため、本研究ではその構造や使用しているパッケージを大きく変更せずに、拡張する形で開発を行なった。

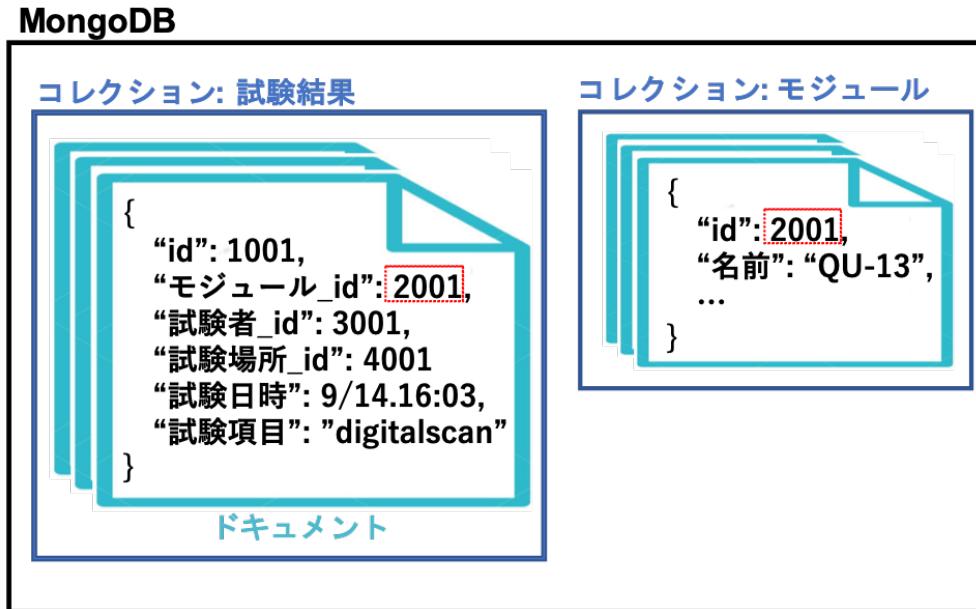


図 4.3 MongoDB の構造の例。図のように MongoDB では JSON 形式でデータを格納する。1 枚の JSON インスタンスをドキュメントと呼び、複数のドキュメントが格納されている枠組みをコレクションと呼ぶ。ドキュメントの構造及びコレクション間の関係等を決めることでデータベースの構造を定義する。ドキュメント間の紐付けは、各ドキュメント内部に ID を持つことで可能となる。図の例では “試験結果” コレクションのドキュメントが {“モジュール_id”:2001} の情報を持っており、これが “モジュール” コレクションに保存されているドキュメントの ID に対応する。

4.2.3 MongoDB と内部構造

MongoDB とは NoSQL に分類されるデータベースである。MongoDB の内部構造 [28] について簡単に表したものを見ると図 4.3 に示す。一般的な SQLDB のようにテーブル形式ではなく、JSON 形式で情報を格納する。情報を保持している一枚の JSON インスタンスを「ドキュメント」と呼び、「コレクション」と呼ばれる枠に複数のドキュメントが格納されている。各ドキュメントは「ID」と呼ばれるハッシュ値を持っていて、異なるコレクションにおけるドキュメント間の紐付けはこの ID を用いて行う。

ローカルデータベースシステムにおいて、MongoDB を使用する主な利点を以下に示す。

- 各コレクションに格納するドキュメント構造が動的であるため、開発を柔軟に行うことができる。
- JSON 形式でデータを保持するため情報取得の際の整形処理が容易であり、ウェブアプリケーションとの親和性が高い。
- データのキャッシュをメモリ上に置き処理を実行するため、高速な読み書きが可能 [29]。

モジュール及び品質試験に用いる主なコレクションを表 4.1 に示す。また先行研究で設計された読み出し試験結果に関する内部構造を図 4.4 に示す。

表4.1 品質試験に用いる主なコレクション。ローカルデータベースシステムにおいて、MongoDB 内に 2 つのデータベースを設置し、使用する。

データベース名	コレクション名	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	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
localdbtools	QC.status	組み立て工程及び試験項目
	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

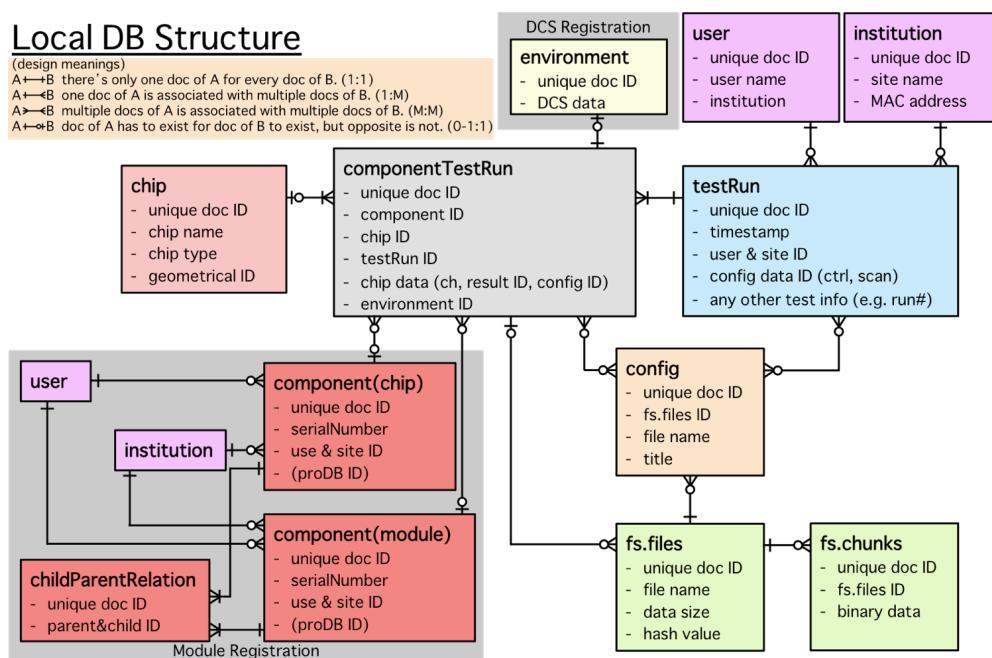


図 4.4 先行研究により設計された読み出し試験結果の MongoDB 内部構造 [27]。それぞれの四角はコレクション、直線は ID によるドキュメント間のリンクを示している。直線が十字になっている場合は対応するドキュメントが 1 つであることを示し、分岐しているものは複数であることを示す。また直線状の白丸は対応するドキュメントが存在しない場合があることを示している。

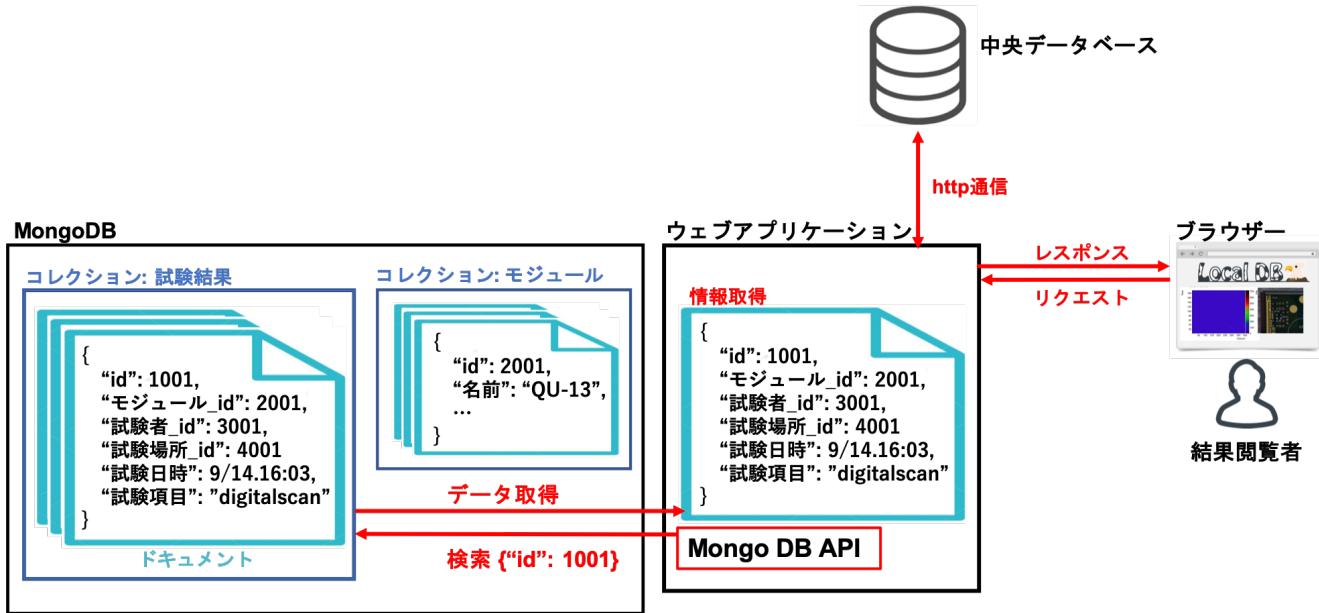


図 4.5 ウェブアプリケーション処理のイメージ。ウェブアプリケーションでは MongoDB と通信を行う API(PyMongo) を用いて、データベースのコレクションに検索をかけることで情報を取得する。取得した情報は整形されたのちブラウザに送信、中央データベースとの同期等の処理に用いられる。

4.2.4 ウェブアプリケーション

各組み立て機関において、試験者が品質試験結果を閲覧、管理するツールとして、ウェブアプリケーションを提供している。アプリケーション開発には、Python のウェブフレームワークである Flask を使用している。またアプリケーションにおいて MongoDB との通信に用いる API として、Python ライブライブラリである PyMongo[30] を用いている。アプリケーション処理に特化したイメージを図 4.5 に示す。このようにアプリケーションはデータベースとブラウザ、データベース間のインターフェースとなる。

試験結果を迅速に分かりやすく見るシステムを作り、円滑な生産補助や異常結果の早期発見を目的としている。またデータベースの情報管理のみならず、同期ツールや、後述する試験結果解析ツールなどの外部スクリプトの実行、結果取得等、生産時における多くのデータベース操作はこのアプリケーションを用いて行う。

ウェブアプリケーションでは、現在以下の機能を使用することができる。またある品質試験の結果ページを図 4.6 に示す。

- 登録モジュール情報及び品質試験結果の閲覧、解析.
- ローカルデータベースにおけるユーザ管理機能.
- データベース間同期実行機能.

Result: 1348

Information

Component

Result

Scan

Key	Data
runNumber	1348
testType	std_digitalscan
stage	MODULEWIREBONDING
component	20UPGR00000001 20UPGFC9999999
startTime	2020/11/13 19:49:40
finishTime	2020/11/13 19:49:45
user	hokuyama
site	lazulite
targetCharge	-1
targetTot	-1
exec	-r configs/controller/specCfg.json -c db-data/connectivity.json -s configs/scans/rd53a/std_digitalscan.Json -W
stopwatch	analysis: 626 config: 37 processing: 1 scan: 2821
QC	False
environment	True
plots	L1Dist EnMask OccupancyMap
passed	True
qcTest	False
qaTest	False
summary	False

Output Data

Type	Format	Chip	Display	Download
ctrlCfg	json			
dbCfg	json			
siteCfg	json			
userCfg	json			
scanCfg	json			
beforeCfg	json	20UPGFC9999999		
afterCfg	json	20UPGFC9999999		
EnMask	json	20UPGFC9999999		
OccupancyMap	json	20UPGFC9999999		
L1Dist	json	20UPGFC9999999		

PLOT JSROOT

L1Dist plotly

20UPGFC9999999

EnMask plotly

20UPGFC9999999

OccupancyMap plotly

20UPGFC9999999

DCS plot

© 2019 ATLAS Japan ITk and [Tokyo Tech](#) with the great help of LBNL.

Released under the GNU license, please read [LICENSE.TXT](#)

Please refer to the LocalDB official document. [Link](#)

If found any problem, please contact to [Hide Oide](#), [Eunchong Kim](#), [Arisa Kubota](#), [Hiroki Okuyama](#), [Satoshi Kinoshita](#)

図 4.6 品質試験結果ページの例。図は品質試験項目であるデジタル回路読み出しの結果を表している。図の上部に試験情報や設定値、下部に結果のグラフが表示されているのを確認できる。

4.3 本研究における開発項目

以下は本研究で開発した項目である。

4.3.1 開発項目 1: 中央データベースの内部データ構造の実装

中央データベースの枠組みは開発、運用が行われていたが、モジュール情報やその品質試験結果に関する構造は未実装であった。これらの情報を保存するために、構造の定義、実装を行う必要があった。以下の項目の情報構造について、モジュール開発グループの中で国際的に議論を行なながら、構造実装を行った。実装の際には中央データベースが提供しているデータベース操作用の API を用いた。

1. モジュールの種類とその構成部品 (図 4.7).
2. モジュール組み立て工程と付随する品質試験 (表 4.2).

また項目 1 に関して、Quad モジュールに関する例を図 4.8 に示す。

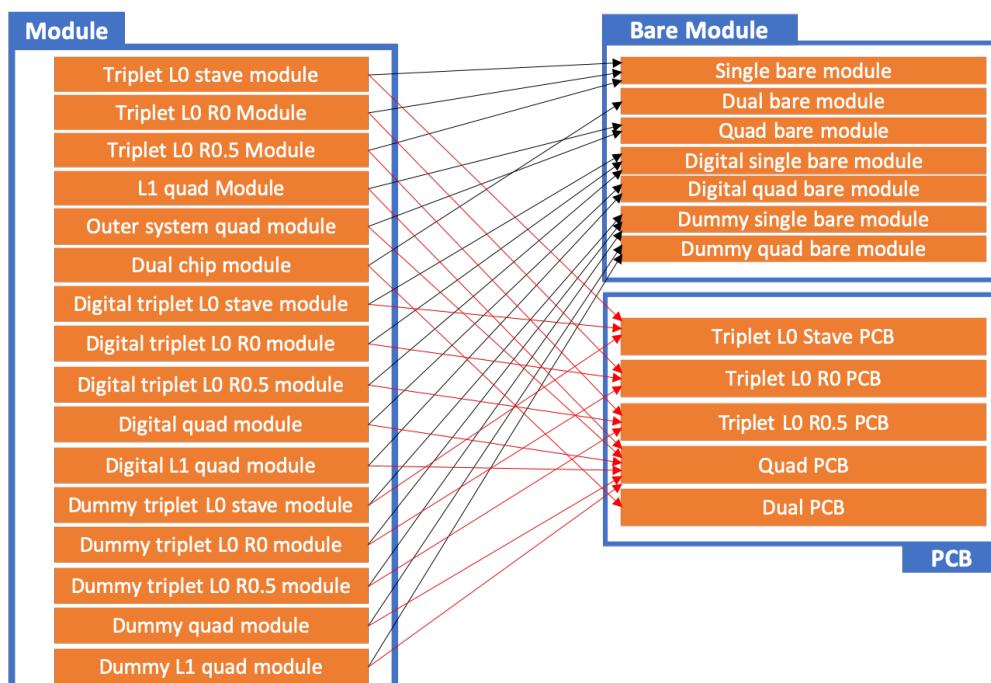


図 4.7 中央データベースにおけるモジュールの種類と構造。中央データベースにモジュールを登録するときの情報として、モジュールの種類、構成部品を図のように実装した。図の左側に実装したモジュールの種類を示しており、Triplet、Quad というように、モジュールの種類ごとに登録できるシステムとなっている。また矢印は構成部品を指しており、各モジュールは対応する Bare Module(ベアモジュール) と PCB(フレキシブル基板) を持つ。DB の中でモジュールと構成部品の紐付けも同時にを行うことができる。

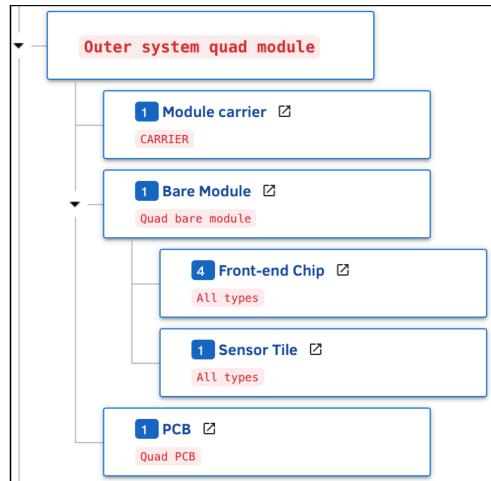


図 4.8 中央データベース内におけるモジュール構造の一例 (Quad モジュール)。例として Outer system quad module の中央データベース内の構造を示している。この種類では構成要素としてそれぞれ対応する種類の Module carrier、Bare Module、PCB を持つことがわかる。さらに Bare Module は FE chip を 4、Sensor を 1 持つことが分かり、Quad モジュールの構造が正しく実装されていることが分かる。

表 4.2 中央データベースにおける組み立て工程と付随するテスト項目。モジュールの組み立て工程及び品質試験をアップロードするため、表のような構造を実装した。データベース内でこの表に沿った組み立て工程の登録、更新、試験結果のアップロードができるようになった。

組み立て項目	付随する組み立て情報及び品質試験項目
1. Bare to PCB assembly	Visual Inspection Metrology Mass measurement Glue information
2. Wirebonding	Visual Inspection Wirebond information (Wirebond pull test) First power up Sensor IV SLDO VI Chip configuration Pixel failure test
3. Wirebond Protection	Visual Inspection Potting information Sensor IV Register test Readout for basic electrical
4. Parylene Coating	Visual Inspection Parylene information Mass measurement Sensor IV Register test Readout for basic electrical Bump bond quality
5. Thermal Cycling	Visual Inspection Thermal cycling info Sensor IV Register test Readout for basic electrical Bump bond quality
6. Burn-in	Visual Inspection Metrology Mass Measurement First power up Sensor IV SLDO VI Chip configuration Pixel failure test
7. Reception	

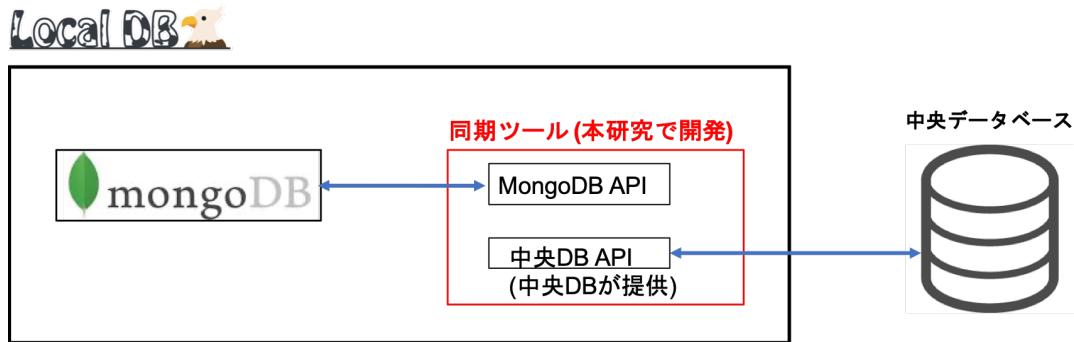


図 4.9 同期ツール処理のイメージ。本研究で開発を行っているのは図の赤線の領域に対応する同期ツールである。このツールは Python を用いて開発しており、処理の中でローカルの MongoDB と通信する API と、中央データベースが開発、提供をしている API を用いることで、2 つのデータベース間の同期を行っている。このとき、中央データベースとの通信は http 通信で行われる。

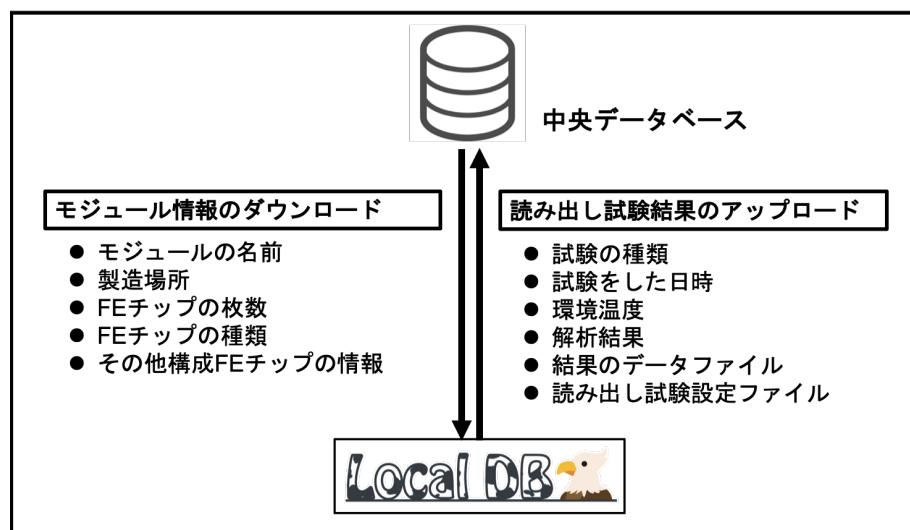


図 4.10 同期機能の概要。本研究ではモジュール情報のダウンロードと読み出し試験結果のアップロード機能を実装した。主に図に示している情報を同期する機能となっている。

4.3.2 開発項目 2: データベース同期ツールの開発

モジュール情報や品質試験結果の共有のために、中央データベースとローカルデータベースの間で同期が行われる必要がある。これを行うツールを設計、開発を行った。

ツールの中では中央データベースが開発、提供している中央データベース通信用 API と、節 4.2.4 で述べたローカルの MongoDB と通信する API の 2 つを用いることで同期を行っている。同期ツール処理のイメージを図 4.9 に示す。

特に本研究では以下の機能を実装した。

- モジュール及び構成する FE チップ情報のダウンロード機能.
- 読み出し試験結果のアップロード機能.

これらの機能のイメージを図 4.10 に示す。実装の詳細及び処理時間測定について 7 章で述べる。

4.3.3 開発項目 3-(i): ユーザ管理機能及び各種機能

異常があった際に確認することを目的として、誰が試験を行ったかを記録することが必要である。また、データベースの機能使用を制限することも必要である。例えば試験結果の閲覧等、データベース自体に変更を加えない機能は権限がなくても使用可能であることが望ましいが、モジュール登録やコメント付加機能等、データベースに書き込みを行う操作はユーザ制限をする必要があると考えられる。

これらの理由により、試験者及びデータベース使用者情報の管理機能を開発、実装した。この詳細を以下で述べる。

機能概要

データベース権限の段階として、管理者、権限付きユーザ、一般ユーザの3段階を設けた。各ユーザが使うことのできる機能を表4.3に示す。ここで一般ユーザはウェブページの閲覧のみができる、特に登録を必要としない。

権限付きユーザの機能としてモジュール及び試験結果にコメント、タグをつける機能を実装した。使用したときの様子を図4.11、4.12に示す。

ユーザ登録操作

表4.3において管理者と権限付ユーザの登録について説明する。

データベースシステム導入時に管理者のアカウントを作成する。コマンドプロンプト上で開発したスクリプトを実行することで管理者登録が行われる。この際ユーザ名とパスワードを入力する。

権限付ユーザについて、全ての品質試験者及びデータベースユーザ機能使用者は管理者によってユーザ登録される必要がある。登録はウェブアプリケーションを用いて行い、以下の情報を入力する。

- ユーザ名.
- 氏名.
- 所属機関.
- メールアドレス.

管理者が登録を完了すると、登録されたメールアドレスに登録完了メールと仮パスワードが届く。このメールに従い、ウェブアプリケーション上でユーザがパスワード登録を完了する。

このようにメール機能を用いることでパスワード漏洩の防止、管理者操作の削減を目的としている。

表 4.3 ローカルデータベースユーザ権限及び使用機能一覧。ローカルデータベースシステムにおけるユーザとして、管理者、権限付きユーザ、一般ユーザの3つを設けた。全てのユーザがウェブアプリケーションの閲覧をすることができる。管理者、権限付きユーザにはデータベース読み書き権限とウェブアプリケーションログイン権限が与えられ、試験結果のアップロード、アプリケーション上のユーザ機能の実行ができる。また管理者は権限付きユーザを登録することができる。

ユーザ	付加される権限	使用できる機能
管理者	ユーザ管理権限	権限付きユーザ登録機能
	データベース読み書き権限	権限付きユーザが使用可能な機能全般
	ウェブアプリケーションログイン権限	
権限付ユーザ	データベース読み書き権限	試験結果のアップロード
	ウェブアプリケーションログイン権限	中央データベースとの同期機能 その他ウェブアプリケーションの機能（コメント、タグ）
一般ユーザ		モジュール情報及び試験結果の閲覧

The screenshot shows a web application interface for 'LocalDB' under 'TOP / COMPONENTS / TEST'. At the top right, it says 'Asia/Tokyo' and 'okuyama'. Below the header, it displays 'Result: 26'. On the left, there are two sections: 'Information' and 'Component'. On the right, there is a 'Comments' section. It contains a table with columns: Comment, componentType, Name, Institution, and Date. One entry in the table is: 'Good results!!', 'front-end_chip', 'okuyama', 'TokyoTech', and the date '2020-11-29 09:24:03.498000'. Below the table is a form with fields for 'comment', 'okuyama', 'institution', and a 'submit' button.

図 4.11 ウェブアプリケーションにおけるコメント機能。権限付きユーザ及び管理者はモジュールや試験結果に対してコメントをすることができる。図のようにページの右側にコメント欄があり、コメントをテキスト形式で記述することができる。

The screenshot shows a 'Scan List' page for 'LocalDB' under 'TOP / COMPONENTS / TEST'. At the top right, it says 'Asia/Tokyo' and 'Sign in'. Below the header, it says 'ITk database for Yarr'. There is a search bar with 'Input keywords', 'Partial match' (radio button), 'Perfect match' (radio button), and a 'Search' button. The main area shows a table titled 'Test Data' with columns: Module Name, Chip Name, Test Type, User, Site, Date, Link, and Tag. Three rows of data are listed:

Module Name	Chip Name	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag
	JohnDoe_0	std_digitalscan	okuyama	default_host	2020/10/27 15:40:34	result page	anomaly
	JohnDoe_0	std_digitalscan	okuyama	default_host	2020/10/27 15:38:14	result page	good
	JohnDoe_0	std_digitalscan	okuyama	default_host	2020/10/27 15:37:41	result page	anomaly

図 4.12 ウェブアプリケーションにおけるタグ機能。権限付きユーザ及び管理者はモジュールや試験結果に対してタグをつけることができる。図は試験結果の一覧ページであり、図の表において一番右の列がつけられたタグを示している。図では“anomaly”や“good”といったタグが付けられていることが分かる。

機能の仕組み

ユーザ登録の際には内部で以下の2つの処理が行われるように実装した。

1. MongoDBアカウントの作成、読み書き権限の付与.
2. ウェブアプリケーションで用いるユーザ情報ドキュメントの作成.

1の処理を行う理由は、登録ユーザが試験結果をMongoDBにアップロードできるようにするためである。2の情報は、ウェブアプリケーション内でのログイン判断、ユーザの情報保持に使う。この情報を保存するコレクションは表4.1においてviewer.userに保存される。2つの処理について、実際に保存されるドキュメントの例をコード4.1、4.2に示す。

ソースコード4.1 MongoDBアカウント情報を持つドキュメントの例。リスト中の“roles”より、localdbとlocaldbtoolsの読み書き権限が付加されていることが分かる。

```

1 {
2     "_id" : "localdb.hokuyama",
3     "userId" : UUID("fee321eb-83b8-434a-a4a0-fff638b5db36"),
4     "user" : "hokuyama",
5     "db" : "localdb",
6     "credentials" : {
7         ...
8     },
9     "roles" : [
10        {
11            "role" : "readWrite",
12            "db" : "localdb"
13        },
14        {
15            "role" : "readWrite",
16            "db" : "localdbtools"
17        }
18    ]
19 }
```

ソースコード4.2 ウェブアプリケーションで扱うユーザ情報を持つドキュメントの例。リスト4.1で示したものとは別に、ウェブアプリケーション内でユーザ情報を扱うためにこのドキュメントを保持する必要がある。ウェブにおいてログインはこのドキュメントの存在確認をもってなされる。パスワードはハッシュ化して保存している。

```

1 {
2     "_id" : ObjectId("5f0bbe84ef87af2628865de7"),
3     "sys" : {
4         "rev" : 0,
5         "cts" : ISODate("2020-07-13T10:53:07.943Z"),
6         "mts" : ISODate("2020-07-13T10:53:07.943Z")
7     },
8     "username" : "hokuyama",
9     "name" : "Hiroki Okuyama",
10    "auth" : "readWrite",
11    "institution" : "Tokyo Institute of Technology",
12    "Email" : "okuyama@hep.phys.titech.ac.jp",
13    "password" : "5f4dcc3b5aa765d61d8327deb882cf99"
14 }
```

4.3.4 開発項目 3-(ii): 組み立て工程の管理と品質試験結果の選択機能

ローカルデータベースの中で組み立て工程の管理及び各工程に対応する品質試験の選択機能を実装した。組み立て工程の管理に関して、中央データベースに実装した項目をローカルデータベースでも管理し、モジュールの現工程を保存する。品質試験の選択に関して、ローカルデータベースへアップロードした品質試験結果の中から、本結果として中央データベースへ同期する結果を選択する必要がある。これは不必要的結果を同期せず、中央データベースを簡潔に保つ目的がある。

品質試験は各モジュール、各組み立て工程に対して行うものであるため、結果選択も同様に工程毎に行うことを想定している。結果選択後、データベースにおける組み立て工程は次のものへ自動的に更新する機能となっている。

概要

あるモジュール、組み立て工程に対して結果を選択する様子を図 4.13 に示す。組み立て工程も自動更新されていることがわかる。

仕組み

コード 4.3、4.4 のようなドキュメントを作成、保存する。コード 4.3 は全てのモジュールに対して共通のドキュメントであり、組み立て工程と各工程における品質試験項目を記録する。これらの情報は中央データベースから取得する。この情報を参照することでローカルデータベース内部で組み立て工程の管理が可能となる。

コード 4.4 は各モジュールに対して 1 つ存在し、以下のような情報を保持する。

- モジュールの現組み立て工程.
- 各工程における選択された品質試験結果の ID.

ソースコード 4.3 組み立て工程及び品質試験一覧情報のドキュメント。ローカルデータベース内に 1 つこのドキュメントを保持し、品質試験結果選択、組み立て工程の更新時にこのドキュメントを参照する。このドキュメントは中央データベースより情報取得して作成する。“stage_flow”の中に組み立て工程のリストを順番通り保持している。“stage_test”の中に各組み立て工程に対応する試験一覧を保持している。

```

1 {
2     "_id" : ObjectId("5fc89aa232d56b29091fd64d"),
3     "sys" : {
4         "mts" : ISODate("2020-12-03T07:58:26.310Z"),
5         "cts" : ISODate("2020-12-03T07:58:26.310Z"),
6         "rev" : 0
7     },
8     "dbVersion" : 1.01,
9     "proddbVersion" : 1.01,
10    "stage_flow" : [
11        "MODULETOPCB",
12        "MODULEWIREBONDING",
13        "MODULEWIREBONDPROTECTION",
14        "MODULEPARYLENECOATING",
15        "MODULETHERMALCYCLING",
16        "MODULEBURNIN",
17        "MODULERECEPTION"
18    ],
19    "stage_test" : {
20        "MODULETOPCB" : [
21            "OPTICAL",
22            "GLUE_MODULE_FLEX_ATTACH",
23            "MASS",
24        ]
25    }
26}

```

```

24        "METROLOGY"
25    ],
26    "MODULEWIREBONDING" : [
27        "WIREBONDING",
28        "OPTICAL",
29        "SENSOR_IV",
30        "PIXEL_FAILURE_TEST",
31        "SLDO_VI",
32        "WIREBOND",
33        "CHIP_CONFIGURATION"
34    ],
35    "MODULEWIREBONDPROTECTION" : [
36        "OPTICAL",
37        "POTTING",
38        "MASS",
39        "READOUT_IN_BASIC_ELECTRICAL_TEST",
40        "SENSOR_IV",
41        "REGISTER_TEST"
42    ],
43    ...
44 },
45 ...
46 }
```

ソースコード 4.4 モジュールの組み立て工程及び品質試験結果管理のためのドキュメント例。各モジュールにおいて現在の組み立て工程及び選択された品質試験結果がこのドキュメントに保存される。ドキュメント内の“currentStage”に現工程を保持する。また選択した試験結果の ID を“QC_results”に、組み立て工程ごとに保持する。

```

1 {
2     "_id" : ObjectId("5fc4be4c12a45922a91b0e75"),
3     "sys" : {
4         "mts" : ISODate("2020-11-30T09:41:32.411Z"),
5         "cts" : ISODate("2020-11-30T09:41:32.411Z"),
6         "rev" : 0
7     },
8     "dbVersion" : 1.01,
9     "proddbVersion" : 1.01,
10    "component" : "5fa79114e615fa000a1a5976",
11    "currentStage" : "MODULEWIREBONDPROTECTION",
12    "latestSyncedStage" : "MODULEWIREBONDING",
13    "status" : "created",
14    "rework_stage" : [],
15    "QC_results" : {
16        "MODULETOPCB" : {
17            "OPTICAL" : "5fc4c2cfb6c93d451e2c9ac1",
18            "GLUE_MODULE_FLEX_ATTACH" : "-1",
19            "MASS" : "5fc4c2da27766dc6e89c024f",
20            "METROLOGY" : "5fc4c2eaf1f19d9cb5859f00"
21        },
22        "MODULEWIREBONDING" : {
23            "WIREBONDING" : "-1",
24            "OPTICAL" : "5fc4c4c8b7d0c86912b4958f",
25            "SENSOR_IV" : "5fc4c59e9e283a57ccaa1088",
26            "PIXEL_FAILURE_TEST" : "5fc342f6e9f1f5eafedfb92",
27            "SLDO_VI" : "-1",
28            "WIREBOND" : "-1",
29            "CHIP_CONFIGURATION" : "-1"
30        },
31        "MODULEWIREBONDPROTECTION" : {
32            "OPTICAL" : "-1",
33            "POTTING" : "-1",
34            "MASS" : "-1",
35            "READOUT_IN_BASIC_ELECTRICAL_TEST" : "-1",
36            "SENSOR_IV" : "-1",
37            "REGISTER_TEST" : "-1"
38        },
39        ...
40    }
41 }
```

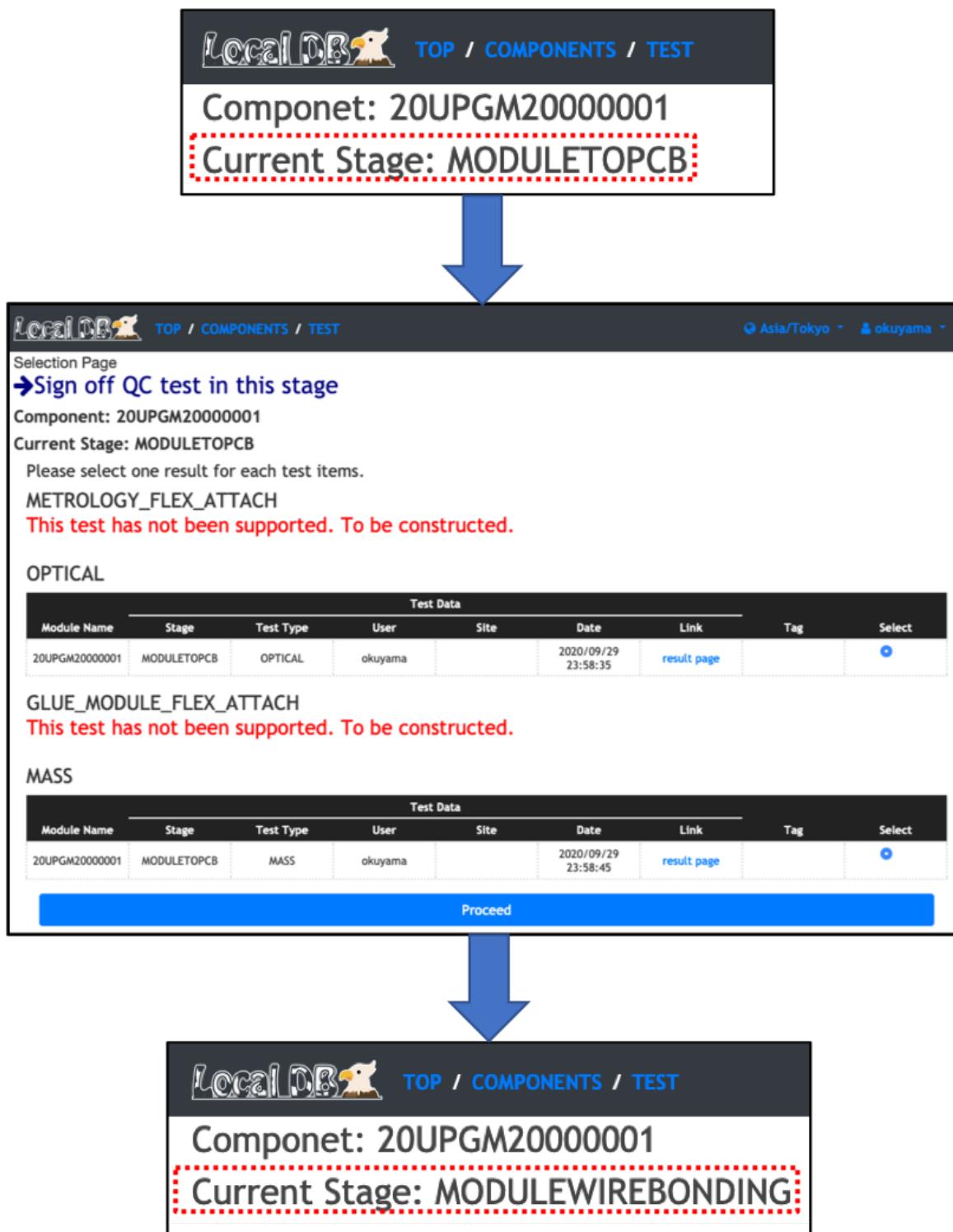


図4.13 結果選択画面及び組み立て工程表示の例。図の上部で組み立て工程が“MODULETOPCB”である。図の中部において品質試験結果選択処理を行なっており、この図では“OPTICAL”と“MASS”的結果を選択している。この時、ローカルデータベース内部では選択された結果にタグ付けがなされる。これらの結果は中央データベースと同期される。また結果選択後は組み立て工程が自動的に更新される。図の下部では”MODULEWIREBONDING”になっていることが分かる。

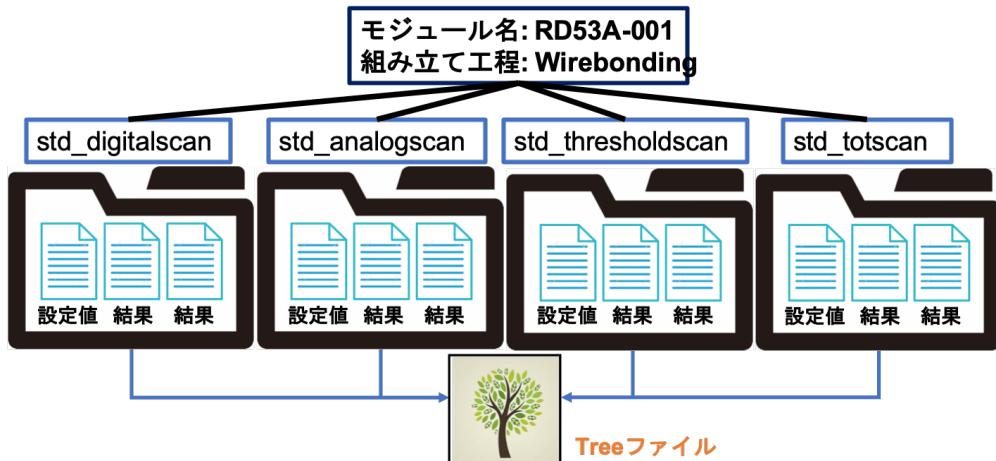


図 4.14 ピクセル解析ツールにおけるファイル統合処理のイメージ。YARR の出力ファイル及びディレクトリは `std_digitalscan`(デジタル回路読み出し) や `std_thresholdscan`(Threshold 測定) というように読み出し項目ごとである。ピクセル解析ツールでは、図のようにあるモジュールに関する結果ファイルを統合し、ピクセルごとに行う解析処理を簡易化する狙いがある。

4.3.5 開発項目 3-(iii): 読み出し試験結果におけるピクセル解析ツール

節 3.2.6 で述べたように、読み出し試験では各ピクセルが正常に機能しているのかを調べるためにピクセル解析を行う。これを円滑に行うために、ピクセル解析ツールを開発した。また開発した解析ツールをローカルデータベースシステムに組み込んだ。このツールについての詳細を以下に示す。

概要

YARR で読み出し試験を行った場合、結果ファイル及びディレクトリは試験項目ごとにわかれ生成される。また各結果ファイルにはモジュール上の全ピクセル結果が JSON の形で保存されている。

一方、ピクセル解析ではあるピクセルに着目し、複数の試験結果を同時に参照する必要がある。この解析を行う場合に、ピクセルは 192×400 個あるため、ピクセルごとに複数の試験結果ファイルの読み込み、値取得の処理を行うのは計算コストがかかり、非効率である。例えば参照したい試験結果ファイルが 5 個あるとすると $(192 \times 400) \times 5$ 回のファイル読み込み、値取得の処理を行うことになる。

そこで、開発した解析ツールでは複数の結果ファイルを 1 つに統合し、ピクセルごとの解析処理を単純化する役割を担っている。開発には Python と C++ を用いた。また CERN が提供している解析フレームワークである ROOT[31] を使用し、いくつかの試験結果統一ファイルの作成に、ROOT 内部機能である Tree を使用した。このファイル統合処理のイメージを図 4.14 に示す。また実際に作った Tree ファイルと、データ構造のイメージを図 4.15 に示す。

不良ピクセルの選別に ROOT 内部の RDataFlame のパッケージを使用した。この機能では解析の条件式と対象とする Tree ファイルを入力することで、選別結果を取得することができる。

ツールの内部構造と処理の流れ

開発したツールは、主に以下で説明する 3 つの実行ファイルで構成される。それぞれの役割について説明する。

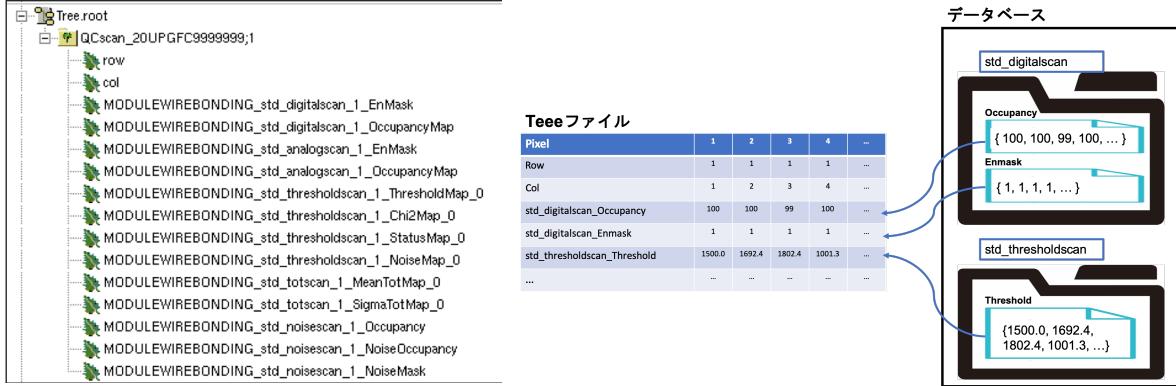


図 4.15 Tree ファイルとそのデータ保持のイメージ。実際にこのツールを用いて作った Tree ファイルの内部構造の様子(左)とそのデータ保持のイメージ(右図)を示す。Tree ファイルでは、右図のように 1 つの表に試験結果をまとめている。各行が std_digitalscan といった各読み出し試験項目における 1 つの測定値に対応し、各列が 1 ピクセルに対応する。モジュール上の行列 (Row, Col) の番号を表の上部に持つておくことで、モジュール上におけるピクセルの位置情報を保持する。ピクセル解析ではあるピクセルに着目し複数の試験結果を同時に参照する必要がある。右図のように複数結果を 1 つのテーブル上に保持し、各列を参照することでピクセルごとに解析を行う。

getData.py (Python)

データベースから対象となるデータファイルを取得、キャッシュファイルとしてサーバー上の一時ディレクトリに保存。

makeTree (C++)

getData.py を用いて生成されたキャッシュファイルを読み込み、Tree ファイルを作成。

analysis (C++)

作成した Tree ファイルを読み込みピクセル解析を実行、結果値やプロットを出力。

処理の流れのイメージを図 4.16 に示す。データベースとの通信に関しては MongoDB や現システムとの親和性を考慮し、Python を使用した。Tree ファイル作成やその後の解析処理のスクリプトは、ROOT を使用する観点から C++ を使用した。またピクセル解析以外の解析処理の作成を見越して、Tree 作成部と解析処理部のファイルは分割した。

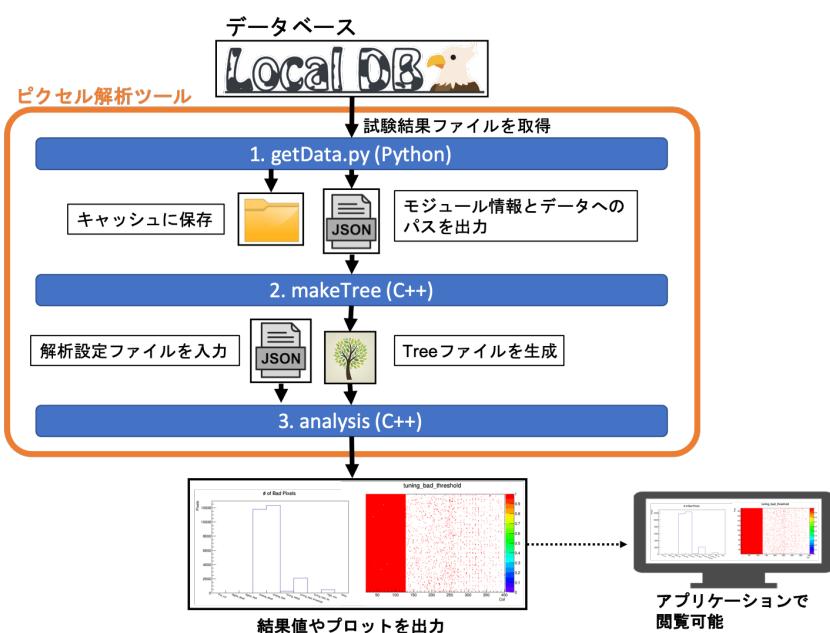


図 4.16 ピクセル解析ツールの処理の流れ。ピクセル解析ツールは、図のように 3 つの実行ファイルにより構成される。getData.py(Python) にてデータベースから結果の取得を行い、makeTree(C++) にて Tree ファイルの作成、analysis(C++) にてピクセル解析及び結果のプロットが output される。



LocalDB TOP / COMPONENTS / TEST

ITk database for Yarr
Scan List

QU-13 Partial match Perfect match Search

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 >

Test Data

Module Name	Chip Name	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	thresholdscan	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 19:23:18	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	thresholdscan	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 19:17:33	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	thresholdscan	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 19:12:03	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	digitalscan	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 19:05:12	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	selftrigger	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 18:33:26	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	digitalscan	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 17:57:48	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	selftrigger	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 17:55:46	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	digitalscan	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 17:19:38	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	selftrigger	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 16:09:06	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	digitalscan	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 15:33:23	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	selftrigger	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 15:32:52	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	digitalscan	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 14:57:39	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	selftrigger	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 14:57:32	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	thresholdscan	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 14:45:32	result page	
QU-13	QU-13_chipd1 QU-13_chipd2 QU-13_chipd3 QU-13_chipd4	totscan	yuta_miyazaki	kyushu_universit y	2019/06/11 14:44:16	result page	

図 4.17 ウェブアプリケーションにおける検索機能の様子。図は検索結果一覧表示のページである。図の上部に入力欄があり（赤破線）、ここにキーワードを入力し検索を実行する。図の例では“QU-13”と入力し検索しており、モジュール名「QU-13」の試験結果が一覧表示されていることが分かる。

4.3.6 開発項目 3-(iv): 読み出し試験結果の検索機能

登録モジュールや品質試験結果の一覧ページに検索機能を実装した。確認したいモジュール情報や試験結果を迅速に取得し、閲覧することを目的としている。検索機能を使用している様子を図 4.17 に示す。

キーワードを入力し、検索することができる仕組みとなっていて、一般的なウェブページの検索エンジンのように扱うことができる。生産に向けて、検索にかかる処理時間測定を行った。検索機能実装方法の詳細と処理時間についての詳細は 6 章で述べる。現在は单一キーワード検索の他に、以下の機能を実装している。

- 完全一致、部分一致検索。
- AND、OR 検索。

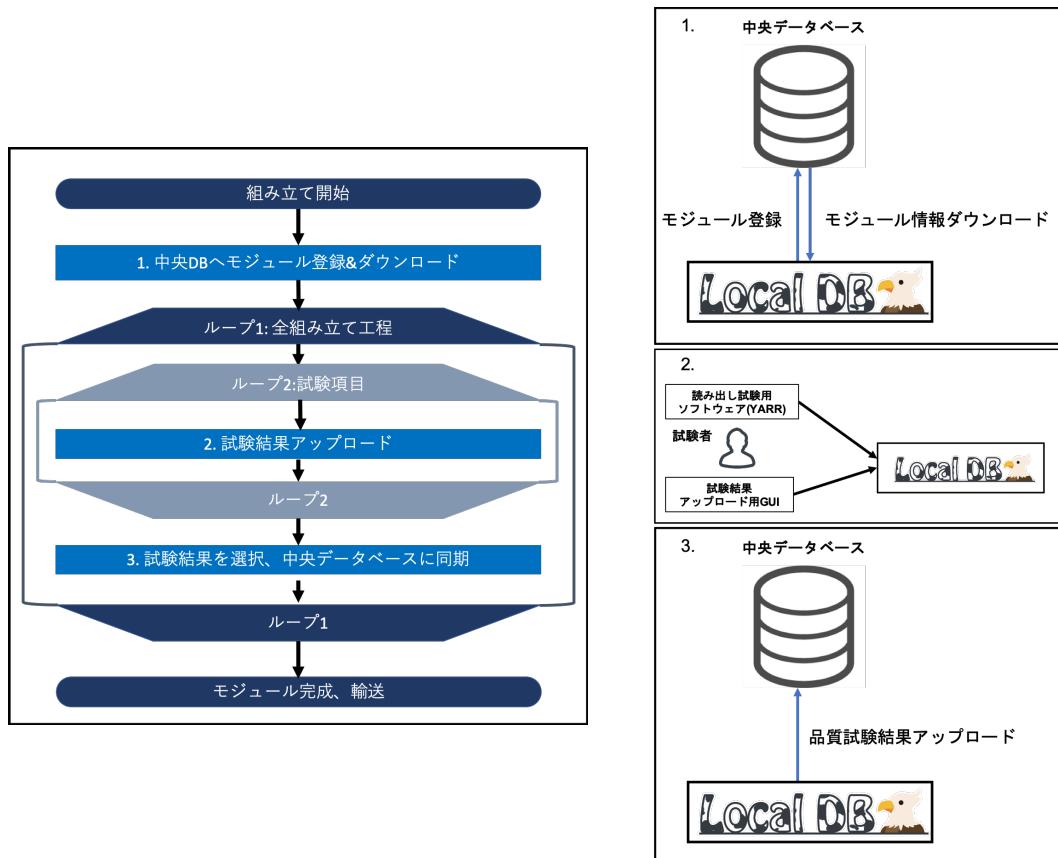


図 4.18 各モジュールにおけるデータベース操作の流れ。初めに中央データベースにモジュール登録及びローカルデータベースへモジュール情報のダウンロードを行う(処理 1)。その後、ダウンロードしたモジュールに対して組み立て工程に応じた試験結果を取得、ローカルデータベースへアップロードする(処理 2)。各組み立て工程の終わりに試験結果の選択を行い、中央データベースに試験結果を同期する(処理 3)。

4.3.7 開発項目 4: 量産時におけるデータベース操作の流れの確立

量産時におけるデータベース操作の流れを確立した。以下に従い、モジュール組み立て時におけるデータ管理がなされる。

1. 中央データベースへモジュール登録及び登録情報のダウンロード.
2. 1で登録したモジュールに対して紐つける形で、品質試験結果をローカルデータベースへアップロード.
3. 組み立て工程毎に品質試験結果の選択を行い、中央データベースへアップロード.

流れのイメージを図 4.18 に示す。品質試験結果の中央データベースへのアップロードは各組み立て工程毎に行う。ローカルデータベース内で品質試験結果を組み立て工程毎にまとめて扱い、各モジュールの現組み立て工程を正確に管理する目的がある。

全組み立て工程が終了すると、モジュールの情報及び品質試験結果が全て中央データベースへ同期されている状態となる。

このデータベース操作の流れの確立に向けて、2020年2月にCERNに行なったシステムチュートリアルでこの一連の流れを扱った。チュートリアルは私が主体となって主催し、使用デバイス、ソフトウェ

アの製作、セットアップ、ドキュメント製作、チュートリアル本番時のチーチャー等を担当した。このチュートリアルを通してユーザに対する操作方法の周知と機能確認を行うことができた。チュートリアルの概要を付録 C に記す。またシステムのドキュメント [32] を作成し、その中に具体的なデータベース操作の流れを記述している。このように量産時に各機関が適切な流れでデータ管理ができるようなサポートを行っている。

データベース操作の流れの試験として、実際に品質試験のデモンストレーションを行い、各機能が正常に動作するのかの確認を行なった。詳細を 5 章で述べる。

第5章

品質試験のデモンストレーション

品質試験のデモンストレーションを行った。今回のデモンストレーションでは、品質試験項目として部分的に読み出し試験を行い、データベース機能や試験の流れを確認した。この章の前半ではデモンストレーションで使用したソフトウェア、ハードウェアについて説明し、後にデモンストレーションの内容、機能確認について述べる。

5.1 使用したソフトウェア

使用したソフトウェアを以下に示す。また、これらソフトウェアの概要を図 5.1 に示す。

- YARR (commit:6b3ffe92).
- MongoDB (version: v4.2.6).
- ローカルデータベース用ウェブアプリケーション (tag: ldbtoolv1.4).
- 中央データベースとの同期ツール (tag: ldbtoolv1.4).
- ピクセル解析ツール (tag: v1.0.2).
- 時系列データ用データベース (InfluxDB[33](version: 1.8.0)).
 - 時系列情報に特化したデータベース。このシステムにおいては温度、電圧など DCS 情報を時間情報と共に保存、管理するために用いる。
- InfluxDB 解析ソフト (Grafana[34](version: 5.1.0)).
 - InfluxDB に保存された情報の解析、閲覧に用いる。ウェブブラウザー上で DCS 情報を閲覧することができる。
- 電源操作用ソフト.
 - モジュールに電圧を供給するために、電源を遠隔で操作する。また電圧、電流値を取得し、InfluxDB にアップロードする。CERN で開発されている PySerial[35](commit:0d14fcdb) を改良し作成した。
- 温度読み出し用ソフト.
 - GPIO 通信により取得できる ADC 値を取得、温度に変換し InfluxDB へアップロードする処理を実行する。RaspberryPi 上で処理を行う。

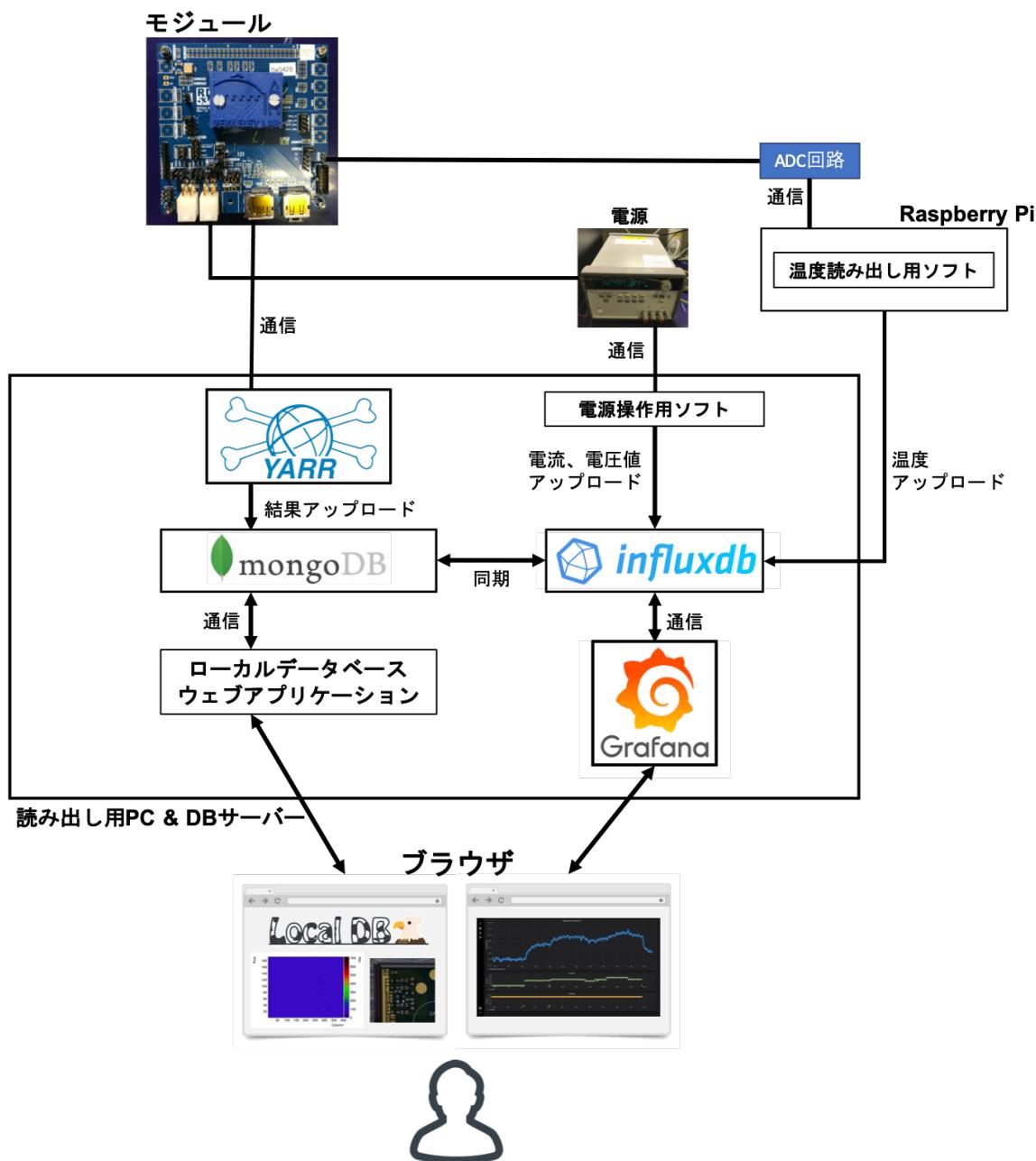


図 5.1 読み出し試験に用いるソフトウェアの概要。FE チップの読み出しとそのデータ通信は YARR を用いて行われる。試験結果は MongoDB にアップロードされ、試験者はウェブアプリケーションを通じて結果を確認することができる。電源操作用ソフトを用いて電源のスイッチ、電圧、電流値の取得がなされ、取得値は InfluxDB に保存される。モジュール付属のサーミスタ読み出しシステムを用いて FE チップ付近の温度を読み出し、InfluxDB に保存する。InfluxDB に保存された DCS データは Grafana を用いてブラウザ上で確認することができる。また読み出し試験に関わる DCS 情報は MongoDB に同期されるため、ローカルデータベースアプリケーションを通して確認ができる。

5.2 使用したハードウェア

使用したハードウェアについて、以下に詳細を記す。

5.2.1 各装置

RD53A シングルモジュール (RD53A Single Chip Card, SCC)[36]

今回読み出しに使うモジュールとして、研究室で所有している RD53A シングルモジュール (**RD53A Single Chip Card, SCC**) を使用した。SCC は試験用に作られた FE チップを一枚搭載するモジュールである。また今回使用したものはシリコンセンサーを持たない。SCC は FE チップ電源端子、データ転送端子をもち、読み出しを行う際はそれぞれ配線をする。FE チップ付近には NTC サーミスタを搭載していて、ボード上の端子からその抵抗値を取得することで温度を測定することができる。図 5.2 に写真を示す。

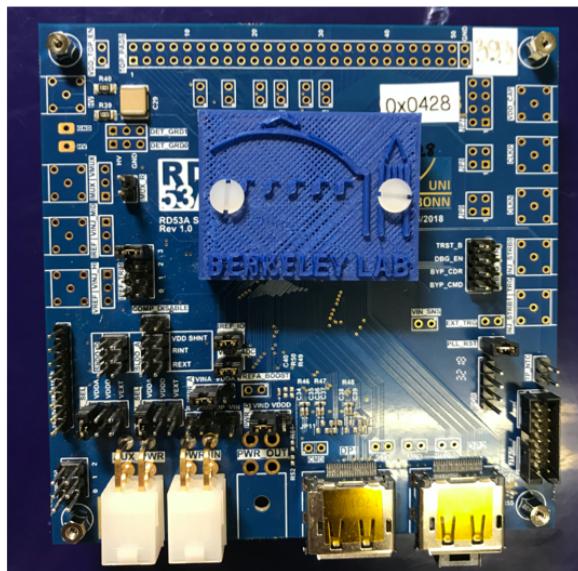


表 5.1 溫度読み出しシステムに使用した装置一覧。

装置	機種
ADC	MCP3002[38]
RaspberryPi	Raspberry Pi 3 Model B Plus Rev 1.3[39]

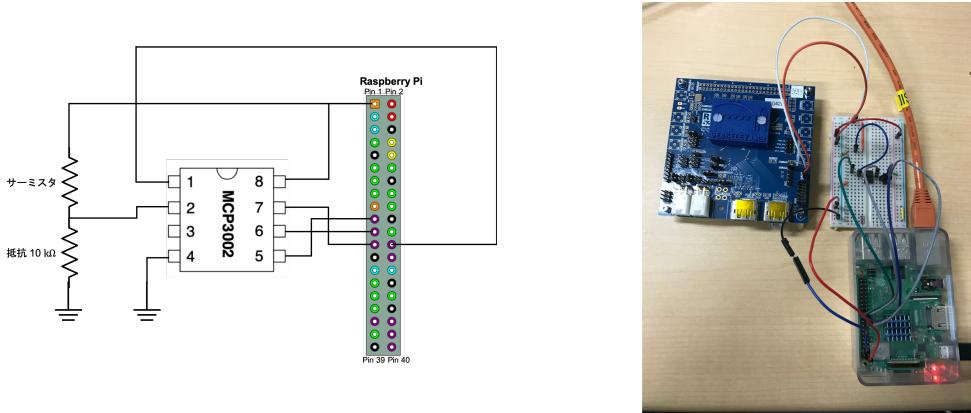


図 5.3 モジュール付属サーミスタを用いた温度読み出し回路。図は回路図（左図）と実際に配線して読み出しを行っている様子（右図）を示している。10 kΩ 抵抗、MCP3002、Raspberry Pi を用いて読み出し回路を作成した。抵抗と MCP3002 は右図のようにブレッドボード上に設置した。ADC と RaspberryPi は GPIO 通信 [37] を行うことで、ADC 値を取得している。



図 5.4 用いた電源。FE チップ電圧供給のための電源として KEYSIGHT の E3646A 60W デュアル出力電源 [40] を用いた。

FPGA ボード

FPGA ボードに XpressK7[41] を用いた。YARR ファームウェアを FPGA 上にプログラムし通信を行なった。XpressK7 を図 5.5 に示す。

FMC-DisplayPort 変換カード

FPGA ボードには FMC 端子がついていて、モジュールと通信を行うためには FMC-DisplayPort 変換カードが必要となる。使用した変換カード（通称:Ohio カード）を図 5.6 に示す。

PC

YARR ソフトウェアをインストールし、読み出しを行なった PC の性能を表 5.2 に示す。



図 5.5 使用した FPGA ボード (XpressK7[41])。中央に FMC 端子、右側に FPGA チップ、下側に PCI Express が配置されている。FPGA チップの上にはファンをついているため、この図では確認できない。



図 5.6 使用した FMC-DisplayPort 変換カード。図の右側に FMC 端子、左側に miniDisplayPort が 4 つ配置されており、FMC 端子を 4 つの mini-DisplayPort に変換する。今回読み出す FE チップは 1 枚であるため、1 つの端子だけを用いる。

表 5.2 読み出しに使用した PC の性能。研究室で所有する PC を使用した。OS は centOS7 である。

CPU	Type	Core	Thread	Clock speed[GHz]	Memory [GB]	Disk [GB]
Intel(R) Core(TM) i7-8700K CPU		6	12	3.7	16.18	214

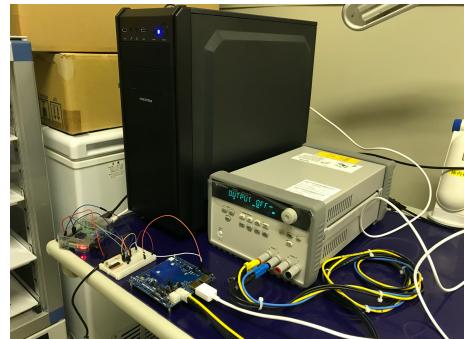
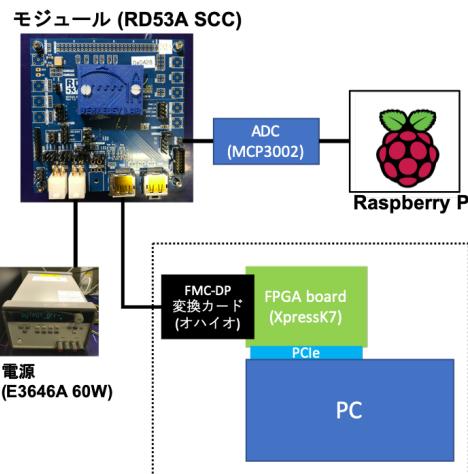


図 5.7 ハードウェアセットアップ。図はセットアップの概要 (左図) と実際に設置した様子 (右図) を示している。FE チップ読み出し装置、電源、サーミスタ読み出し装置をそれぞれ設置、配線し、読み出し操作、データ取得を行った。

5.2.2 セットアップ

読み出し試験に用いるハードウェアのセットアップを概要を図 5.7 に示す。

5.3 デモンストレーションの流れ

デモンストレーションで用いるため、中央データベースにおける登録 ID の定義方法 [42] に従い以下のモジュール、FE チップを登録した。登録したモジュール、FE チップの ID を以下に示す。

モジュール ID 20UPGR00000001.

FE チップ ID 20UPGFC9999999.

今回のデモンストレーションではこれらを用いてデータベース操作の確認を行う。

確認した機能を行った流れの順に以下に示す。

1. 中央データベースからモジュール情報のダウンロード.
2. 読み出し試験実施、結果をローカルデータベースにアップロード.
3. DCS 情報の取得、監視.
4. 試験結果検索.
5. 試験結果閲覧.
6. 結果選択とピクセル解析.
7. 中央データベースへ試験結果のアップロード

Latest Result								
Module Name	Chip Name	Current Stage	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag
20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIREBONDING	PIXEL_FAILURE_TEST	hokuyama		2020/12/05 07:05:51	result page	Tag List

図 5.8 ダウンロードしたモジュール情報確認画面。図の表において、今回登録した 20UPGR00000001 の ID を持つモジュールがローカルデータベースのアプリケーション上で確認できていることが分かる。また対応する FE チップの ID も確認することができる。

5.4 機能確認

読み出し試験を通して、各ソフトウェア機能が正しく動くことを確認した。詳細を以下に記す。

5.4.1 中央データベースからモジュール情報のダウンロード

中央データベースから登録したモジュール情報をダウンロードし、ウェブアプリケーションで確認した。確認した画面を図 5.8 に示す。今回行った試験結果はこのモジュールに紐つける形でローカルデータベースに保存した。

5.4.2 読み出し試験実施

以下の流れに沿って読み出しを行ない、結果をローカルデータベースに保存した。

1. デジタル回路読み出し (`std_digitalscan`).
2. アナログ回路読み出し (`std_analogscan`).
3. 調整前 Threshold 測定.
4. Threshold 調整.
5. ToT 調整.
6. Threshold 再調整.
7. 調整後 Threshold 測定 (`std_thresholdscan`).
8. ToT 測定 (`std_totscan`).
9. ノイズ測定 (`std_noisescan`).

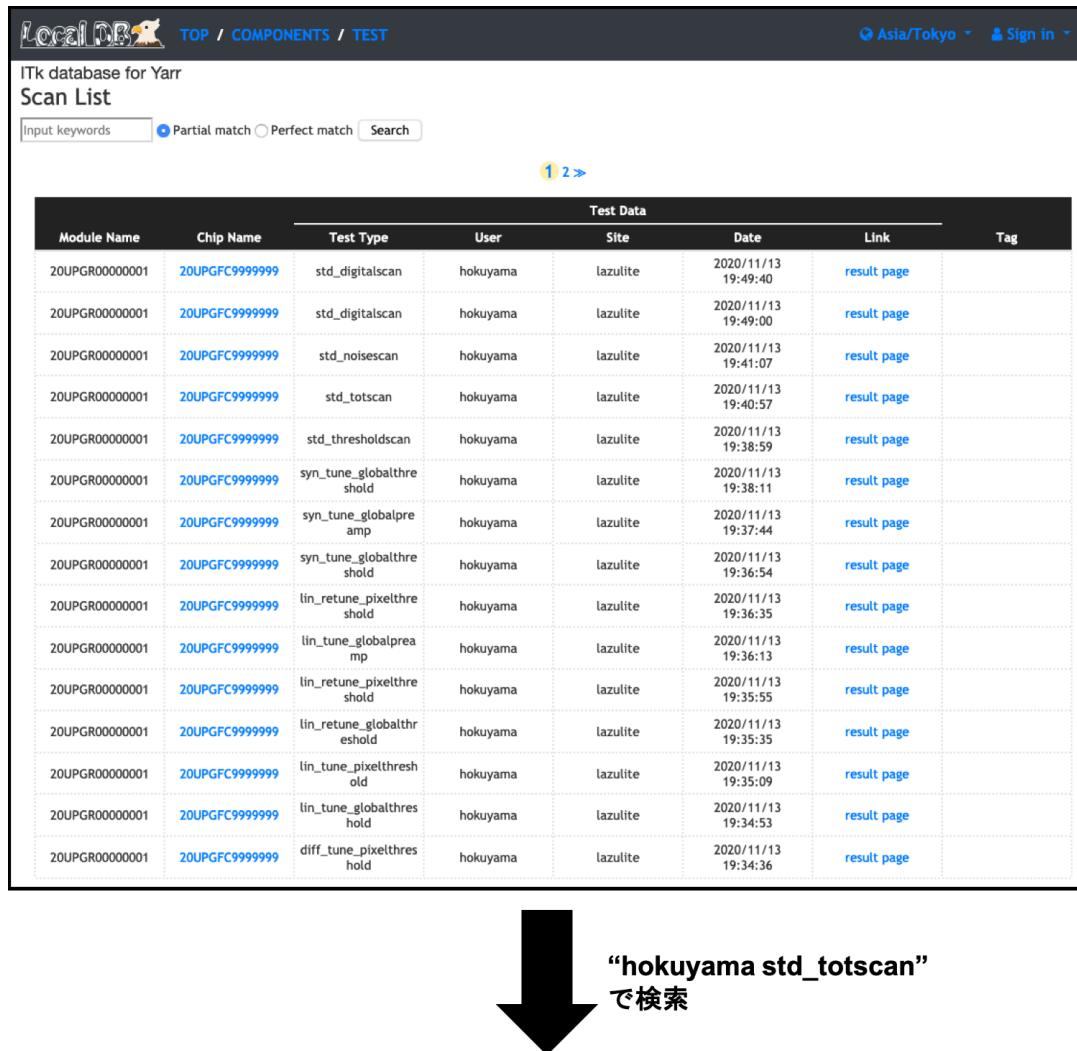
また読み出し試験を通して DCS 情報は InfluxDB を用いて監視し、試験結果と同様にローカルデータベースに保存した。



図 5.9 DCS 情報のモニタリングの様子。図において横軸は時間であり、縦軸は上から温度(青)、電流(緑)、電圧(黄)を示す。それぞれデータの監視が行えていることが分かる。温度に関して、電源オン、オフの付近で変化が大きいことが分かる。電流に関して、読み出し(チューニング)を行っている途中も変化が見られる。

5.4.3 DCS 情報の監視

読み出し試験は、DCS 情報を監視しながら行った。それぞれのデータは対応するソフトウェアを用いて InfluxDB にアップロードし、Grafana を使って監視をした。その様子を図 5.9 に示す。



The screenshot shows the LocalDB Scan List page. At the top, there are navigation links: TOP / COMPONENTS / TEST, a location indicator (Asia/Tokyo), and a sign-in button. Below this is a search bar with the placeholder "Input keywords" and options for "Partial match" or "Perfect match". The main area is titled "Scan List" and contains a table of "Test Data". The table has columns: Module Name, Chip Name, Test Type, User, Site, Date, Link, and Tag. There are 15 rows of data, each representing a different test entry. The "Link" column for most entries contains the text "result page".

↓

"hokuyama std_totscan"
で検索

The second screenshot shows the same LocalDB Scan List page after a search. The search bar now contains the query "hokuyama std_totscan". The results show only one matching row from the previous list, indicating a successful search.

Test Data							
Module Name	Chip Name	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag
20UPGR00000001	20UPGFC999999	std_digitalscan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:49:40	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	std_digitalscan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:49:00	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	std_noisescan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:41:07	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	std_totscan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:40:57	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	std_thresholdscan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:38:59	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	syn_tune_globalthreshold	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:38:11	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	syn_tune_globalpreamp	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:37:44	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	syn_tune_globalthreshold	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:36:54	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	lin_retune_pixelthreshold	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:36:35	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	lin_tune_globalpreamp	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:36:13	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	lin_retune_pixelthreshold	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:35:55	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	lin_retune_globalthreshold	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:35:35	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	lin_tune_pixelthreshold	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:35:09	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	lin_tune_globalthreshold	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:34:53	result page	
20UPGR00000001	20UPGFC999999	diff_tune_pixelthreshold	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:34:36	result page	

図 5.10 検索機能確認の様子。図は検索実行前の試験結果一覧（上図）と実行後（下図）を示す。図の例で“hokuyama std_totscan”の2つのキーワードで検索を行っており、実行後は対応する試験結果1つが表示されていることが分かる。この試験結果について試験実施者は“hokuyama”、試験項目は“std_totscan”であるため、検索機能が正常に動いていることが分かる。

5.4.4 検索機能

検索機能の確認を行い、正常に使用できることを確認した。検索機能実行の様子を図 5.10 に示す。

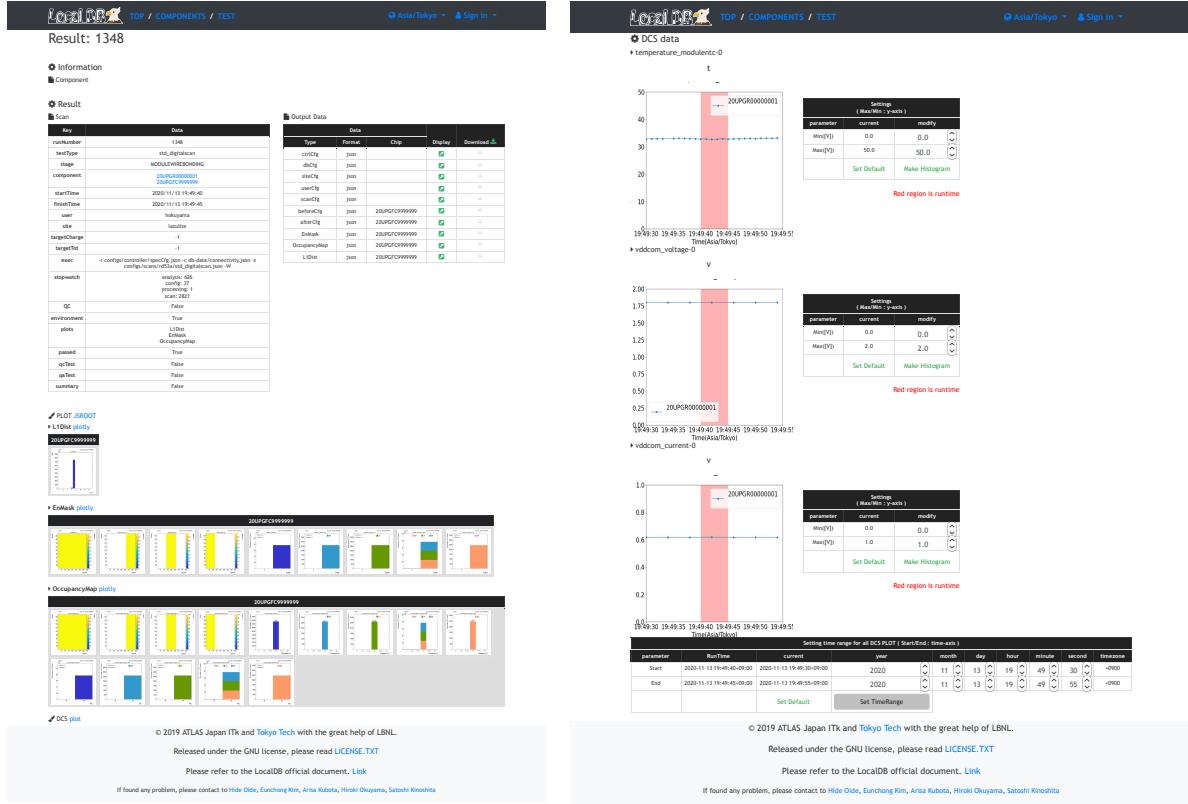


図 5.11 試験結果の閲覧。図は試験結果(左図)と試験におけるDCS情報のグラフ(右図)を示しており、上から温度、電圧、電流となっている。図は std_digitalscan の結果であり、試験情報及び結果のグラフが確認できる。また右図よりDCS情報も正常にローカルデータベース上に保存され、表示されていることが分かる。

5.4.5 試験結果閲覧

ウェブアプリケーションを用いて、試験結果を閲覧した。その様子を図 5.11 に示す。

5.4.6 結果選択とピクセル解析

読み出し試験結果を選択し、ピクセル解析を行なった。結果選択画面を図 5.12 に示す。このデモンストレーションにおける不良評価基準は 3 章で述べた表 3.5 の中から、現時点ではシステムに実装している以下の項目を抜粋した。

1. Digital Dead.
2. Digital Bad.
3. Analog Dead.
4. Analog Bad.
5. Tuning Failed.
6. Tuning Bad for Threshold.
7. Tuning Bad for ToT.
8. High ENC.
9. Noisy.

解析結果を図 5.13、それぞれの評価基準における不良ピクセルの分布を図 5.14 に示す。Synchronous フロントエンドに不良ピクセルが多く分布していることが分かった。

5.4.7 中央データベースへ試験結果のアップロード

読み出し試験の結果を中央データベースにアップロードし、情報が正しくアップロードされていることを確認した。図 5.15 に中央データベースのウェブページを示す。結果ファイルや解析結果が正しくアップロードされていることが分かる。

5.5 本章のまとめ

本章では品質試験のデモンストレーションとして、読み出し試験の 5 項目を行なった。機能の確認を目的とし、本研究で確立した品質試験におけるデータベース操作の流れに沿って確認を行なった。

本デモンストレーションにおいて達成した項目を以下に示す。

1. モジュールを実際に中央データベースに登録し、その情報をローカルデータベース上へダウンロードできることを確認した。
2. 読み出しシステムをセットアップし、試験結果のアップロード及びモジュール情報への紐付けができるることを確認した。
3. DCS 情報取得システムを製作し、読み出し試験を通して監視した。
4. 試験結果検索、閲覧機能を確認した。検索機能については 2 キーワードでの動作が正常に動くことを確認した。
5. ピクセル解析ツールが正常に動くことを確認した。本デモンストレーションにおいては synchronous フロントエンド上に不良ピクセルが多く見られた。
6. 読み出し試験結果を中央データベースにアップロードし、中央データベースのウェブページ上で結果を確認できた。

LocalDB TOP / COMPONENTS / TEST

Selection Page
→Select scan results for QC result in this stage.

Component: 20UPGR00000001
Current Stage: MODULEWIREBONDING
Please select one result for each test items.

►std_digitalscan

Test Data										
run Number	Module Name	Chip Name	Stage	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag	Select
1392	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_digitalscan	hokuyama	tokyo_institut e_of_technology	2020/12/08 22:35:47	result page		<input type="radio"/>
1391	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_digitalscan	hokuyama	tokyo_institut e_of_technology	2020/12/08 22:29:39	result page		<input type="radio"/>
1351	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_digitalscan	hokuyama	tokyo_institut e_of_technology	2020/12/03 14:54:43	result page		<input type="radio"/>
1350	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_digitalscan	hokuyama	tokyo_institut e_of_technology	2020/11/30 19:57:19	result page		<input type="radio"/>
1348	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_digitalscan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:49:40	result page		<input type="radio"/>
1347	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_digitalscan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:49:00	result page		<input type="radio"/>
1328	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_digitalscan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:31:02	result page		<input checked="" type="radio"/>
1327	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_digitalscan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:29:24	result page		<input type="radio"/>
1326	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_digitalscan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:28:38	result page		<input type="radio"/>

►std_analogscan

Test Data										
run Number	Module Name	Chip Name	Stage	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag	Select
1329	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_analogscan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:31:13	result page		<input checked="" type="radio"/>

►std_thresholdscan

Test Data										
run Number	Module Name	Chip Name	Stage	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag	Select
1344	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_thresholdscan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:38:59	result page		<input checked="" type="radio"/>
1330	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_thresholdscan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:31:24	result page		<input type="radio"/>

►std_totscan

Test Data										
run Number	Module Name	Chip Name	Stage	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag	Select
1345	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_totscan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:40:57	result page		<input checked="" type="radio"/>

►std_noisescan

Test Data										
run Number	Module Name	Chip Name	Stage	Test Type	User	Site	Date	Link	Tag	Select
1346	20UPGR00000001	20UPGFC999999	MODULEWIRE BONDING	std_noisescan	hokuyama	lazulite	2020/11/13 19:41:07	result page		<input checked="" type="radio"/>

[Proceed](#)

[Back to the component page](#)

© 2019 ATLAS Japan ITk and Tokyo Tech with the great help of LBNL.
Released under the GNU license, please read [LICENSE.TXT](#)
Please refer to the LocalDB official document. [Link](#)
If found any problem, please contact to [Hide Olde](#), [Eunchong Kim](#), [Arisa Kubota](#), [Hiroki Okuyama](#), [Satoshi Kinoshita](#)

図 5.12 読み出し試験結果の選択ページ。読み出し試験実施後、ピクセル解析処理と中央データベースとの同期を実行するために試験結果を選択する必要がある。図では std_digitalscan、std_analogscan、std_thresholdscan、std_totscan、std_noisescan の 5 項目を選択している。

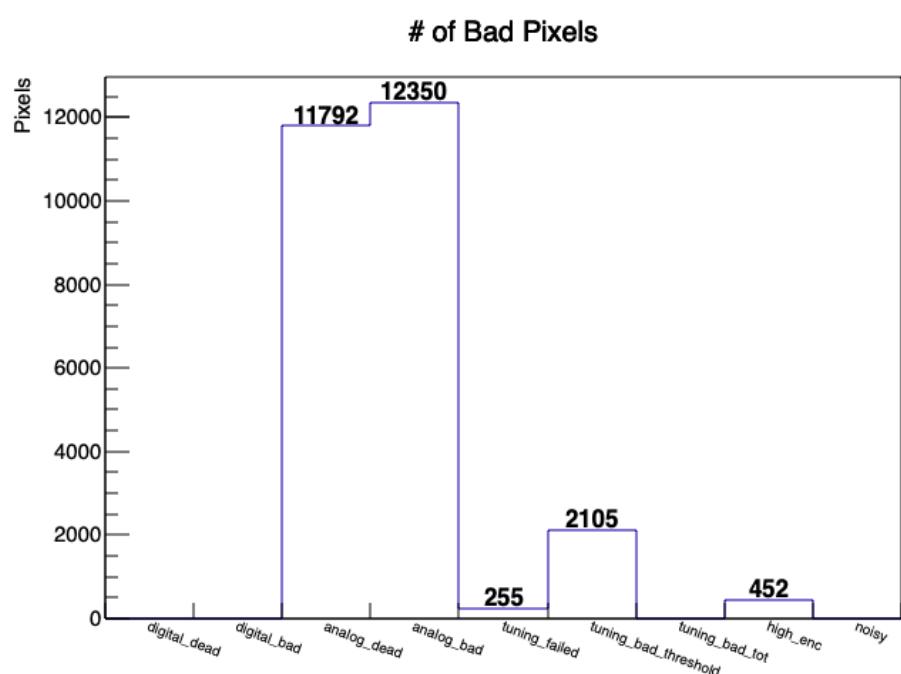


図 5.13 ピクセル解析結果。図において横軸は評価基準、縦軸は該当するピクセル数を表す。
analog_dead, analog_bad の割合が多いいため、アナログ回路読み出しに失敗しているピクセルが多いことが読み取れる。

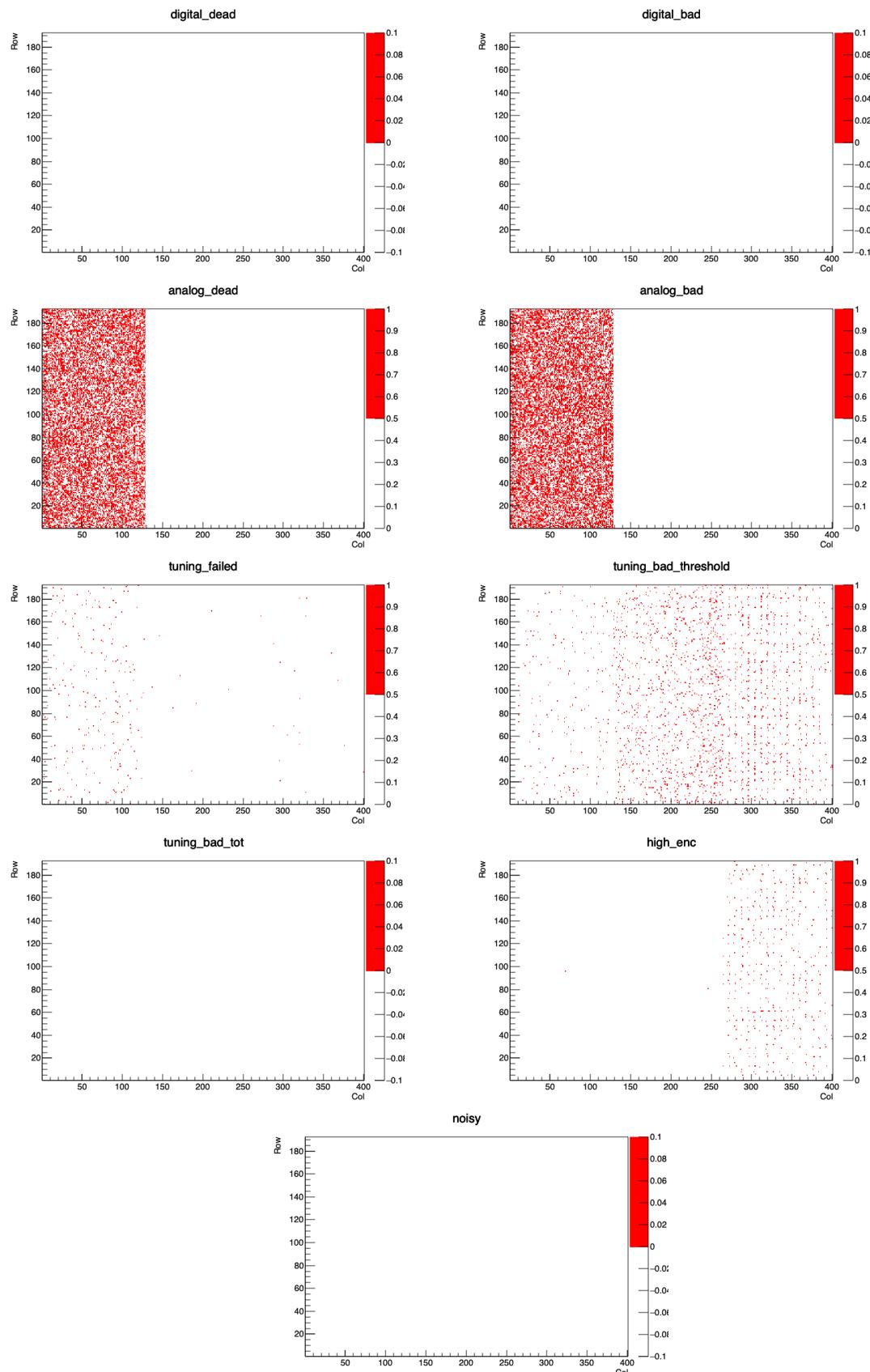


図 5.14 各評価基準における不良ピクセルの分布。各図は二次元ヒストグラムであり、横軸が FE チップにおける各ピクセルの列番号、縦軸が行番号を示しており、赤い領域が不良ピクセルを表している。図 5.13 においてアナログ回路読み出しに失敗しているピクセルが多いことがわかったが、その不良ピクセルは Synchronous フロントエンド上に存在していることが分かる。また Threshold 調整に失敗しているピクセル (tuning_bad_threshold) は全体的に分布していることが分かる。

The screenshot shows the 'Test Run Details' page for a 'ModuleQC::PixelFailureTest'. The page header includes the ATLAS ITk Production Database logo, a user profile for Hiroki Okuyama, and a '+2U' button. The main content area displays basic properties like INSTITUTE (Tokyo Institute of Technology TITECH), TEST DATE (13.11.2020 19:31), and TEST TYPE (ModuleQC::PixelFailureTest PIXEL_FAILURE_TEST). It also shows the QC stage as MODULEWIREBONDING. The 'Results' section lists various failure types with their counts: Noisy (0), High ENC (452), Tuning Bad ToT (0), Tuning Bad Threshold (2105), Tuning Failed (255), Analog Bad (12350), Analog Dead (11792), Digital Bad (0), and Digital Dead (0). The 'Attachments' section lists several zip files: std_digitalscan_datafiles.zip, std_digitalscan_configfiles.zip, std_analogscan_datafiles.zip, std_analogscan_configfiles.zip, std_thresholdscan_datafiles.zip, std_thresholdscan_configfiles.zip, std_totscan_datafiles.zip, std_totscan_configfiles.zip, std_noisescan_datafiles.zip, and std_noisescan_configfiles.zip. A 'Comments' section at the bottom has a '+' button for adding comments.

図 5.15 中央データベースにおける読み出し試験結果ページ。読み出し試験結果を中央データベースにアップロードした。図は中央データベースのウェブページにおける、アップロードされた試験結果ページである。図の中央部に各評価基準における不良ピクセルの数、下部に各試験項目ごとの結果ファイルをまとめた Zip ファイルが表示されていることが分かる。試験結果のアップロードが正常に完了し、中央データベース上で結果を確認できることが分かる。

第 6 章

ローカルデータベースにおける検索機能

モジュール組み立て工程において、読み出し試験は複数回行われ、一回の試験で行う項目も複数存在する。そのため、生産時には試験結果が数多くデータベースにアップロードされることになる。節 4.3.6 で述べたように、必要な試験結果を素早く取得することを目的として検索機能を実装した。詳細を以下に示す。

6.1 実装方法

一般的にウェブで用いられているフリーワードの検索エンジンのような機能を実装しようと考えた。ユーザの操作を最小限にし、直感的かつ柔軟な検索ができるようにするためにある。

読み出し試験において、対象とする検索キーワードを以下の項目に絞った。読み出し試験に関するデータベース構造及び保存する情報は決まっている。そのため、ユーザが対象とする検索キーワードは限定される。ここでは以下の項目にしぼり、これらを検索キーワードとしてサポートすれば十分であると考えた。

- モジュール及び FE チップの ID.
- 読み出し試験項目名 (例:std_digitalscan).
- 試験者.
- 試験場所.
- 試験日時.
- タグ機能を用いてつけられたタグ.

そこで実装方法として、以下の 2 つを考えた。

1. 各試験に関する情報をプログラム上で配列 (Python リスト) に保持し、検索キーワードが含まれるかを確認する方法.
2. 各試験に関する情報を持つドキュメント、コレクションを予め作成、それを参照し検索を行う方法.

これらについて以下で詳細を説明する。

6.1.1 方法 1: Python リストを用いた一致確認

Python リストを使う実装の場合、以下のような流れで検索処理を行う。

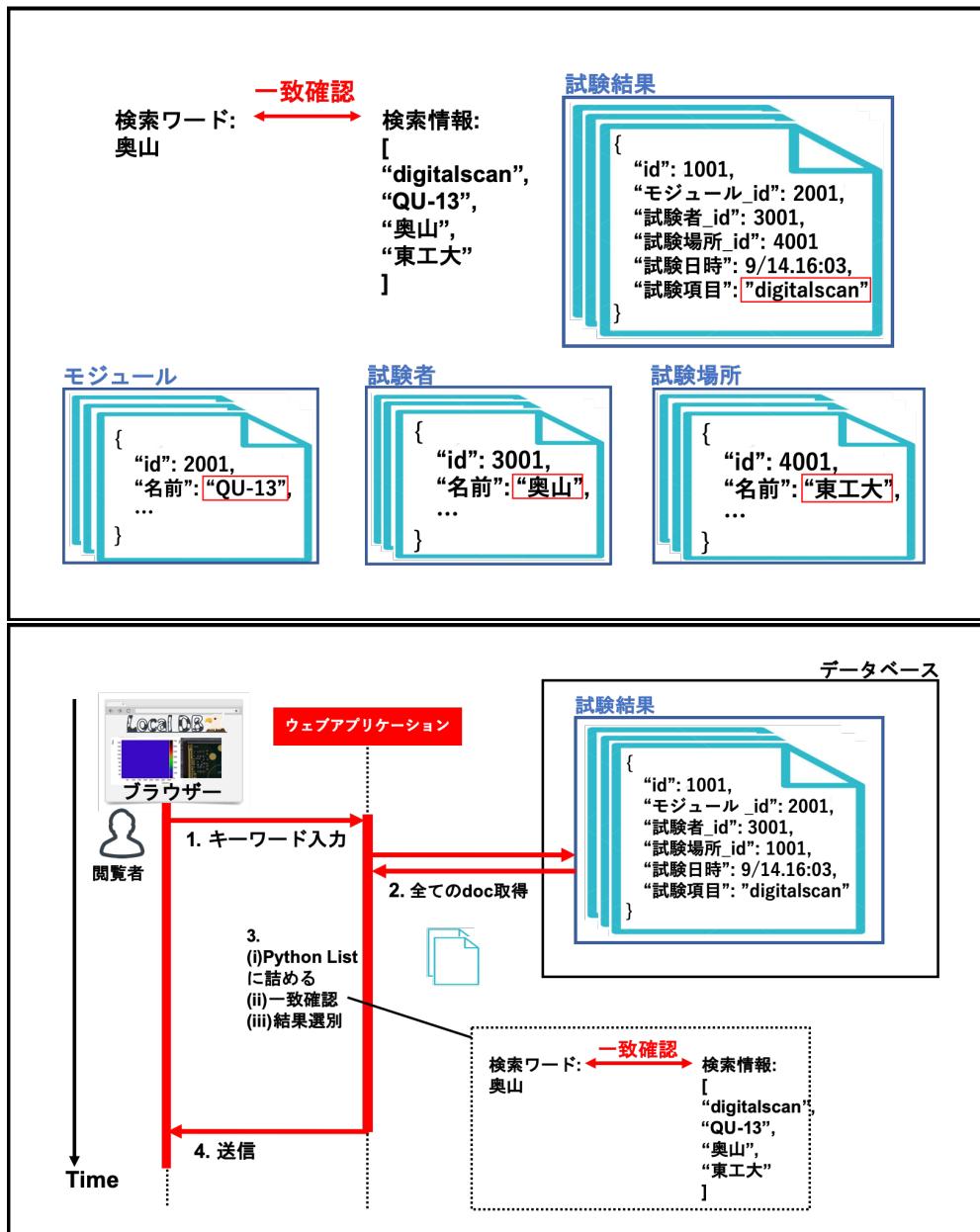


図 6.1 方法 1:Python リストを用いた場合の検索処理のイメージ図。上図は各コレクションと保存されている情報の例を示しており、下図は実際に検索を行った時の処理の流れを表している。上図中の赤枠で囲われた情報のように検索対象となる名前情報は複数のコレクションにまたがって保存されている。各試験結果に対してこれらの情報を集めリスト内に保持し、各要素とキーワードとの一致を確認することで検索処理を行う。

1. ユーザが検索キーワードを入力し、処理を実行。
2. アップロードされた全ての読み出し試験結果に関する情報を取得。
3. 各試験結果に関する情報を Python リストに保持、検索キーワードとの一致を確認、試験を選別。
4. ブラウザに送信。

アルゴリズムのイメージを図 6.1 に示す。この方法では、データベース内の試験結果とアプリケーション内の関数だけで全ての処理を行うことが可能なため、シンプルな実装方法であると言え、始めに思いつく方法であった。

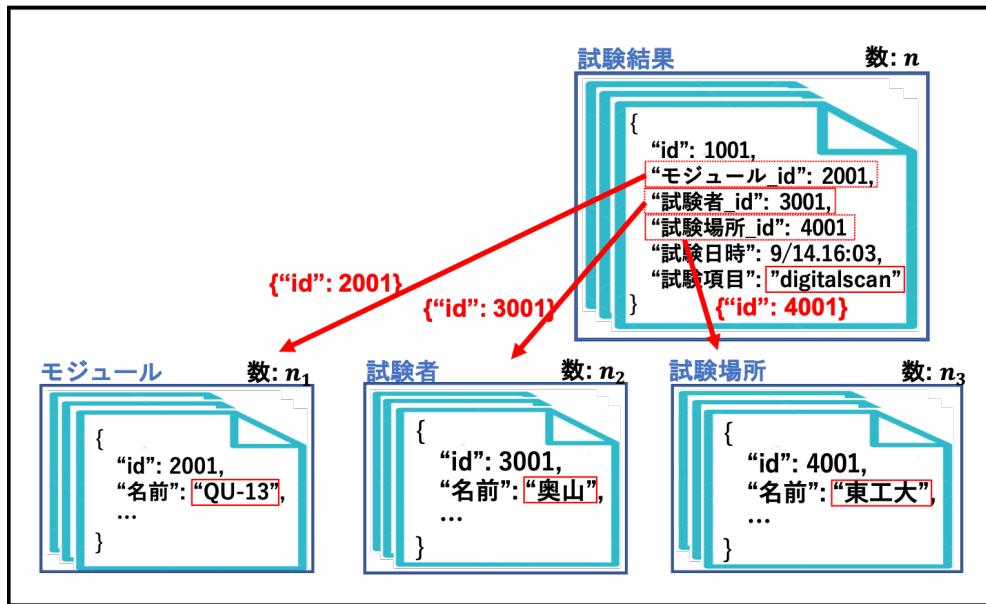


図 6.2 方法 1 における問題点のイメージ図。図 6.1 でも述べたように、検索対象となる情報は複数のコレクションにまたがって保存される。そのため、コレクションを超えて検索を行うような場合は試験結果の数以上に、処理に時間がかかるてしまう。この図の例の場合、あるコレクション検索にかかる時間がドキュメント数に対して線形とすると、 $O(n * (n_1 + n_2 + n_3))$ の処理時間がかかると考えられる。

しかしこの方法を試験実装したところ、ドキュメント数の増加に伴い検索処理時間を大きく要してしまう問題が発生した。図 6.2 のようにデータベース内の構造は複数のコレクションを跨いで情報を保持しているため、試験結果全てに対してリアルタイムでこの処理を行うと、検索時間が大きくかかるてしまう。このシステムのデータ構造においては、表 4.1 において各試験結果の情報を保存する testRun、component と testRun の関係を保存する componentTestRun の構造による遅延であると考えられる。試験結果数を n とすると、testRun が n 、componentTestRun がそれぞれ $O(n)$ のドキュメント数を持つことになる。これらのドキュメントを全て検索し、一致確認を行うと全体で $O(n^2)$ の時間がかかる。イメージを図 6.3 に示す。この実装方法について、ドキュメント数と処理時間の関係を測定したところ、図 6.4 のようになり、確かにドキュメント数に対して 2 次的に増加していた。測定の詳細については後述する。

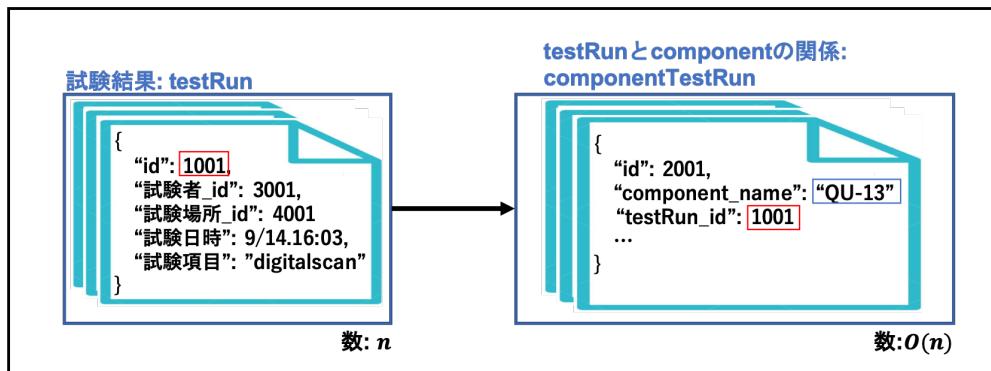


図 6.3 処理時間のボトルネックとなっているデータ構造の図。読み出し試験におけるデータ構造(図 4.4)の1つに、各試験結果情報を保存する testRun、component と testRun の関係性を保持する componentTestRun という構造が存在する。試験結果数を n とすると、testRun のドキュメント数は n 、componentTestRun の数は試験数と component の数の積となるため $O(n)$ となる。結果的に検索処理に $O(n^2)$ の時間がかかるてしまう。

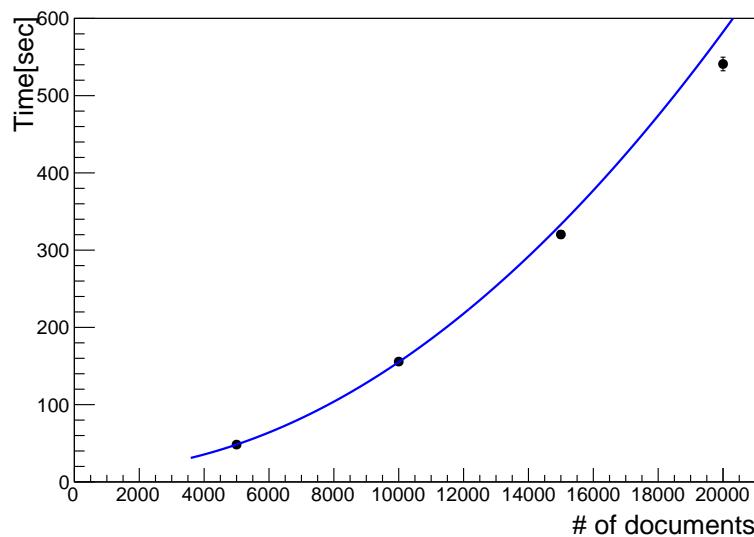


図 6.4 方法 1 における検索処理速度測定結果。横軸が試験結果のドキュメント数、縦軸が処理時間を表している。図 6.3 で述べたように、方法 1 の検索処理では試験結果数 n に対して $O(n^2)$ の検索時間がかかるため、試験結果のドキュメント数に対して処理時間は二次的に増加している。フィット関数や生産時における処理時間の見積もりに関しては後述する。

6.1.2 方法2: 検索情報を持つドキュメントを作成、使用

検索機能を改善するため方法2を考案し、実装を行った。ここで読み出し試験のデータ構造及び使用しているPythonフレームワークの変更はせずに処理時間を改善することを試みた。

改善策として、各試験に対応する検索キーワードを別のドキュメントに予め保持しておき、処理実行時にはそれを参照することで検索を行う方法を考案し、試験を行った。アルゴリズムのイメージを図6.5に示す。検索情報コレクションに入るドキュメント数は、試験結果数と同じである。そのため試験結果数に対する処理時間は $O(n)$ と考えられ、方法1に比べて検索コストを削減できると考えた。

なお、このコレクションはウェブアプリケーションの立ち上げ時に生成するシステムとした。コレクション生成処理の計算コストの見積もりとしてアプリケーション立ち上げにかかる時間を測定した。これに関しては後述する(図6.7)。

検索情報ドキュメントの例をコード6.1に示す。

ソースコード 6.1 検索情報コレクションに入るドキュメントの例。このように試験結果のID("runId")、試験日時("timeStamp")、検索対象となる名前情報("data")が保存される。

```
1 {  
2     "_id" : ObjectId("5fd489f60e2ca70557e44a8b"),  
3     "runId" : "5fc4d027b1ef7c6297c91040",  
4     "timeStamp" : ISODate("2020-11-30T10:57:19Z"),  
5     "data" : [  
6         "20UPGR00000001",  
7         "20UPGFC9999999",  
8         "std_digitalscan",  
9         "hokuyama",  
10        "tokyo_institute_of_technology",  
11        "2020/12/09"  
12    ]  
13 }
```

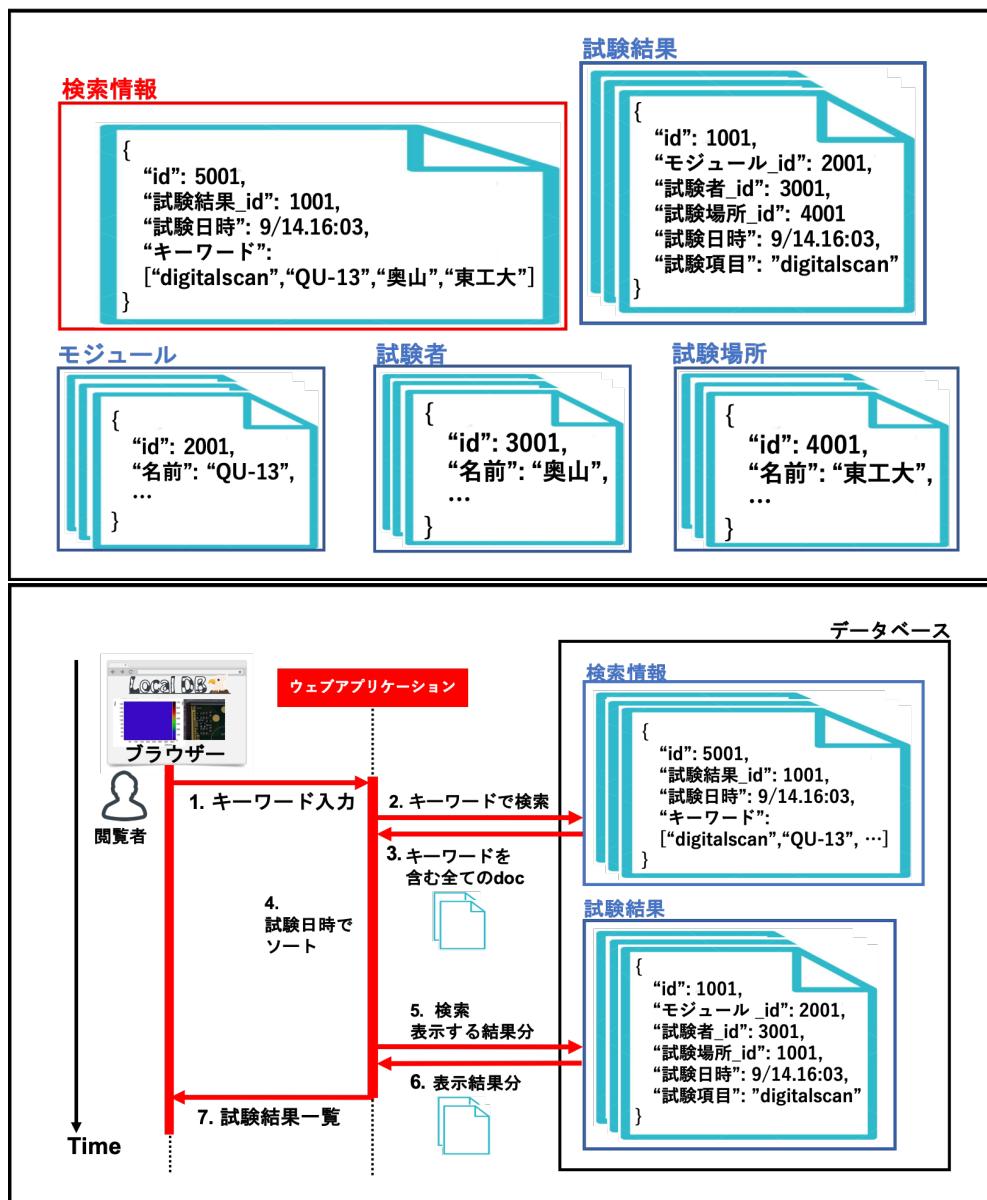


図 6.5 方法 2:検索キーワード専用コレクションを用いた場合のイメージ図。上図は各コレクションと保存されている情報の例を示しており、下図は実際に検索を行った時の処理の流れを表している。方法 2 では上図の赤枠で囲っている検索情報のコレクションを新たに設け、これを参照することで検索処理を行う。このコレクション内には各試験結果に対応したドキュメントが 1 つ保存され、全検索情報と試験結果の ID を持つものとなっている。処理の流れとしては下図のように、検索情報コレクションよりキーワードに対応する試験結果を抽出する処理と、表示の際に必要な情報を試験結果コレクションから取得する処理の 2 つに分かれた構造となっている。このような処理をすることにより、各検索処理にかかる時間は試験結果数に対して $O(n)$ になると考えられる。

表 6.1 測定に使用したノート PC(MacBookAir(13-inch,2017)) の性能。検索処理時間の測定に個人的に使用しているノート PC を使用した。

種類	CPU	Type	Core	Thread	Clock speed[GHz]	Memory [GB]	Disk [GB]
MacBookAir(13-inch,2017)	Intel Core i5	2	4	1.8		8	256

表 6.2 検索機能処理時間測定の詳細。測定を行った試験結果数、回数、キーワード、検索モード、検索情報の詳細を示している。

試験結果数	5000, 10000, 15000, 20000
測定回数	各測定点に対して 20 回
検索キーワード	okuyama
検索モード	部分一致
各試験結果が持つ検索情報	全試験結果に対して同じ、以下に詳細
検索情報一覧	モジュール名: 20UPGR10000005 FE チップ名: 20UPGTU9000000 試験項目: std_digitalscan 試験者: okuyama 試験場所: default_host 試験日時: 2020/12/06

6.2 処理時間測定

考案した方法を実装し、検索処理時間の測定を行った。詳細を以下に示す。また方法 1 で行った処理時間測定も同様の条件で行った。

使用した装置

測定には個人的に使用しているノート PC(MacBookAir(13-inch,2017)) を用いた。性能を表 6.1 に示す。

測定内容

PC 上で MongoDB、ウェブアプリケーションを起動し、試験結果を MongoDB にアップロードした。コマンドプロンプトから以下のコマンドを実行し、ウェブアプリケーションのある試験結果ページのリクエストに対するアプリケーションのレスポンス時間を測定した。ここでは検索キーワードは “okuyama” とし、検索モードは部分一致としている。実際にアプリケーションを使用する際には、ブラウザに一覧表示をする時間が今回の測定時間に加算されることになる。

```
1 curl "http://127.0.0.1:5000/localdb/scan?keywords=okuyama&match=partial" -o /dev/null -w "%{time\_total}\n" 2> /dev/null -s
```

その他測定に関する詳細を表 6.2 に示す。

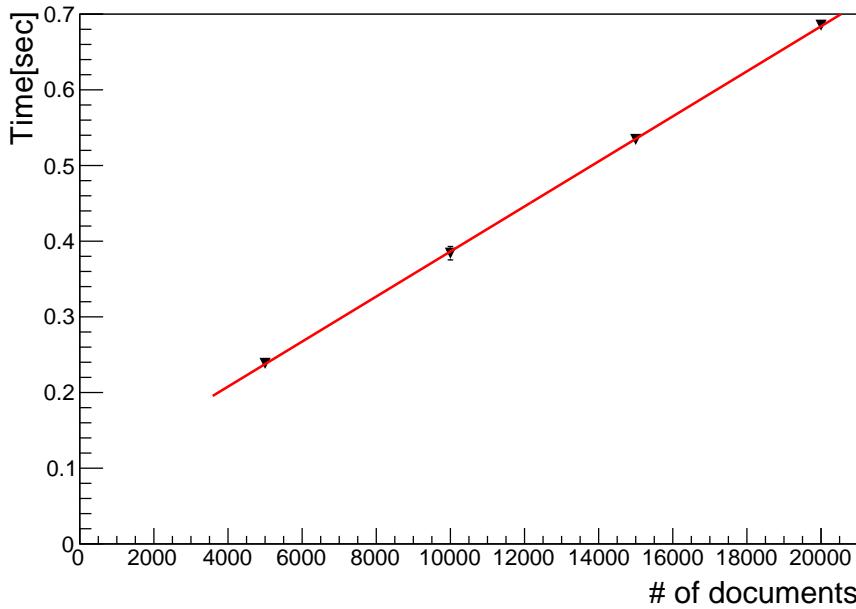


図 6.6 方法 2 における検索処理時間測定結果。横軸が試験結果のドキュメント数、縦軸が処理時間を表している。線形性を示していることが確認でき、検索実行時における処理時間は方法 1 に比べて優れている。

測定結果

方法 2 を用いて得られた結果を図 6.6 に示す。方法 1 の結果に関しては、既に図 6.4 で示した。比較すると方法 2 のほうが圧倒的に速く図での比較が難しいため、方法 2 と方法 1 の結果を同時に示すことはしていない。方法 1、方法 2 で得られた近似関数を式 6.1、6.2 に示す。方法 1 に対して、方法 2 はアルゴリズムの改善が見られる。

$$y = a_1 x^2 + b_1 \quad (6.1)$$

$$a_1 = (1.4 \pm 0.0) \times 10^{-6}$$

$$b_1 = 13 \pm 0$$

$$y = a_2 x + b_2 \quad (6.2)$$

$$a_2 = (3.0 \pm 0.1) \times 10^{-5}$$

$$b_2 = (8.9 \pm 0.8) \times 10^{-2}$$

現在は方法 2 で検索機能を実装し、サービスの 1 つとして提供している。

方法 2 では、アプリケーションの起動時に検索情報コレクションを生成するアルゴリズムとしている。ここで検索情報コレクションの生成にかかる処理時間として、ドキュメント数に対するアプリケーションの起動時間を測定した。結果を図 6.7 に示す。基本的には方法 1 と同じ操作を行うことで検索情報を収集し、ドキュメントを作成する。そのため、処理時間は $O(n^2)$ となる。この処理を前もって行なうことで、検索実行時の処理性能を上げている。また再起動の際には全てのドキュメントの削除、生成をする処理と

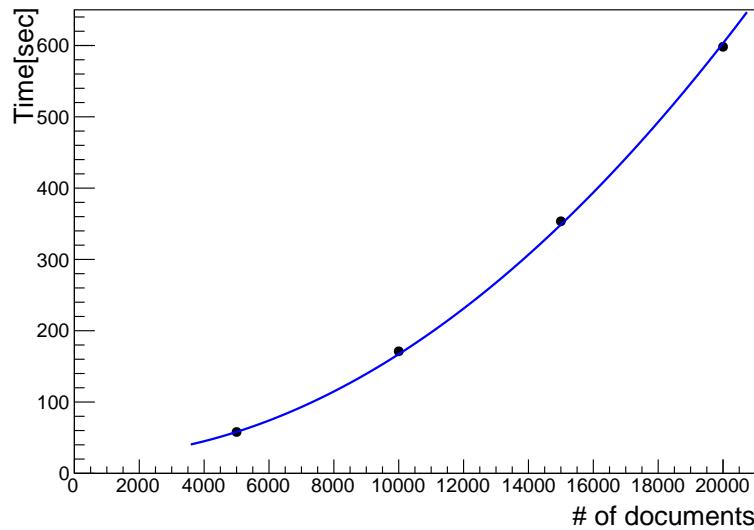


図 6.7 方法 2 における検索情報コレクションの生成時間測定結果。検索情報コレクションの生成にかかる処理時間として、ドキュメント数に対するアプリケーションの起動時間を測定した。横軸が試験結果のドキュメント数、縦軸が時間を示している。生成には、方法 1 と同様の処理を行なっているため $O(n^2)$ となっているのが分かる。ドキュメント数が 20,000 件の場合にはアプリケーションの起動に 10 分程度かかることが分かる。

なっている。これはスクリプト内でのドキュメント管理を簡略化するためである。実際の運用時に、起動が遅い等のフィードバックを受ける場合にはこのドキュメント管理の処理も実装する必要がある。

生産時における検索時間の見積もり

各方法について、生産時における処理時間の見積もりを行う。簡単のため今回使用したデバイスと生産時に使うサーバーの性能差は無視する。ここでデータベースで管理するモジュール数は日本が最多とし、その数を予定している 2,000 とする。保存する読み出し試験数は 3 章で述べた項目の合計とし、1 つのモジュールあたり 42 とする。全ての生産が終了した際の検索処理時間を見積もる。検索処理実行時間は、上で得られた関係式を用いて方法 1、2 に対して式 6.3、6.4 のように見積もることができる。

$$\{(1.4 \pm 0.0) \times 10^{-6}\} \times (2000 \times 42)^2 + (13 \pm 0) = (9.8 \pm 0) \times 10^3 [\text{sec}] \quad (6.3)$$

$$\{(3.0 \pm 0.1) \times 10^{-5}\} \times (2000 \times 42) + \{(8.9 \pm 0.8) \times 10^{-2}\} = 2.6 \pm 0.1 [\text{sec}] \quad (6.4)$$

方法 1 では 1 回の検索に対して約 2.7 時間と見積もられ、生産時には検索機能として有用でないことがわかる。方法 2 では生産終了時点においても数秒で処理を終えることができるため、生産を通して使用できると考えられる。

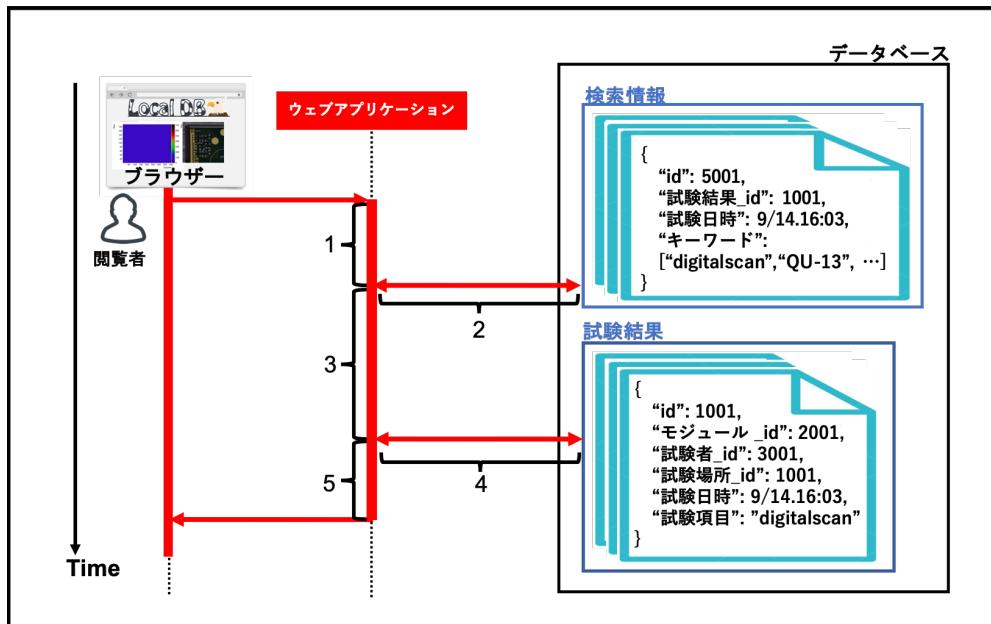


図 6.8 方法 2 の検索における詳細処理。図のように全体の流れにおけるアプリケーション内部での各処理、データベースから情報取得の各処理に 1 から 5 の番号をつけそれぞれにかかる処理時間を測定した。

6.3 改善方法と処理時間測定

より処理時間を短くすることを目的として、新たな検索処理アルゴリズムの考案と測定を行った。詳細について以下に示す。

6.3.1 方法 2 における検索処理時間の詳細調査

先述したように、方法 2 では処理時間が改善した。この方法 2 について、処理時間の詳細を知るために追加で測定を行った。アプリケーション層での各処理について、以下のように番号を付ける。

1. キーワードを受け取り、検索情報コレクションに検索をかけるまでの処理。
2. 検索情報コレクションに検索をかけ、情報を受け取る処理。
3. ドキュメントを受け取り該当する試験結果 ID をまとめ、試験結果に対して検索をかけるまでの処理。
4. 試験結果コレクションに検索をかけ、情報を受け取る処理。
5. ドキュメントを受け取りデータを整形、ブラウザにレスポンスを返すまでの処理。

イメージを図 6.8 に示す。

ボトルネックとなっている処理を測定するために、上述した各処理にかかる時間の測定を行った。測定は試験結果数が 10,000 の場合に行った。

結果を図 6.9 に示す。

図より処理 3、5 の割合が大きいことがわかる。これらの処理について、特に以下の処理の割合が大き

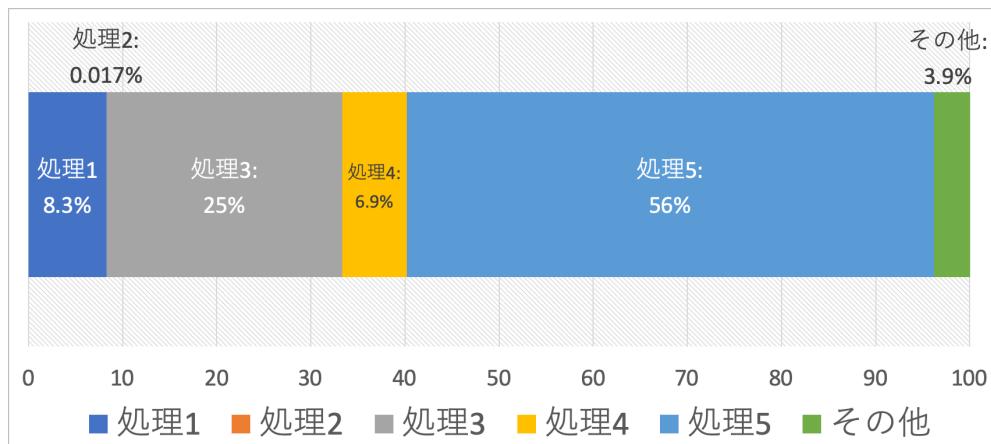


図 6.9 方法 2 における詳細処理時間の測定結果。図 6.8 における 5 つの詳細処理にかかる時間の割合を表している。処理 3、5 にあたるコレクション検索実行後のアプリケーション内での処理に多く時間がかかっていることが分かる。

表 6.3 処理 3,5 における型変換処理 6.5 の割合。処理 3、5 について、表の割合より、型変換処理 6.5 が支配的であることが分かる。

処理	全体 [sec]	処理 6.5[sec]	割合 [%]
3	0.091 ± 0.011	0.089 ± 0.005	97 ± 0
5	0.21 ± 0.00	0.18 ± 0.00	86 ± 1

いことがわかった。

取得した複数ドキュメントを Python リストへ型変換する処理. (6.5)

図 6.8 における処理 3、5 において、型変換処理 6.5 の割合を表 6.3 まとめた

この型変換処理について、あるコレクションにおける全ドキュメント数に対する Python リストへの型変換処理時間の関係を測定した。結果を図 6.10 に示す。全ドキュメント数に対して線形性を示していることがわかる。方法 2 の検索処理については型変換処理 6.5 が支配的であることが分かった。

6.3.2 改善点

測定を踏まえ、改善方法として以下の項目を検討した。ここでは、上述したように使用しているデータ構造や使用しているフレームワークの変更はせずに処理時間を改善することを前提としている。

- コレクション検索処理の回数を減らす.
- 検索対象コレクションのドキュメント数を減らす.

上述した 2 つを目的として、以下の 2 つの方法を新しく考え処理時間測定を行った。

3. 検索情報のコレクションに一覧表示に必要な情報を保持、参照.
4. 方法 3 に付け加えて、検索情報ドキュメントを複数コレクションに分散、マルチスレッドを用いた検索処理の並列化.

方法 3 については一覧表示に必要な情報を検索情報のドキュメントが持つことで、データベースに対する

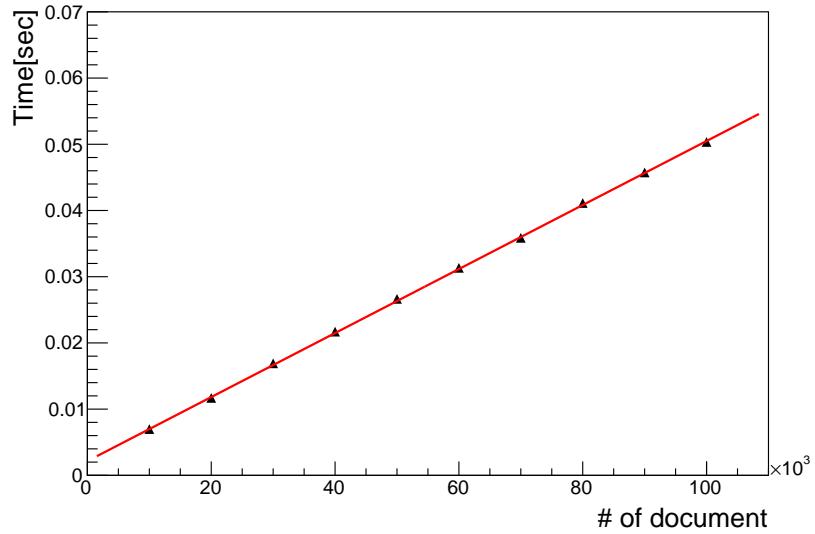


図 6.10 ドキュメント数に対する型変換処理時間の関係。コレクション検索後の型変換に要する処理時間は、図のようにドキュメント数に対して線形となっていることが分かる。

る検索の回数を減らすことを目的としている。方法 4 については方法 3 の検索処理の数を減らすことに加えて、ドキュメントの数を分散し並列処理をすることで処理時間の改善を図っている。イメージをそれぞれ図 6.11、6.12 に示す。

方法 3、4 について、節 6.2 と同じ内容の測定を行った。方法 2 のものと合わせた結果を図 6.13 に示す。方法 4 について、分散するコレクション数は 10 個、スレッド数には 2 とした。方法 2 に比べて、方法 3、4 共に処理時間が改善していることがわかる。

方法 3、4 を比べると傾きに差が見られる。この測定の環境では、方法 4 はドキュメント数が多くなった時に有効であると考えられる。方法 3 と 4 の有効性については、コンピュータの性能や OS にも依存すると考えられるので、実際に運用を行うサーバーの環境で検討をする必要がある。

方法 4 に関しては今回はコレクション数を 10、スレッド数を 2 としたが、それぞれ最適な数を検討することで更なる改善ができる可能性がある。

得られた方法 3,4 に関する関係を式 6.6、6.7 に示す。

$$y = a_3 x + b_3 \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned} a_3 &= (2.9 \pm 0.1) \times 10^{-5} \\ b_3 &= (5.0 \pm 1.1) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$y = a_4 x + b_4 \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} a_4 &= (2.7 \pm 0.1) \times 10^{-5} \\ b_4 &= (2.2 \pm 1.0) \times 10^{-2} \end{aligned}$$

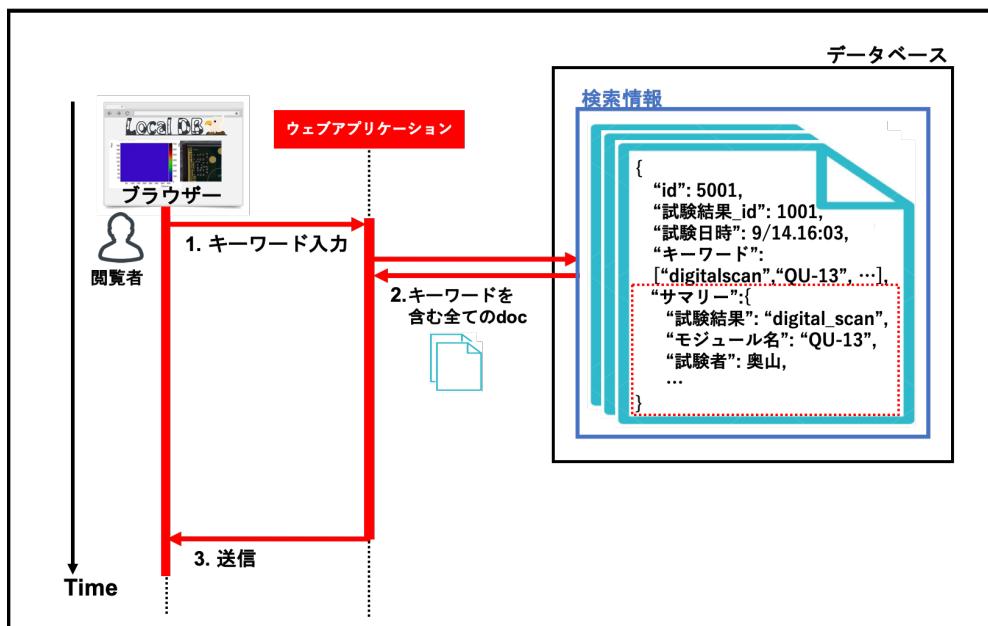


図 6.11 方法 3:検索情報と共に一覧表示に必要な情報を保持、参照。方法 2 では検索情報コレクションより、条件に一致する試験結果 ID を取得し、実際の試験結果に対して再度検索をかける流れとなっていたが、この方法では一覧表示に必要な情報も全て検索情報のコレクション内で保持する。こうすることで検索機能において必要な情報の全てが 1 つのコレクションにまとまり、コレクション検索の処理が 1 回で済むため、処理時間が改善すると考えられる。

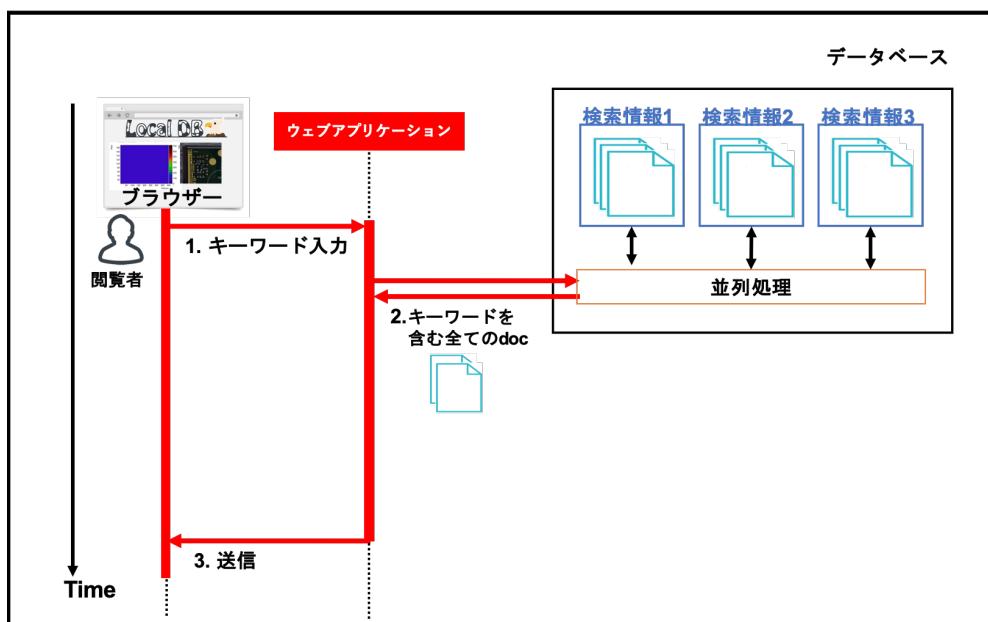


図 6.12 方法 4:検索情報コレクションを分散、マルチスレッドを使用。方法 3 に加えて、検索情報コレクションを分散し並列処理を行うことで、1 つのコレクションあたりに含まれるドキュメント数を減らし、コレクション検索にかかる時間を削減できると考えられる。

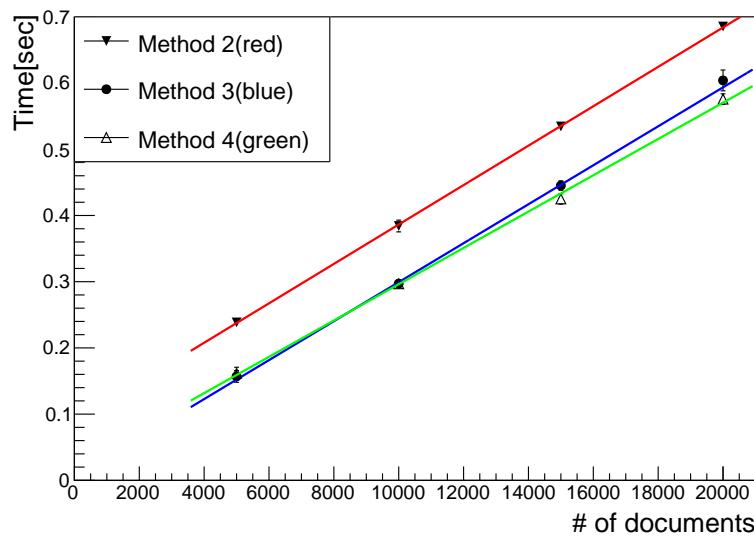


図 6.13 方法 3、4 に対する処理時間測定結果。横軸が試験結果のドキュメント数、縦軸が処理時間を表している。赤、青、緑がそれぞれ方法 2、3、4 を用いたものである。方法 2 に比べて 3、4 共に改善していることが分かる。方法 3、4 を比べると傾きに差があることが分かる。これより本測定における環境においては、ドキュメント数が大きい場合に方法 4 は有効である。

6.4 本章のまとめ

本章では、品質試験に特化した機能の 1 つである試験結果検索機能について、実装の方法と処理時間について述べた。方法 1 では試験結果数に対して検索処理時間が二次的に增加了。生産時に想定されるデータ数である 84,000 件に対して約 2.7 時間かかる見積もりとなってしまい、検索機能としては実用に向かない機能であった。そこで各試験に関わる検索情報を前もってあるコレクションに格納しておき、検索処理実行時にはこれを参照する方法 2 を考案し実装した。改善後の方では試験結果数に対して処理時間が線形となり、改善前の方法に比べ圧倒的に速くなった。84,000 件に対して約 2.6 秒と見積られ、生産を通して使用することができる機能であることを確認した。方法 2 の機能を現在は提供している。

さらなる改善に向けて、処理時間の詳細を調査したところデータベースのドキュメント取得時における Python リスト型への変換処理に大きく時間を要していた。そこで改善策として、検索情報とともに一覧表示に必要な情報を保持しておく方法 3、加えてマルチスレッドを使用し処理を分散する方法 4 の 2 つ考案し、処理時間測定を行なった。どちらも現在の方法に比べて処理時間の改善が見られた。マルチスレッドの方法はコンピュータの性能や OS に依存するため、実際に運用を行うサーバーによって処理時間が変化すると考えられる。

第7章

中央データベースとローカルデータベースの同期

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関する調査と機能開発を行った。詳細について以下で説明する。

7.1 サーバーの設置場所による処理時間の違い

4章で述べたように、中央データベースはチェコに設置されている。そのため通信に要する処理時間は、組み立て機関の場所に依存すると考えられる。世界的に同期ツールが不自由なく動くことを向けて開発、改善に役立てることを目的として、データベース間の通信にかかる処理時間を測定した。組み立て機関及びローカルデータベースの設置場所はヨーロッパ、アメリカ、日本の3つの地域に分布している(付録C)。それぞれにおける代表機関として以下の3つに設置されたサーバーを用いて調査を行った。

- 日本、高エネルギー加速器研究所 (KEK)
- アメリカ、ローレンス・バークレー国立研究所 [43](LBNL)
- スイス、欧州原子核研究機構 (CERN)

各サーバーの性能を表7.1に示す。また各サーバーが置かれている場所の位置関係を図7.1に示す。測定について、各サーバーに作成した個人のアカウント上で作業を行いデータを取得した。

これらのサーバーは実際に生産の際に使用するものと同程度の性能を持ち、サーバーが置かれているネットワーク環境も生産時と同じであると仮定している。

表7.1 各ローカルデータベースサーバーの性能一覧。今回の調査に利用したサーバーの性能を示す。
KEK(日本)、LBNL(アメリカ)、CERN(スイス)に設置されたサーバーを用いた。

設置機関	CPU Type	Core	Thread	Clock speed[GHz]	Memory [GB]	Disk [GB]
KEK(日本)	Intel(R) Core(TM) i7-9700K	8	16	3.6	32.66	1800 + 1800
LBNL(アメリカ)	Intel(R) Core(TM) i7-8700	6	12	3.7	32.63	233
CERN(スイス)	Intel(R) Core(TM) i7-4790	4	8	3.6	32.69	238.5 + 3700 + 3700



図 7.1 各サーバーの設置場所。赤点で示しているのがそれぞれローカルデータベースサーバーの設置位置であり、オレンジで示しているのが中央データベースである。距離としては CERN が一番近く、LBNL、KEK の順番となっている。

表 7.2 同期ツールの中で使用する中央データベースの主な API 一覧。同期ツールにおいて、中央データベースの情報取得には提供されているいくつかの API を用いており代表的なものを示す。この API を Python を用いて実行することで、情報取得や試験結果のアップロードをすることができる。

関数名	処理の内容	本ツールでの使用用途
getComponent	登録した部品情報の取得	主にダウンロード時におけるモジュールや FE チップの情報取得に用いる。
listComponents	登録した部品情報一覧の取得	主にダウンロード時におけるモジュール情報一覧取得に用いる。
uploadTestRunResults	テスト結果生成	読み出し試験結果生成の際に用いる。
createTestRunAttachment	ある試験結果に対するバイナリファイルの添付	読み出し試験結果ファイルを添付する際に用いる。

7.1.1 同期ツールに使用する API

中央データベースとの同期には、中央データベースで開発された API を使用している。ローカルデータベースとの同期ツールの中で使用している主な API を表 7.2 に示す。

7.1.2 API 使用にかかる時間

上述した API 使用時の処理時間を各サーバーで測定した。以下の 3 つの測定を行なった。

- getComponent を用いた、登録モジュール情報 1 つの取得時間測定。
- createTestRunAttachment を用いて、ある試験結果ページに 1Byte のデータファイルを添付する時間測定。
- createTestRunAttachment を用いて、ある試験結果ページに容量の異なるデータファイルを添付、容量に対する時間依存性を測定。

最初の 2 項目に関して、まとめたものを表 7.3 に示す。ファイル容量と処理時間の関係を図 7.2 に示す。ここで、どの場合においても KEK における処理時間が最も長いことがわかる。そのため本研究では、開発した同期ツールの処理確認及び処理時間測定を KEK サーバーで行い、その有用性を評価することとした。

表 7.3 中央データベース API 実行時の処理時間測定結果。左の結果は表 7.2 における “getComponent” を用いてモジュール 1 つの情報を取得するのにかかった時間、右は “createTestRunAttachment” を用いて 1Byte のファイル送信にかかった時間である。どのサーバーにおいても 0.28 秒以上の処理時間がかかっていることがわかり、データベースへの接続、情報取得にかかる時間が読み取れる。3 つのサーバーを比べると、どちらの場合も KEK サーバーでの処理時間が一番大きいことが分かる。

サーバー	処理時間 [秒]	サーバー	処理時間 [秒]
KEK	0.47 ± 0.01	KEK	0.83 ± 0.01
LBNL	0.37 ± 0.02	LBNL	0.34 ± 0.03
CERN	0.28 ± 0.01	CERN	0.48 ± 0.03

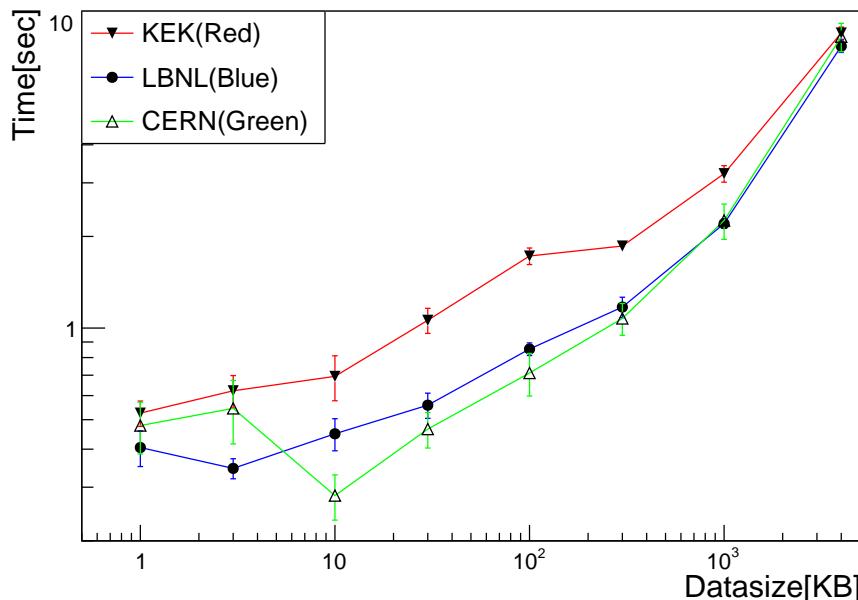


図 7.2 “createTestRunAttachment” を用いた添付処理におけるファイル容量と処理時間の関係。それぞれのサーバーで 1、3、10、30、100、300 KB、1、4 MB のファイル送信にかかる時間を測定した。どの点においても KEK サーバーが最も処理時間を要していることが分かる。このグラフについての考察を付録 E に記す。

7.1.3 中央データベースウェブページ接続にかかる時間

KEK、LBNL のサーバーにおいてネットワークの混雑状況等の理由による処理時間遅延の影響を調べるために、中央データベースウェブページへの通信時間を 1 週間通して測定した。測定は 1 月 10 日午後 8 時から 1 月 18 日午後 16 時の、偶数時間 (0,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22 時) に行なった。CERN のサーバーにおいては、サーバーのダウンによりデータ取得に失敗した。測定結果を図 7.3 に示す。KEK、LBNL 共に処理時間の変化は小さく、どの時間帯においても KEK の方が遅いことが分かる。

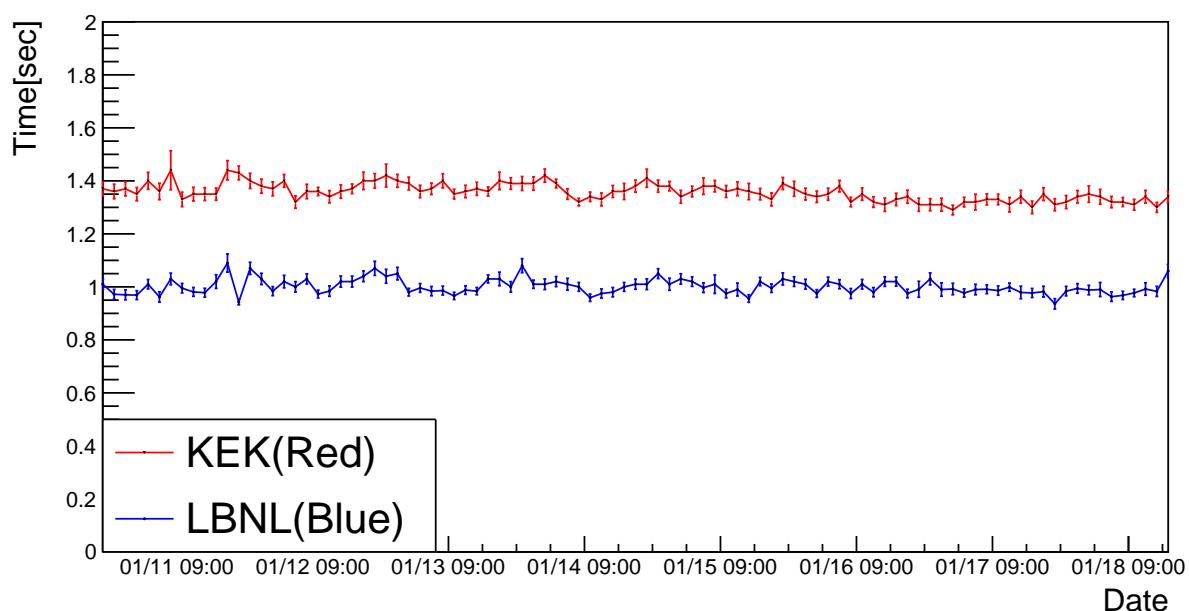


図 7.3 中央データベースウェブページへの通信時間の測定結果。横軸は測定日時、縦軸は中央データベースウェブページへの通信時間を表す。1月10日午後8時から1月18日午後16時の期間で測定を行い、各日の偶数時間にデータ取得を行なった。赤線、青線はそれぞれKEK、LBNLのサーバーを用いた測定結果である。どちらのサーバーにおいても時間帯による通信時間の大きな変化は見られず、全ての時間帯においてKEKの通信時間の方が遅いことが分かる。

表 7.4 ダウンロード機能を用いて保存する情報一覧。ダウンロード機能を用いて中央データベースからローカルデータベースに保存する情報の一覧を示している。保存の際にはモジュール、FE チップの情報がそれぞれ別のドキュメントに保存される。

部品	情報
モジュール	シリアルナンバー
	搭載 FE チップの種類
	登録機関
	搭載 FE チップの枚数
FE チップ	シリアルナンバー
	FE チップ ID(モジュール上の位置を表す情報)
	種類
	登録機関

7.2 モジュール情報のダウンロード

7.2.1 ダウンロードする情報と構造

中央データベースから、モジュール及び FE チップの情報をダウンロードする機能を開発、実装した。ダウンロードする情報の詳細について表 7.4 に示す。

ダウンロードされたモジュール、FE チップのドキュメントの例をコード 7.1、7.2 に示す。

ソースコード 7.1 ダウンロードしたモジュール情報のドキュメントの例。ドキュメントが表 7.4 の情報を持つことが分かる。

```

1 {
2     "_id" : ObjectId("5fa79114e615fa000a1a5976"),
3     "name" : "20UPGR000000001",
4     "chipType" : "RD53A",
5     "serialNumber" : "20UPGR000000001",
6     "chipId" : -1,
7     "componentType" : "module",
8     "address" : "5fd597fdf7339bbf26b87fb2",
9     "children" : 1,
10    "sys" : {
11        "mts" : ISODate("2020-12-13T04:26:37.989Z"),
12        "cts" : ISODate("2020-12-13T04:26:37.989Z"),
13        "rev" : 0
14    },
15    "dbVersion" : 1.01,
16    "user_id" : -1,
17    "proDB" : true
18 }
```

ソースコード 7.2 ダウンロードした FE チップ情報のドキュメントの例。ドキュメントが表 7.4 の情報を持つことが分かる。

```

1 {
2     "_id" : ObjectId("5fa79560e615fa000a1a5a16"),
3     "name" : "20UPGFC9999999",
4     "chipType" : "RD53A",
5     "serialNumber" : "20UPGFC9999999",
6     "chipId" : 0,
7     "componentType" : "front-end_chip",
8     "address" : "5fd597fdf7339bbf26b87fb2",
9     "children" : -1,
10    "sys" : {
11        "mts" : ISODate("2020-12-13T04:26:37.984Z"),
12        "cts" : ISODate("2020-12-13T04:26:37.984Z"),
13        "rev" : 0
14    },
15 }
```

```

15     "dbVersion" : 1.01,
16     "user_id" : -1,
17     "proDB" : true
18 }
```

7.2.2 処理の流れ

ダウンロード機能における処理の流れのイメージを図 7.4 に示す。

7.2.3 機能確認

KEK で組み立てられた 6 台の Quad モジュールを中央データベースに登録し、ダウンロードを行った。登録したモジュールを表 7.5、ダウンロードをしてアプリケーションで確認した様子を図 7.6 に示す。

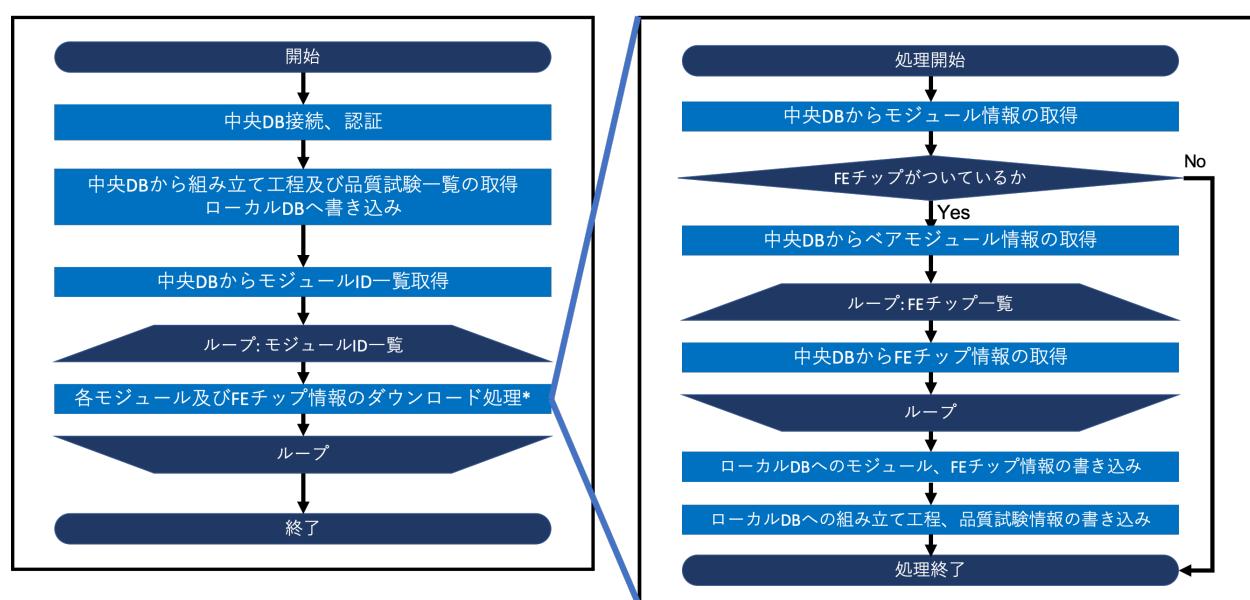


図 7.4 ダウンロード処理における流れのイメージ図。流れの中で複数回中央データベースに接続し、モジュールや FE チップの情報取得を行う。

Module	Bare Module	Sensor	PCB	Carrier	FE chip
20UPGM20030004	20UPGB40500019	20UPGS83300002	20UPGPQ0030004	20UPGMC0210000	20UPGFC0014659 20UPGFC0014658 20UPGFC0014675 20UPGFC0014691 20UPGFC0014644 20UPGFC0014628 20UPGFC0014660 20UPGFC0014708 20UPGFC0014677 20UPGFC0014629 20UPGFC0014693 20UPGFC0014646 20UPGFC0016282 20UPGFC0016281 20UPGFC0016279 20UPGFC0016280 20UPGFC0016278 20UPGFC0016267 20UPGFC0016235 20UPGFC0016242 20UPGFC0016276 20UPGFC0016266 20UPGFC0016220 20UPGFC0016227
20UPGM20030001	20UPGB40500020	20UPGS83300003	20UPGPQ0030001	20UPGMC0210001	
20UPGM20030003	20UPGB40500021	20UPGS83300004	20UPGPQ0030003	20UPGMC0210002	
20UPGM20030006	20UPGB40500022	20UPGS83300001	20UPGPQ0030006	20UPGMC0210003	
20UPGM20030022	20UPGB40500023	20UPGS83300005	20UPGPQ0030022	20UPGMC0210004	
20UPGM20030024	20UPGB40500024	20UPGS83300006	20UPGPQ0030024	20UPGMC0210005	

図 7.5 登録した Quad モジュールとその構成部品のシリアルナンバー一覧。左から、登録したモジュール、搭載されているペアモジュール、シリコンセンサー、PCB、モジュールキャリア、FE チップの中核データベース内でのシリアルナンバーを示している。Quad モジュールであるため、FE チップをそれぞれ 4 つ搭載している。

ProdDB web

IN PROGRESS	Module - Outer system quad module	20UPGM20030001
IN PROGRESS	Module - Outer system quad module	20UPGM20030024
IN PROGRESS	Module - Outer system quad module	20UPGM20030022
IN PROGRESS	Module - Outer system quad module	20UPGM20030006
IN PROGRESS	Module - Outer system quad module	20UPGM20030003
IN PROGRESS	Module - Outer system quad module	20UPGM20030004

 Download

LocalDBX TOP / COMPONENTS / TEST

ITk database for Yarr Component List

Input keywords Partial match Perfect match

RD53A (11 modules)

Module Name	Chip Name	Latest Result						Tag
		Current Stage	Test Type	User	Site	Date	Link	
20UPGR90020026	20UPGFC0028965 20UPGFC0028950 20UPGFC0028951 20UPGFC0028952	None	None	None	None	None		
20UPGR90000004	20UPGFC0008036 20UPGFC0007994 20UPGFC0007972 20UPGFC0008035	None	None	None	None	None		
20UPGR30000001	20UPGR33000000 20UPGR33000001 20UPGR33000002 20UPGR33000003	None	None	None	None	None		
20UPGR10099999	20UPGFC999995 20UPGFC999996 20UPGFC999997 20UPGFC999998	None	None	None	None	None		
20UPGR00000001	20UPGFC999999	None	None	None	None	None		
20UPGM20030024	20UPGFC0016276 20UPGFC0016266 20UPGFC0016220 20UPGFC0016227	None	None	None	None	None		
20UPGM20030022	20UPGFC0016278 20UPGFC0016267 20UPGFC0016235 20UPGFC0016242	None	None	None	None	None		
20UPGM20030006	20UPGFC0016282 20UPGFC0016281 20UPGFC0016279 20UPGFC0016280	None	None	None	None	None		
20UPGM20030004	20UPGFC0014659 20UPGFC0014658 20UPGFC0014675 20UPGFC0014691	None	None	None	None	None		
20UPGM20030003	20UPGFC0014677 20UPGFC0014629 20UPGFC0014693 20UPGFC0014646	None	None	None	None	None		
20UPGM20030001	20UPGFC0014644 20UPGFC0014628 20UPGFC0014660 20UPGFC0014708	None	None	None	None	None		

図 7.6 登録した Quad モジュールのダウンロードの様子。上図が中央データベースのウェブページを表しており、下図がローカルデータベースのものである。上図で登録したモジュール一覧を確認でき、赤枠で囲っているところでシリアルナンバーを見ることができる。ダウンロード実行後は下図のようにローカルデータベースで対応するモジュールを確認することができる。ローカルデータベースではモジュール情報に加えて FE チップの情報も取得するため、下図の表ではこれらのシリアルナンバーも確認できる。

表 7.5 登録したモジュールのダウンロード処理時間測定結果。登録したそれぞれのモジュールについてダウンロードにかかる時間を測定した。表より 1 つあたり平均 4 秒の時間がかかっていることが分かる。

モジュール	処理時間
20UPGM20030004	3.8
20UPGM20030001	3.7
20UPGM20030003	5.9
20UPGM20030006	3.6
20UPGM20030022	3.8
20UPGM20030024	3.3
平均	4.0 ± 0.4

7.2.4 処理時間測定

ダウンロードの処理時間を測定した。これについてまとめたものを表 7.5 に示す。Quad モジュール 1 つに対して平均して 4.0 ± 0.4 秒の処理時間がかかっている。

7.2.5 処理時間詳細

ダウンロード処理時間の改善に向けて、処理時間の詳細について以下の測定した。

1. 中央データベースからモジュール情報の取得.
2. データベースでの FE チップ確認処理.
3. 中央データベースからベアモジュール情報の取得.
4. 中央データベースから FE チップ情報の取得 (4 枚分).
5. ローカルデータベースへの情報の書き込み (モジュール、FE チップ、品質試験情報).

情報取得のイメージを図 7.7 に示す。このように Quad モジュールの場合、ダウンロードの流れの中で合計して 7 回、データベース API を用いて情報取得を行う。

結果を表 7.6 に示す。

この結果より、各構成部品情報の取得 (モジュール、ベアモジュール、FE チップ) の取得にそれぞれ均等に処理時間がかかっていることがわかった。

7.2.6 生産時における見積もり

現在ダウンロード機能のオプションとして、以下の 2 つを実装している。

1. モジュール 1 つをダウンロードする機能.
2. 登録されている全てのモジュールの一括ダウンロード機能.

オプション 1 の見積もり値は、表 7.5 の平均値として 4.0 ± 0.4 [sec] となる。オプション 2 の見積もり値は、生産時には最大で 10,000 台のモジュールが中央データベースに登録されることから、以下のよう

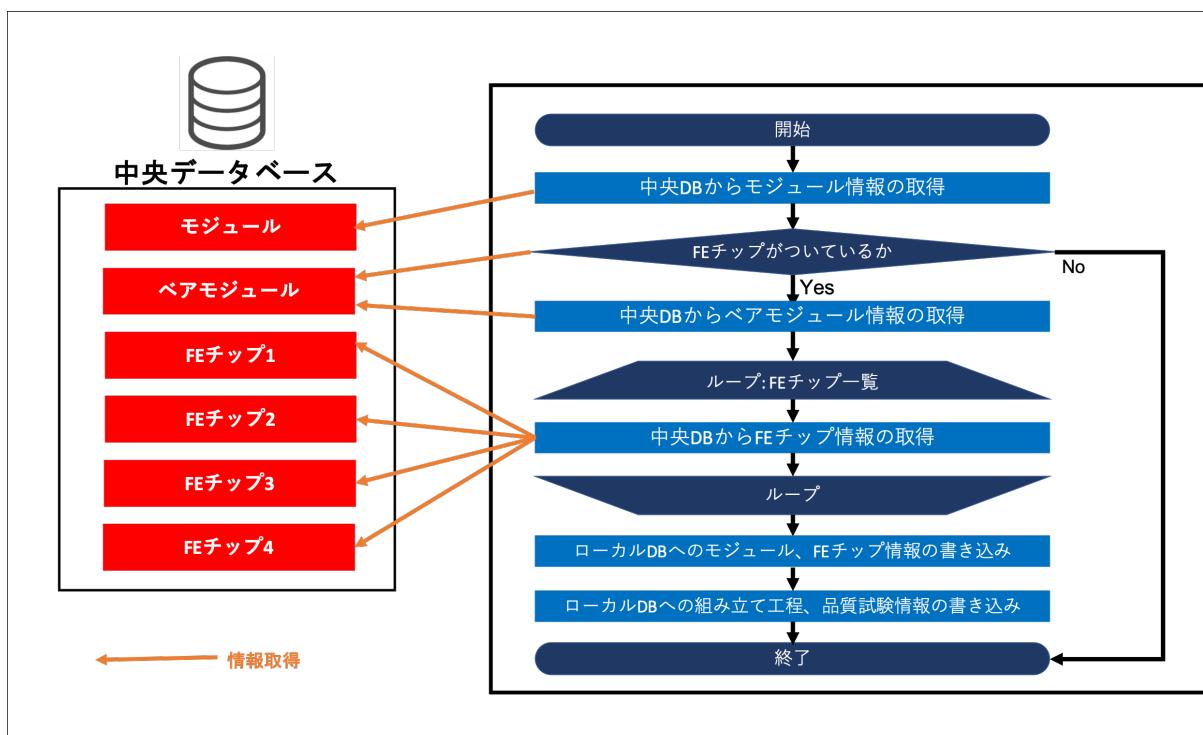


図 7.7 モジュール及び構成部品情報取得のイメージ。図のように処理の流れの中で合計 7 回中央データベースに接続し、モジュール、ペアモジュール、FE チップの情報取得を行っている。

表 7.6 ダウンロード機能における詳細処理にかかる時間測定。図 7.7 より、中央データベースに接続、情報取得を合計 7 回行っており、それが処理 1 から 4 に対応する。どの処理においても 0.5 秒程度の時間がかかることが分かる。処理 5 はローカルデータベースへの書き込み処理であるが、他の処理に比べて十分に小さいことが分かる。

処理	時間
1	0.60 ± 0.07
2	0.55 ± 0.07
3	0.61 ± 0.04
4	0.46 ± 0.04 0.71 ± 0.19 0.51 ± 0.04 0.57 ± 0.12
5	0.0025 ± 0.0011
合計	4.0 ± 0.1

1. 中央データベースからモジュール情報の取得.
2. データベースでの FE チップ確認処理.
3. 中央データベースからペアモジュール情報の取得.
4. 中央データベースから FE チップ情報の取得 (4 枚分).
5. ローカルデータベースへの情報の書き込み (モジュール、FE チップ、品質試験情報).

になる。

$$(4.0 \pm 0.4)[\text{sec}] \times 10,000 = 11 \pm 1[\text{hour}] \quad (7.1)$$

データベース操作の流れにおいて(図4.18)、各機関で各モジュールの組み立てを始める際に中央データベースへのモジュール登録及びローカルデータベースへモジュール情報のダウンロードを行うことを想定している。これは1つずつ行うため、このような場合はオプション1を用いる。

オプション2の使用例として、モジュールの組み立て工程の途中で、複数のモジュール($O(100)$ 程度)を機関1から機関2に輸送する場合をあげる。機関2では機関1で登録された全てのモジュール情報をダウンロードしてくる必要があるため、このオプションを使用する。輸送に要する時間として1週間と仮定すると、この時間を利用してダウンロード処理を行う必要がある。また何らかの不具合で実行途中で落ちてしまった場合、再会した際には落ちた時点の処理から行われるのが望ましい。この機能は現在実装をしていないため、今後改良する必要がある。

7.2.7 改善点の考案と見積もり

オプション2について、11時間の処理時間を要する見積もりとなっている。より円滑な同期処理に向けて、処理時間の改善方法について考える。

一括ダウンロード機能については以下の改善点が考えられる。

1. モジュールの現在位置に対応したものののみのダウンロード.
2. FEチップの登録機関を取得しない.
3. モジュールのプロパティとして、ダウンロードに必要な情報を全て保存.
4. データベースAPIを改良し、モジュール一覧取得の際に構成要素の情報を取得できるようにする.

これらについて詳細と処理時間の見積もりを以下で行う。

改善案1: モジュールの現在位置に対応したものののみのダウンロード

中央データベースではモジュールの現在位置情報を保持している。全てのモジュール情報をダウンロードする必要はなく、機能実行者と位置が同じもののみをダウンロードするアルゴリズムにすれば処理時間を改善できる。見積もりとしては、ダウンロード対象となるモジュール数を n とすると、以下のようになる。

$$(11 \pm 1) \times \frac{n}{10000}[\text{hour}] \quad (7.2)$$

改善案2: FEチップの登録機関を取得しない

表7.7よりダウンロードの際に、FEチップの情報取得を行っている。これはFEチップ登録機関の情報を取得しローカルデータベースに保存するためであるが、この情報は組み立て機関で必ずしも保持しておきたい情報ではない。そのため、現段階ではFEチップのデータ取得処理は割愛することができる。これにかかる処理時間は表7.6より、合計して $2.3 \pm 0.2[\text{sec}]$ となるため、その場合オプション2の処理時間の見積もりは、以下のようになる。

$$\{(4.0 \pm 0.4) - (2.3 \pm 0.2)\}[\text{sec}] \times 10,000 = 4.9 \pm 0.8[\text{hour}] \quad (7.3)$$

この改善策のデメリットとしては、FE チップの情報取得処理を省くとローカルデータベースに保存したい情報が将来的にできた場合に、保存できないことである。例えば各 FE チップの最適動作電圧のようにモジュール読み出しに対して有益な情報は保存し、迅速に確認したいというシステム方針になることがあげられる。

改善案 3: モジュールのプロパティとして、ダウンロードに必要な情報を全て保存

モジュールのプロパティとして、FE チップの名前等のダウンロードに必要な情報を書いておくと、表 7.2 における listComponents によるモジュール一覧取得の際にその情報を参照することができる。こうすることで、表 7.7 において、ペアモジュールや FE チップの情報取得を省くことができる。これらの処理時間は、合計して $2.9 \pm 0.2[\text{sec}]$ となるため、その場合オプション 2 の処理時間の見積もりは、

$$\{(4.0 \pm 0.4) - (2.9 \pm 0.2)\}[\text{sec}] \times 10,000 = 3.1 \pm 0.8[\text{hour}] \quad (7.4)$$

このデメリットは、データベースの中でデータが冗長になってしまうことである。FE チップの名前情報がモジュールのプロパティにも保存されていると、データベース内部で冗長性を持ってしまい、編集が加えられた場合などこれを管理するのが難しくなる。

改善案 4: データベース API を改良し、モジュール一覧取得の際に構成要素の情報を取得できるようにする

現在、表 7.2 の listComponents を用いた時にはモジュール一覧の情報は取得できるが、各モジュールに対して構成要素の情報は取得できない。そのため表 7.7 のようにモジュールごとに中央データベースに接続し、部品情報を取得している。ダウンロードに必要な情報を listComponents で一括で取得できるような仕様に API の変更を行えば、中央データベースへの接続は一回ですみ、処理時間を削減できると考えられる。この場合、中央データベースの内部構造を知り、一括で取得しデータ送信をする場合にどれだけの時間を要するかを見積もり、今の場合と比較する必要がある。

現段階ではモジュール組み立ての試験段階であり、組み立て機関で必要な情報、世界各地での組み立て工程の流れ等を検討している段階である。ここで述べたような改善策を組み合わせ、変更を加えていく必要がある。また中央データベースとの同期におけるネットワーク速度は地理的な距離により異なるため、この点も考慮に入れる必要がある。今回の測定は日本で行われたものであるため、他の国においては処理速度は改善すると考えられる。

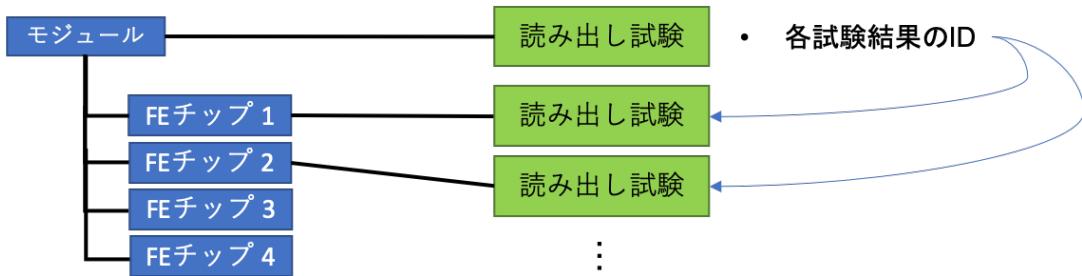


図 7.8 中央データベースにおける読み出し試験結果の構造。YARR の出力ファイル及びローカルデータベースのデータ構造において、読み出し試験結果は全て FE チップに紐つけられている。そのため、図のように中央データベースにおいてもこのデータ構造を保持する形でアップロードを行う。モジュールの結果は各 FE チップの試験結果に対する ID を持つことで紐付けを行っている。

表 7.7 中央データベースにおける読み出し試験結果に関する情報一覧。モジュール及び FE チップが中央データベース内で持つ試験結果の情報を示している。

部品	試験情報、結果	添付ファイル
モジュール	モジュール環境温度 FE チップにつく読み出し試験結果の ID	
FE チップ	ピクセル解析結果	試験結果データファイル 読み出し設定ファイル その他設定ファイル

7.3 読み出し試験結果のアップロード

4 章で述べたように、読み出し試験結果について中央データベースへアップロードするツールを開発した。以下で詳細を述べる。

7.3.1 アップロードする情報とその構造

読み出し試験結果について、中央データベースにアップロードする情報を以下に記す。

- 試験日時.
- モジュール周りの環境温度.
- ピクセル解析結果.
- 各試験結果データファイル.
- 読み出し設定ファイル.
- その他設定ファイル (DB、ユーザ、組み立て機関等).

中央データベースにおける読み出し試験の構造に関して、YARR を用いて行った読み出し結果は全て FE チップ毎に取得、保存される。そのため、データベースの内部でも FE チップに読み出し試験結果を紐づける構造を設け、モジュールの結果では各 FE チップの結果ページの ID を持つ構造とした。イメージを図 7.8 に示す。

中央データベースにおいてモジュール、FE チップの試験結果が持つ情報を表 7.7 にまとめた。

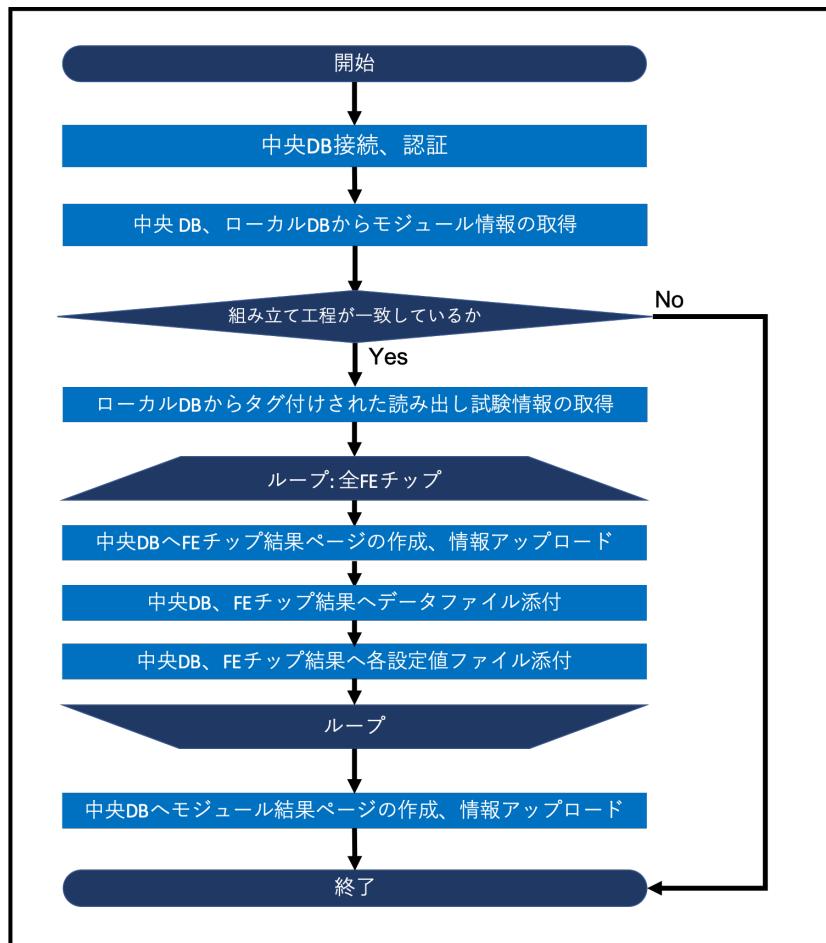


図 7.9 アップロード処理に関する流れのイメージ図。流れの中には FE チップに関するループ構造があり、ここで FE チップの結果生成、結果ファイルのアップロードを行う。最後にモジュールに対する結果生成とアップロードを行う。

7.3.2 処理の流れ

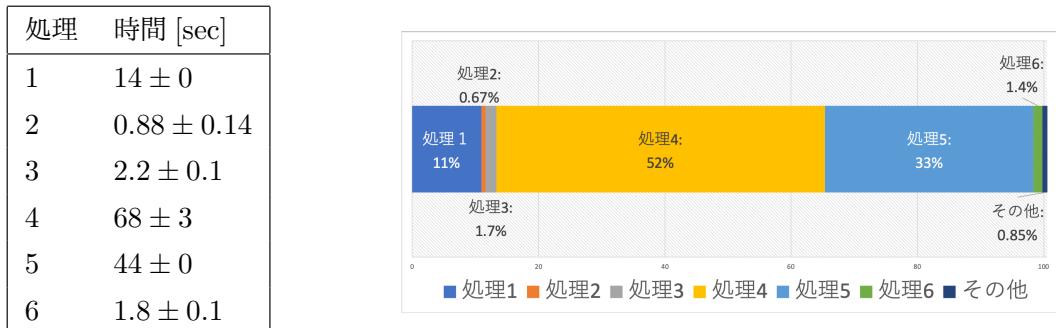
アップロード機能における処理の流れのイメージを図 7.9 に示す。流れの中には共通して行われる処理と、各 FE チップに対して行われる処理がある。

7.3.3 処理時間測定

上述した処理のツールを開発し、処理時間測定を行った。ここで行ったアップロードする試験項目は 5 章で行ったデモンストレーションのものと同じで以下の項目とする。

- デジタル回路読み出し.
- アナログ回路読み出し.
- Threshold 測定.
- ToT 測定.
- ノイズ占有率測定.

これらの項目についてアップロードを行い、その処理時間を測定した。KEK のサーバーを用いてアッ



1. 中央データベース接続、認証.
2. 中央データベース、ローカルデータベースからモジュール情報の取得.
3. 中央データベースに FE チップ結果ページの作成。結果情報をアップロード.
4. 3 で作成した結果に対して、各データファイルを添付.
5. 3 で作成した結果に対して、各設定値ファイルを添付.
6. 中央データベースにモジュールの結果ページの作成、結果情報をアップロード.

図 7.10 アップロード機能における詳細処理測定結果。アップロード機能において、各詳細処理時間を測定した結果である。左図は測定値であり、右図はそれぞれの割合を示したものである。右図より、処理 4、5 の結果ファイルの添付、設定値ファイルの添付に多く時間がかかっていることが分かる。

プロード処理を 20 回行い、5 項目全体でかかる時間を測定した。以下のようにになった。

$$(1.3 \pm 0.0) \times 10^2 [\text{sec}] \quad (7.5)$$

ここで処理流れの図 7.9 より特に以下の詳細処理を抜粋し、それぞれにかかる時間を測定した。

1. 中央データベース接続、認証.
2. 中央データベース、ローカルデータベースからモジュール情報の取得.
3. 中央データベースに FE チップ結果ページの作成。結果情報をアップロード.
4. 3 で作成した結果に対して、各データファイルを添付.
5. 3 で作成した結果に対して、各設定値ファイルを添付.
6. 中央データベースにモジュールの結果ページの作成、結果情報をアップロード.

測定値と割合をグラフにしたものと図 7.10 に示す。結果データや各設定値のファイル添付に大きく時間がかかっていることが分かった。

これらの処理について詳細を調査するために、各ファイルにおける添付処理時間の測定を行った。測定は上述したものと同様に KEK サーバーを用いて合計 20 回行った。添付する結果ファイル、設定ファイルの種類とデータ容量、添付処理実行結果、処理時間を表 7.8 に示す。ここで 4 MB を超える容量のファイル添付は失敗していることがわかり、アップロード機能の問題点を発見した。

表 7.8: アップロード処理における結果、設定値ファイル添付実行結果と処理時間。図 7.10 より、読み出し試験に対して出力される各ファイルのアップロード実行結果、データ容量と処理時間をまとめた。ここで扱うファイルサイズの合計は 94 MB である。図よりファイルのデータ容量が大きいほど処理時間が長いことが分かる。`std_thresholdscan` のようにファイル数が多い項目の場合、合計して大きい処理時間を要することが分かる。全項目において読み出しの設定ファイルにあたる `beforeCfg_chipCfg.json`, `afterCfg_chipCfg.json` のアップロードは、中央データベースの容量制限により失敗していることが分かる。

読み出し項目	ファイル名	実行結果	容量 [KB]	処理時間 [sec]	全体 [sec]
std_digitalscan	EnMask.json	Ok	1,300	3.3 ± 0.1	17±0
	OccupancyMap.json	Ok	1,500	2.9 ± 0.2	
	L1Dist.json	Ok	0.53	0.75 ± 0.12	
	ctrlCfg_ctrlCfg.json	Ok	0.46	0.61 ± 0.08	
	dbCfg_dbCfg.json	Ok	0.60	0.69 ± 0.16	
	siteCfg_siteCfg.json	Ok	0.033	0.61 ± 0.06	
	userCfg_userCfg.json	Ok	0.14	0.66 ± 0.09	
	scanCfg_std_digitalscan.json	Ok	2.2	0.55 ± 0.06	
	beforeCfg_chipCfg.json	Error	7,200	3.0 ± 0.2	
	afterCfg_chipCfg.json	Error	7,200	4.0 ± 0.2	
std_analogscan	EnMask.json	Ok	1,300	3.9 ± 0.1	17±0
	OccupancyMap.json	Ok	1,400	2.6 ± 0.1	
	L1Dist.json	Ok	0.60	0.69 ± 0.16	
	ctrlCfg_ctrlCfg.json	Ok	0.46	0.54 ± 0.05	
	dbCfg_dbCfg.json	Ok	0.60	0.49 ± 0.04	
	siteCfg_siteCfg.json	Ok	0.033	0.48 ± 0.04	
	userCfg_userCfg.json	Ok	0.14	0.58 ± 0.08	
	scanCfg_std_analogscan.json	Ok	2.1	0.45 ± 0.03	
	beforeCfg_chipCfg.json	Error	7,200	2.9 ± 0.2	
	afterCfg_chipCfg.json	Error	7,200	3.9 ± 0.3	
std_thresholdscan	Scurve-30-96.json	Ok	0.98	1.3 ± 0.1	49±1
	Scurve-110-96.json	Ok	0.98	0.45 ± 0.03	
	Scurve-70-96.json	Ok	0.98	0.47 ± 0.04	
	Scurve-150-96.json	Ok	1.0	0.46 ± 0.04	
	Scurve-190-96.json	Ok	1.0	0.64 ± 0.12	
	Scurve-230-96.json	Ok	1.0	0.49 ± 0.03	
	Scurve-270-96.json	Ok	1.0	0.47 ± 0.04	
	Scurve-310-96.json	Ok	1.0	0.47 ± 0.04	
	Scurve-350-96.json	Ok	1.0	0.49 ± 0.03	
	Scurve-390-96.json	Ok	1.0	0.52 ± 0.06	
	Scurve-40-96.json	Ok	1.0	0.46 ± 0.03	
	Scurve-80-96.json	Ok	0.99	0.68 ± 0.13	
	Scurve-120-96.json	Ok	1.0	0.54 ± 0.07	
	Scurve-160-96.json	Ok	1.0	0.51 ± 0.05	
	Scurve-200-96.json	Ok	1.0	0.49 ± 0.04	
	Scurve-240-96.json	Ok	1.0	0.50 ± 0.05	
	Scurve-280-96.json	Ok	1.0	0.48 ± 0.04	
	Scurve-320-96.json	Ok	1.0	0.49 ± 0.05	
	Scurve-360-96.json	Ok	1.0	0.49 ± 0.06	
	Scurve-400-96.json	Ok	1.0	0.45 ± 0.05	
	Scurve-10-96.json	Ok	1.0	0.42 ± 0.03	
	Scurve-50-96.json	Ok	0.99	0.49 ± 0.05	
	Scurve-90-96.json	Ok	0.99	0.46 ± 0.05	
	Scurve-130-96.json	Ok	1.0	0.47 ± 0.05	
	Scurve-170-96.json	Ok	1.0	0.52 ± 0.04	
	Scurve-210-96.json	Ok	1.0	0.51 ± 0.04	
	Scurve-250-96.json	Ok	1.0	0.58 ± 0.10	
	Scurve-290-96.json	Ok	1.0	0.64 ± 0.13	
	Scurve-330-96.json	Ok	1.0	0.64 ± 0.09	
	Scurve-370-96.json	Ok	1.0	0.49 ± 0.06	
	Scurve-60-96.json	Ok	0.99	0.51 ± 0.06	
	Scurve-100-96.json	Ok	1.0	0.48 ± 0.05	
	Scurve-140-96.json	Ok	1.0	0.48 ± 0.06	
	Scurve-180-96.json	Ok	1.0	0.52 ± 0.06	
	Scurve-220-96.json	Ok	1.0	0.54 ± 0.05	
	Scurve-260-96.json	Ok	1.0	0.51 ± 0.05	
	Scurve-300-96.json	Ok	1.0	0.66 ± 0.09	
	Scurve-340-96.json	Ok	1.0	0.51 ± 0.06	
	Scurve-380-96.json	Ok	1.0	0.55 ± 0.05	
	sCurve-0.json	Ok	49	1.0 ± 0.1	
	ThresholdDist-0.json	Ok	4.6	0.56 ± 0.06	
	ThresholdMap-0.json	Ok	2,200	4.3 ± 0.1	
	NoiseDist-0.json	Ok	2.3	0.42 ± 0.04	
	Chi2Map-0.json	Ok	2,300	4.5 ± 0.1	
	StatusMap-0.json	Ok	1,300	2.8 ± 0.1	
	StatusDist-0.json	Ok	0.49	0.48 ± 0.04	
	NoiseMap-0.json	Ok	2,200	4.0 ± 0.2	
	Chi2Dist-0.json	Ok	1.1	0.50 ± 0.04	
	TimePerFitDist-0.json	Ok	3.1	0.56 ± 0.12	
	ctrlCfg_ctrlCfg.json	Ok	0.46	0.49 ± 0.05	
	dbCfg_dbCfg.json	Ok	0.60	0.52 ± 0.06	

表 7.8: アップロード処理における結果、設定値ファイル添付実行結果と処理時間。図 7.10 より、読み出し試験に対して出力される各ファイルのアップロード実行結果、データ容量と処理時間をまとめた。ここで扱うファイルサイズの合計は 94 MB である。図よりファイルのデータ容量が大きいほど処理時間が長いことが分かる。`std.thresholdscan` のようにファイル数が多い項目の場合、合計して大きい処理時間を要することが分かる。全項目において読み出しの設定ファイルにあたる `beforeCfg.chipCfg.json`, `afterCfg.chipCfg.json` のアップロードは、中央データベースの容量制限により失敗していることが分かる。

	siteCfg_siteCfg.json	Ok	0.033	0.54 ± 0.07	
	userCfg-userCfg.json	Ok	0.14	0.60 ± 0.07	
	scanCfg_std_thresholdscan.json	Ok	2.2	0.46 ± 0.03	
	beforeCfg.chipCfg.json	Error	7,200	3.2 ± 0.2	
	afterCfg.chipCfg.json	Error	7,200	3.5 ± 0.1	
std_totscan	MeanTotMap-0.json	Ok	1,900	4.8 ± 0.1	20±0
	SigmaTotMap-0.json	Ok	2,200	4.1 ± 0.2	
	MeanTotDist-0.json	Ok	0.59	0.54 ± 0.07	
	SigmaTotDist-0.json	Ok	1.8	0.47 ± 0.03	
	L1Dist.json	Ok	0.59	0.60 ± 0.08	
	ctrlCfg_ctrlCfg.json	Ok	0.46	0.47 ± 0.03	
	dbCfg_dbCfg.json	Ok	0.60	0.67 ± 0.24	
	siteCfg_siteCfg.json	Ok	0.033	0.59 ± 0.10	
	userCfg-userCfg.json	Ok	0.14	0.56 ± 0.05	
	scanCfg_std_totscan.json	Ok	2.0	0.59 ± 0.10	
	beforeCfg.chipCfg.json	Error	7,200	3.0 ± 0.1	
	afterCfg.chipCfg.json	Error	7,200	3.9 ± 0.3	
std_noisescan	Occupancy.json	Ok	1,300	4.0 ± 0.1	18±0
	NoiseOccupancy.json	Ok	1,300	2.5 ± 0.1	
	NoiseMask.json	Ok	1,300	2.4 ± 0.1	
	ctrlCfg_ctrlCfg.json	Ok	0.46	0.57 ± 0.08	
	dbCfg_dbCfg.json	Ok	0.60	0.55 ± 0.06	
	siteCfg_siteCfg.json	Ok	0.033	0.53 ± 0.04	
	userCfg-userCfg.json	Ok	0.14	0.61 ± 0.07	
	scanCfg_std_noisescan.json	Ok	1.4	0.53 ± 0.05	
	beforeCfg.chipCfg.json	Error	7,200	2.8 ± 0.2	
	afterCfg.chipCfg.json	Error	7,200	3.5 ± 0.1	

生産時におけるアップロード処理時間の見積もり

Quad モジュールにおける読み出し試験結果アップロード処理合計時間の見積もりを行った。上述した測定は SCC であるため FE チップに対する処理(処理 3、4、5)は 1 回であるため、Quad モジュールの場合は、図 7.10 を用いて以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} \text{FE チップ処理} &: \left\{ (2.2 + 68 + 44) \pm \sqrt{(0.1)^2 + 3^2 + 0^2} \right\} \times 4 \\ &= (4.6 \pm 0.1) \times 10^2 [\text{sec}] \end{aligned} \quad (7.6)$$

$$\begin{aligned} \text{合計} &: (4.6 \pm 0.1) \times 10^2 [\text{sec}] + (14 \pm 0) + (0.88 \pm 0.14) + (1.8 \pm 0.1) \\ &= 7.9 \pm 0.1 [\text{min}] \end{aligned} \quad (7.7)$$

モジュール読み出し試験 1 回に対して、約 8 分程度かかる見積もりとなった。円滑なモジュール組み立て、データ管理を行うために同期は速やかに行うことが要求されること、外観検査や平坦性測定のように他の品質試験も同期する必要があることを考慮し、処理時間の改善を試みた。詳細を以下で示す。

7.3.4 改善策

表 7.8 より、データ容量の大きいものにアップロード時間がかかっていることがわかる。また添付処理を行うオフセットがあることから、`std_thresholdscan` のように各容量が大きくなくてもファイル数が多いものにはアップロード時間が合計して多くかかってしまうことがわかる。

これらのことと 4 MB 以上の容量を持つファイル添付処理の失敗をなくすために、次のような改善策を考えた。

- 各試験項目に対する結果データ、設定ファイルをそれぞれ Zip ファイルに統合し、圧縮後にアップロードを行う。

こうすることで、アップロードするファイルの容量、数共に削減することができる。圧縮率によってはアップロード処理の失敗もなくすことができると考えた。

これを踏まえアップロードツールを改良し、再び各ファイルの添付処理にかかる時間を測定した。SCC を用いた 5 つの読み出し試験項目のアップロードにかかる合計処理時間は以下のようになつた。改善前は $(1.3 \pm 0.0) \times 10^2 [\text{sec}]$ (式 7.5) であった。

$$36 \pm 1 [\text{sec}] \quad (7.8)$$

また各ファイル添付の処理結果、時間を表 7.9 に示す。全てのファイルのアップロードに成功した。

表 7.9: アップロード処理改善後における結果、設定値ファイル添付実行結果と処理時間。各試験結果毎に結果ファイル、設定値ファイルを Zip ファイルにまとめアップロードする処理とした。これにより、ファイル数、容量の削減に成功し、アップロード時間が改善した。この時、ファイル容量の合計は 3.9 MB となった。全てのファイルのアップロードに成功していることが分かる。

読み出し項目	ファイル名	実行結果	容量 [KB]	処理時間 [sec]	全体 [sec]
<code>std_digitalscan</code>	<code>std_digitalscan_datafiles.zip</code>	Ok	10	0.77 ± 0.18	1.9 ± 0.2
	<code>std_digitalscan_configfiles.zip</code>	Ok	56	1.1 ± 0.1	
<code>std_analogscan</code>	<code>std_analogscan_datafiles.zip</code>	Ok	46	1.0 ± 0.2	2.2 ± 0.3
	<code>std_analogscan_configfiles.zip</code>	Ok	58	1.2 ± 0.2	
<code>std_thresholdscan</code>	<code>std_thresholdscan_datafiles.zip</code>	Ok	1,500	2.6 ± 0.1	3.5 ± 0.1
	<code>std_thresholdscan_configfiles.zip</code>	Ok	190	0.86 ± 0.08	
<code>std_totscan</code>	<code>std_totscan_datafiles.zip</code>	Ok	730	1.7 ± 0.2	2.5 ± 0.2
	<code>std_totscan_configfiles.zip</code>	Ok	190	0.83 ± 0.15	
<code>std_noisescan</code>	<code>std_noisescan_datafiles.zip</code>	Ok	19	0.56 ± 0.07	1.7 ± 0.1
	<code>std_noisescan_configfiles.zip</code>	Ok	190	1.1 ± 0.1	

改善後における処理時間の見積もり

上記の見積もりと同様に、改善後のツールにおけるアップロード時間の見積もりを行った。表 7.9 より、結果ファイル、設定値ファイルの添付(処理 4、処理 5)にかかる時間はそれぞれ合計で 6.7 ± 1.1 、 $5.1 \pm 0.3[\text{sec}]$ となった。中央データベースにおける FE チップの結果生成(処理 3)にかかる時間は改善前と変わらないとし、図 7.10 より $2.2 \pm 0.1[\text{sec}]$ とすると、4 枚の FE チップにかかる処理時間は合計で以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} & \left\{ (2.2 + 6.7 + 5.1) \pm \sqrt{(0.1)^2 + (1.1)^2 + (0.3)^2} \right\} \times 4 \\ & = 56 \pm 5[\text{sec}] \end{aligned} \quad (7.9)$$

(7.10)

その他の処理も合わせて全体に要する処理時間は以下のようになる。

$$\begin{aligned} & (56 \pm 5)[\text{sec}] + (14 \pm 0) + (0.88 \pm 0.14) + (1.8 \pm 0.1) \\ & = 1.2 \pm 0.1[\text{min}] \end{aligned} \quad (7.11)$$

約 1 分でアップロードを完了できる見積もりとなった。改善前は $7.9 \pm 0.1[\text{min}]$ (式 7.7) であり、約 15% の処理時間となった。現在は改善後の方針を用いたツールを提供している。

その他の項目における処理時間

改善策として最も処理時間を要していたファイル添付に関しての検討を行なったが、以下のその他の処理における処理時間について述べる。

1. ローカルデータベース内部処理.
2. 中央データベースへの接続、認証処理.
3. ファイル添付以外の処理に関して、中央データベース API 使用.
4. ネットワーク速度の改善.

項目 1 に関して、読み出し試験におけるローカルデータベースの内部構造は世界的に使われているものである。内部構造の変更をすることなく改善を図りたいという開発方針から、この項目に関して本研究では処理時間改善の検討をしなかった。また図 7.10 よりローカルデータベース内部処理は十分に小さいものであったため、検討の必要がないと考えた。

項目 2 に関して、中央データベースへの接続、認証処理は中央データベースの API 及び中央データベースの内部構造によるものである。改善には、これらの変更を検討する必要があるが本研究では開発を行なっていない範囲である。

項目 3 に関して、アップロード機能ではファイル添付以外に、以下の処理の際に中央データベースの API を使用している。

- モジュール情報の取得.
- 結果ページの作成(モジュールと FE チップ).

これらの処理は必要であるため、API の使用回数の減らし処理時間を削減することは難しい。

項目4に関して、中央データベースと通信する全ての処理はネットワーク速度に依存していると考えられる(付録E)。サーバーが置かれている位置やネットワーク環境の改善により、本ツールの処理速度も改善すると考えられる。

7.4 本章のまとめ

本章では中央データベースとローカルデータベースの同期ツールに関する調査、開発の詳細と処理時間測定について述べた。

同期ツールの調査に関して、KEK、LBNL、CERNのサーバーを用いて中央データベースAPIの使用にかかる処理時間測定を行なった。どの場合においてもKEKのサーバーにおける処理時間が長かった。さらに、KEK、LBNLのサーバーを用いて、ネットワークの通信時間の変化を調べるために中央データベース通信時間測定を1週間通して行なった。時間帯における通信時間の大きな変化は見られず、どの時間帯においてもKEKのサーバーの方が遅かった。以上よりツールの処理時間に関して、KEKのサーバーで有用性を検討した。

同期ツール開発の詳細と処理時間測定に関して、同期ツールとしてモジュール情報のダウンロード、読み出し試験結果のアップロード機能を開発した。

モジュール情報ダウンロード機能に関して、KEKで実際に作られた6つのモジュールを中央データベースに登録し、ダウンロード機能が正常に動作することを確認した。この際に処理時間を測定し、モジュール1つあたり平均 $4.0 \pm 0.4[\text{sec}]$ であった。処理時間の改善策をいくつか考案し、それについての見積もりを行なった。

読み出し試験結果アップロード機能に関して、5章で行なったデモンストレーションの読み出し試験結果を用いて処理時間測定とQuadモジュールにおける見積もりを行なった。初めは処理時間の見積もり値が $7.9 \pm 0.1[\text{min}]$ となった。処理時間の詳細を調査したところファイル添付処理に大きく時間を要しており、ファイル容量、ファイル数に依存していた。そのため、添付ファイルを1つのZipファイルにまとめ圧縮し添付を行うことで処理時間の改善を図った。圧縮前後のファイル容量は94、3.9[MB/FEチップ]となった。処理時間を測定し、Quadモジュールについて見積もりを行なったところ $1.2 \pm 0.1[\text{min}]$ となり処理時間の改善に成功した。またファイル添付以外の処理における処理時間について述べた。

第8章

まとめ

8.1 本論文のまとめ

HL-LHCに向けて ATLAS 内部飛跡検出器の総入れ替えを予定しており、これに向けてピクセルモジュールを世界で約 10,000 台生産する予定である。各モジュールに対して品質試験を行い、全てのモジュール及び品質試験の結果は中央データベースに保存する。

本研究では、この生産及び品質試験に向けてデータベースシステムの構築を行った。各組み立て機関にてデータ管理をするローカルデータベースを確立し、品質試験結果検索や中央データベースとの同期機能など、生産時に必要となる諸ツールの開発を行った。

開発した諸ツールを含め、生産において必要な機能の確認を行った。本番を想定したソフトウェア、ハードウェアのセットアップと各ツールの処理を実行し、機能が使用可能であることを確認した。

主な開発項目の 1 つ目として品質試験検索機能を述べた。開発当初はデータベース内部構造により試験結果数 n に対して処理時間が $O(n^2)$ となり、運用時における見積もりが $(9.8 \pm 0) \times 10^3[\text{sec}]$ となってしまい、実用に向かない機能であった。MongoDB 内に新しいコレクションを設け検索に必要な情報を予めドキュメントに保持しておくことにより、処理時間の改善に成功した。実際に処理時間の測定を行い、データ数の増加に対しても検索機能が不都合なく使えることを確認した。本番を想定した見積もりを行い、84,000 件のデータ数に対して $2.6 \pm 0.1[\text{sec}]$ で処理が実行できる見込みであり、生産時において有用な機能であることを確認した。

2 つ目に中央データベースとローカルデータベースの同期ツールを開発した。世界的に使われるツールであり、全ての組み立て機関でこのツールをサポートするために中央データベースへの通信処理時間調査を KEK、LBNL、CERN のサーバーを用いて行った。KEK のサーバーを用いた場合に最も時間がかかるなどを確認した。

同期ツールに関して、モジュール情報のダウンロード、読み出し試験結果のアップロード機能を開発した。モジュール情報のダウンロード機能に関して、KEK サーバーを用いてその処理時間測定を行い、Quad モジュール 1 つあたり $4.0 \pm 0.4[\text{sec}]$ の処理時間がかかるることを確認した。処理の詳細を調査すると、モジュールや構成部品の情報取得するために行っている中央データベース API の使用に時間がかかっていた。処理時間の改善策をいくつか考案し、それぞれについて見積もりを行った。読み出し試験結果のアップロード機能に関して、開発当初は読み出し試験結果 5 項目のアップロードにおける処理時間の見積もり値が $7.9 \pm 0.1[\text{min}]$ であった。処理時間改善に向けて処理の詳細を調査したところ、結果ファイルの添付処理に大きく時間が要していることが分かった。ファイル添付についての詳細を調べると、添付処理時間がファイル数とファイル容量に依存していた。このことから結果ファイルを ZIP ファ

イルにまとめ、圧縮しアップロードを行うことで処理時間の改善を図った。ここで圧縮前後のファイル容量は、それぞれ 94、3.9[MB/FE チップ] となった。結果として処理時間の改善に成功し、その見積もり値が $1.2 \pm 0.1[\text{min}]$ となった。

8.2 現状と今後の課題

8.2.1 ソフトウェアリリースとユーザサポート

本論文で述べたツールの他に、読み出し試験コマンド統括ソフト、品質試験結果アップロード用ソフトなどの開発もチームとして行っている。全てのソフトウェアを含めて、品質試験のデータ管理を達成するようなアプリケーションスイートを目指している。2020 年 12 月 9 日にファーストバージョンのリリースを行い、いくつかの機関で全体のシステム及びソフトウェアが使われている現状である。

また CERN で行ったチュートリアルを経て、世界的に機能普及が進んでいる。そのためユーザサポートとしてソフトウェア使用のためのドキュメント [44] の作成、整備も行っている。開発者の連絡先やローカルデータベース専用掲示板へのリンクもドキュメントに記している。何か問題が生じた時などに簡単に問い合わせができる仕組みを整えている。

8.2.2 開発課題

本研究では検索機能や同期機能など、読み出し試験を対象とした機能を重点的に開発した。ローカルデータベース開発は、読み出し試験の結果を管理したいという要求から始まり、現在はそれ以外の品質試験も含め、全ての試験結果や組み立て工程の管理も目標としている。今後の開発課題として以下の機能をあげる。

- 読み出し試験以外（外観検査、平坦性測定等）の結果同期機能.
- 中央データベースからローカルデータベースへ品質試験結果の同期.
- 品質試験結果解析とモジュール選別機能.
- 組み立て工程管理を世界的にサポート.

最後の項目に関して、モジュールの組み立て工程は各機関ごとに異なるため、全ての現場における工程を調査しそれをサポートするシステムを実装する必要がある。例えば、日本では「ペアモジュール・フレキシブル基板貼り付け」工程の後に、モジュール冷却のための構造である「セル搭載」を行う予定であり、これは他の組み立て機関とは異なる。各地域における柔軟な生産を許しているため、組み立て工程は世界的に細かく統一されていない。データベースシステムでは多様な組み立て工程に対応できるシステムとする必要がある。

柔軟な組み立て工程のサポートに向けて、中央データベースには選択可能な組み立て工程を定義する機能が存在し、これを用いることを考えている。そのイメージを図 8.1 に示す。

以下の開発項目をあげる。

- 中央データベースにおいて選択可能な工程定義機能を使い、全ての組み立て機関における工程をサポートする構造を設計、実装.
- 本研究で開発した同期ツールを拡張、ローカルデータベース上にも中央データベースと同様の組み立て工程構造を保持.

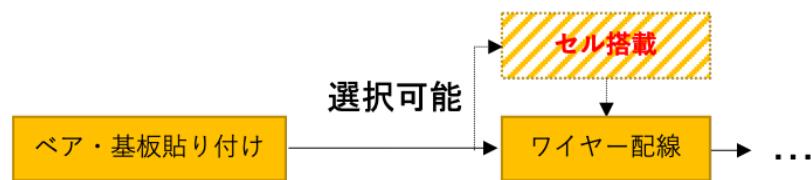


図 8.1 中央データベースにおける選択可能な組み立て工程のイメージ。図に示すように中央データベースでは選択可能な組み立て工程を定義することができる。図ではセル搭載が選択可能となっていて、ペア・基板貼り付け工程の後に、どちらの工程に進むのかを選択できる。この機能を用いて世界的に多様な組み立て工程をサポートすることを考えている。

これらを達成することにより、全ての機関における組み立て工程情報の管理ができるようになると考えている。

付録 A

シリコン検出器の原理

A.1 半導体

この説では半導体 [15] について述べる。固体は、絶縁体、半導体、導体の 3 つに大別できる。物質の電気伝導度に関して、絶縁体は非常に低い値 ($10^{-18} \sim 10^{-8}$ S/cm)、導体は高い値 ($10^4 \sim 10^6$ S/cm) を持つ。半導体の電気伝導度はこれらの中間であり、温度、光、磁界および微量の不純物に対し非常に敏感である。この特徴のために半導体はエレクトロニクスにおける最も重要な材料の 1 つになっている。半導体は元素半導体と化合物半導体に分けられ、多くの物質がその候補となる。元素半導体の中で代表的なものとして Si があげられ、ATLAS ピクセル検出器に使われる半導体は Si がベースとなっている。不純物が入っていない、全ての原子が Si の半導体を真性半導体と呼ぶ。真性半導体中の Si は隣り合う 4 つの Si と共有結合を構成し、結晶を作る。(図 A.1)

真性半導体に対し、As などの最外殻電子を 5 つもつ原子を不純物としてドープしたものを n 型半導体、B などの 3 つのものをドープしたものを p 型半導体と呼ぶ。それぞれキャリアとして電子、ホールを持つことになり、キャリア移動の特性を組み合わせて様々なデバイスに応用することができる。

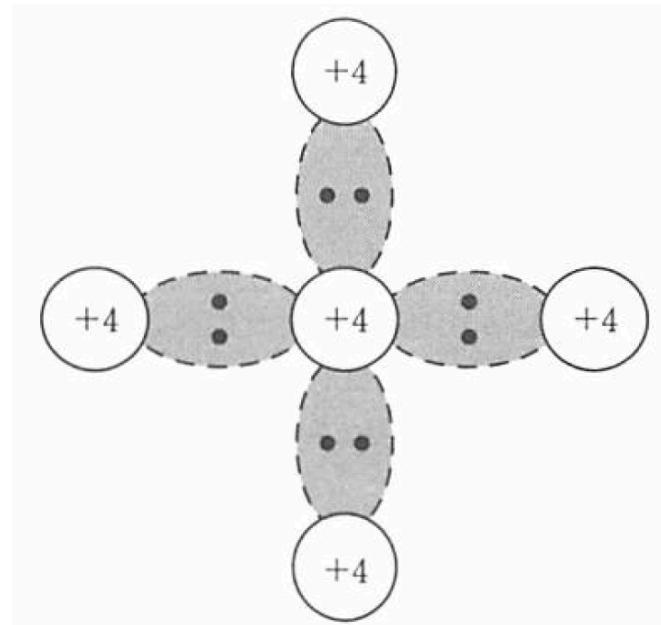


図 A.1 真性半導体中のシリコン [15]。

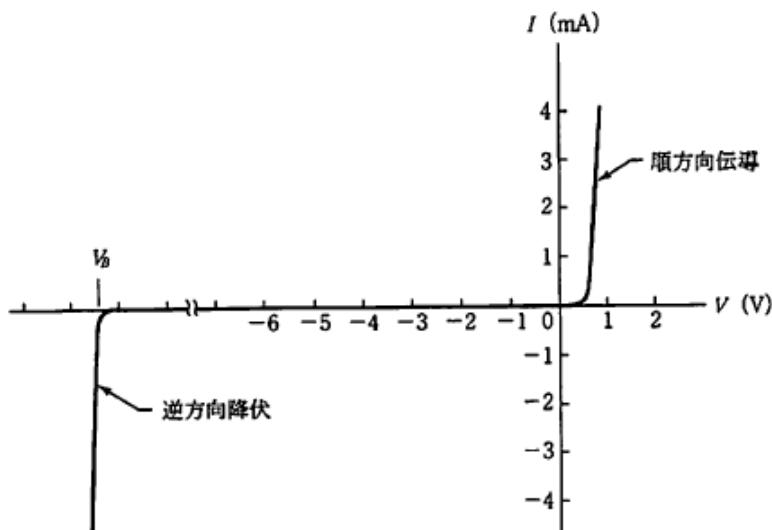


図 A.2 pn 接合の電流 - 電圧特性 [15]。



図 A.3 空乏層 [15]。

A.1.1 pn 接合

n 型半導体と p 型半導体を接合し、その接合部を pn 接合と呼ぶ。この接合は各種半導体素子で様々な形で応用されており、ピクセル検出器にも用いられている。

pn 接合の最も重要な特徴は特定の方向にだけ電流が流れやすい整流性である。図 A.2 に示すように正電圧をかけると電流は急速に増加する。逆方向にかけた場合、始めのうちは電流はほとんど流れない。ある臨界電圧に達すると電流は急激に増大する。

逆方向電圧をかけた場合、図 A.3 に示すように pn 接合付近はキャリアが存在しない空乏層領域が形成される。この時、それぞれの半導体のエネルギー準位に差が生じている状態となっている。印加電圧 V と空乏層幅 W は以下のような関係がある。

$$W \propto \sqrt{V} \quad (\text{A.1})$$

A.2 検出原理

荷電粒子が物質中を通過するとき、以下の Bethe-Bloch の公式によってエネルギーを損失する [16]。

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 + \dots \right) \quad (\text{A.2})$$

$\frac{dE}{dx}$: 荷電粒子のエネルギー損失量 [$\text{eV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^2$].

K : $4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.307075 [\text{MeVcm}^2]$.

z : 荷電粒子の電荷量.

Z : 物質の原子番号 (Si 14).

A : 物質の原子量 (Si 28).

$m_e c^2$: 電子の静止エネルギー (0.511 MeV).

β : 光速を 1 とした入射粒子の速度.

γ : ローレンツ因子 $1/\sqrt{1 - \beta^2}$.

I : 励起エネルギーの期待値 (Si 137eV).

(A.3)

また T_{\max} は質量 M の入射粒子による 1 つの電子への最大運動エネルギー移行であり、以下の式で書ける。

$$T_{\max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e / M + (m_e / M)^2} \quad (\text{A.4})$$

荷電粒子が半導体を通過したとき、そのエネルギー損失に応じて電子・ホール対が生成する。

ここで荷電粒子がセンサーを通過した時における電気信号の強さを計算する。例として、大きい速度 ($\beta\gamma \gg 1$) を持つ荷電粒子が、 $300 \mu\text{m}$ の厚さを持つシリコン半導体を通過した時の生成キャリア数及び信号強度を計算する。

荷電粒子の速度が十分に早い場合、式 A.2 は物質の密度 ρ を用いて以下のように近似できる [45]。

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = 1 - 2\rho [\text{MeV/cm}] \quad (\text{A.5})$$

シリコンの密度を 2.33 g/cm^3 、シリコンにおける 1 キャリア対生成に必要な平均電離エネルギー 3.62 eV より、 $300 \mu\text{m}$ の厚さを持つシリコン半導体を通過した時の生成キャリア数は以下のように計算できる。

$$1 - 2 \times 2.33 \times (3 \times 10^4) \times 1/3.62 \simeq 20,000 - 39,000 \quad (\text{A.6})$$

素電荷 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ より、信号強度は以下になる。

$$20,000 - 39,000 \times 1.6 \times 10^{-19} \simeq (3.2 - 5.1) \times 10^{-15} [\text{C}] \quad (\text{A.7})$$

付録 B

RD53A とフレキシブル基板

RD53A の各 Front-end が持つアナログ回路を図 B.1 に示す。

B.1 アナログ回路とデジタル回路

B.2 試験用電荷入射の方法

RD53A の各ピクセルが持つ試験用電荷入射回路の簡略図を図 B.3 に示す。

B.3 RD53A のデータフォーマット

RD53A のデータフォーマットの模式図を図 B.4 に示す。

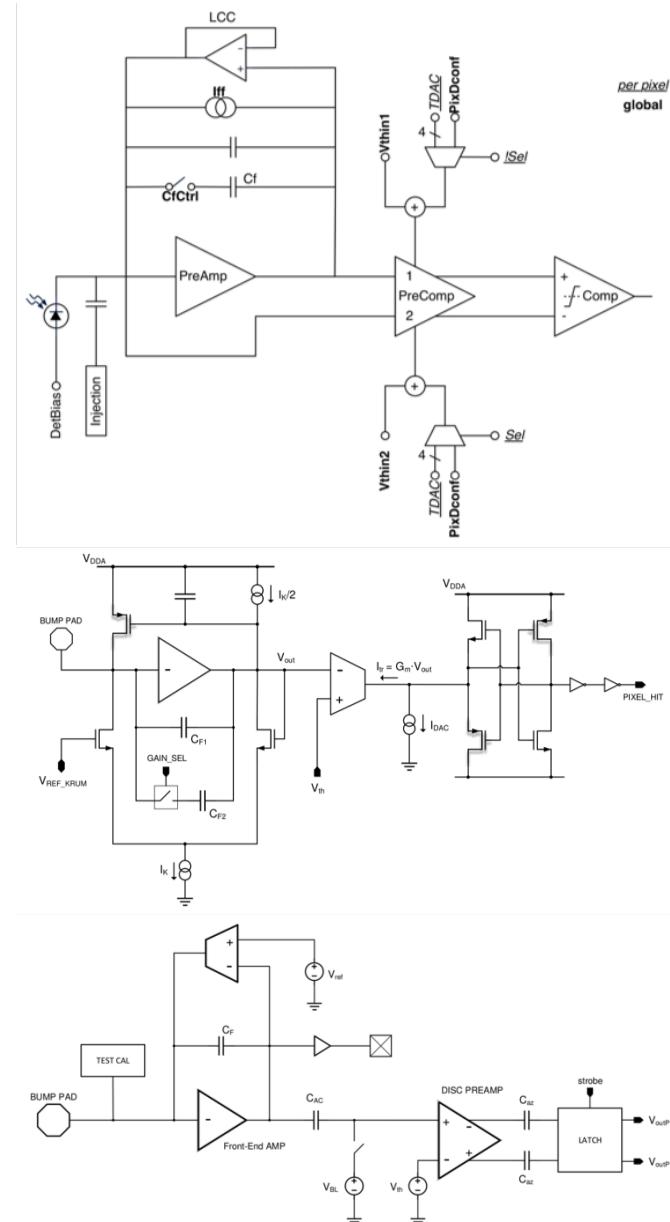


図 B.1 アナログ回路 [15]。上から順に Differential, Linear, Synchronous フロントエンドが持つアナログ回路図である。

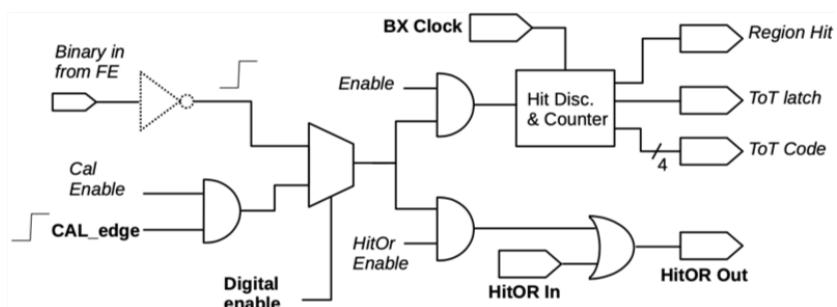


図 B.2 デジタル回路 [15]。

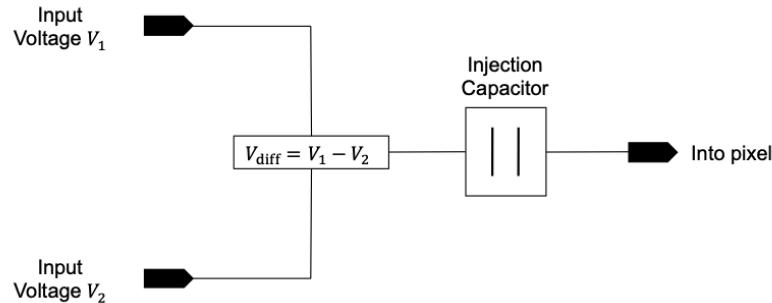


図 B.3 RD53A の各ピクセルが持つ試験用電荷入射回路の簡略図 [47]。図のように 2 つの電位を入力し、その差分の電圧を回路内のコンデンサにかける。これを開放することで、電荷をピクセル回路内に入力する。

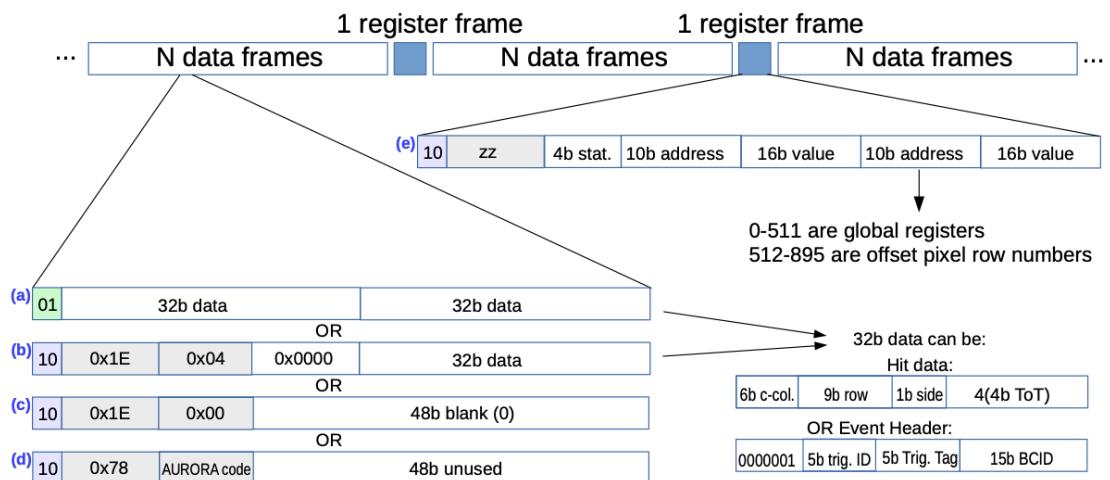


図 B.4 RD53A におけるデータフォーマットのイメージ [15]。RD53A のデータフォーマットは図のように、N 個の data frame と 1 個の register frame から成る。特にデータフレームに関しては header 部と hit data 部で構成され、header 部に trigger の情報が入っている。クロック信号や外部トリガーで送った情報はここに格納され、そのトリガーに応じてデータを取得する。

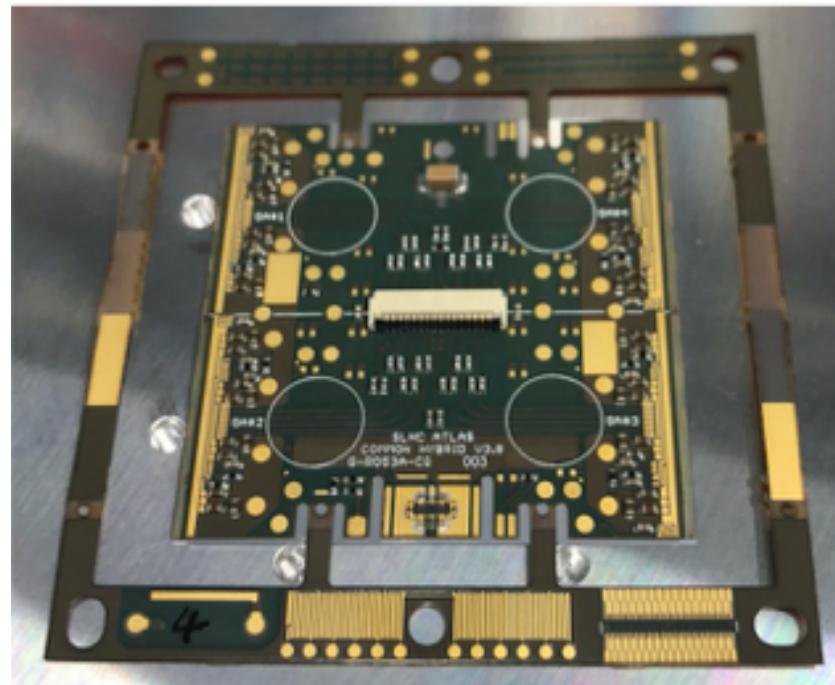


図 B.5 フレキシブル基板。

B.4 フレキシブル基板

フレキシブル基板の写真を図 B.5 に示す。

付録 C

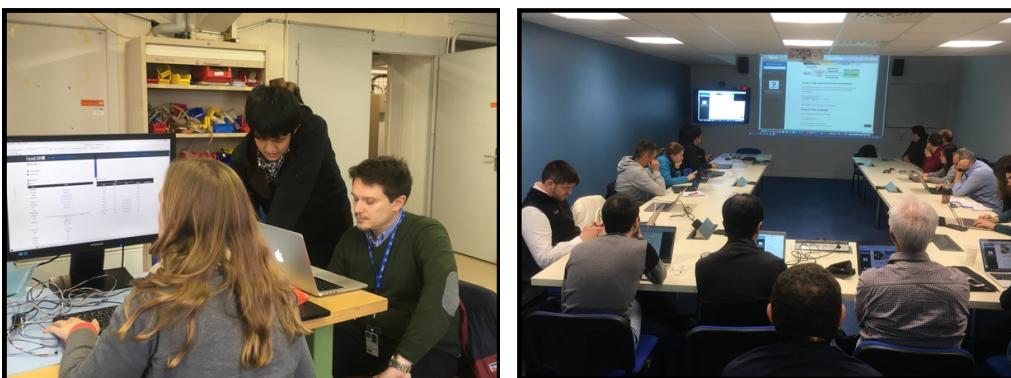
ローカルデータベースのチュートリアル と普及状況

ローカルデータベースの機能の普及を目的として、2020年2月にCERNにてシステムのチュートリアルを行った。国際学会 (ITk Upgrade week) が開かれていた期間である2020年2月3日から2月7日にかけて行い、世界的に各機関の研究者がCERNに集まっている機会を利用した。CERNだけでなく各国のローカルデータベースユーザに対して説明をすることができた。このチュートリアルは以下のような2つのセッションに分けて行った。

- 参加者が実際にサーバーの設定、各ソフトウェアのインストールを行いながら機能を実践するセッション (2月3日から6日まで)。
- 参加者の前で実際に機能を実践し、システムや使い方に対して議論を行うセッション (2月7日)。

それぞれのセッションの様子を図C.1に示す。数多くの議論を行い、有益なフィードバックを得ることができた。また品質試験の流れにおいて、一連の機能確認をすることができた。

これを経て2020年11月現在、ローカルデータベースは世界18箇所にて導入され、試験運用が開始している。将来的には全組み立て機関で使うことが決定しており、それに向けたシステム開発、サポートが



図C.1 ローカルデータベースシステムチュートリアルの様子。2020年2月にCERNでローカルデータベースシステムのチュートリアルを行った。参加者が実際にシステムの設置、機能実行を行うハンズオンセッション(左図)と、参加者の前で実際に機能の動作をみせ、議論を行うハンズオフセッション(右図)に分けて行った。システムに有益なフィードバックと共に、システムの機能普及に成功した。

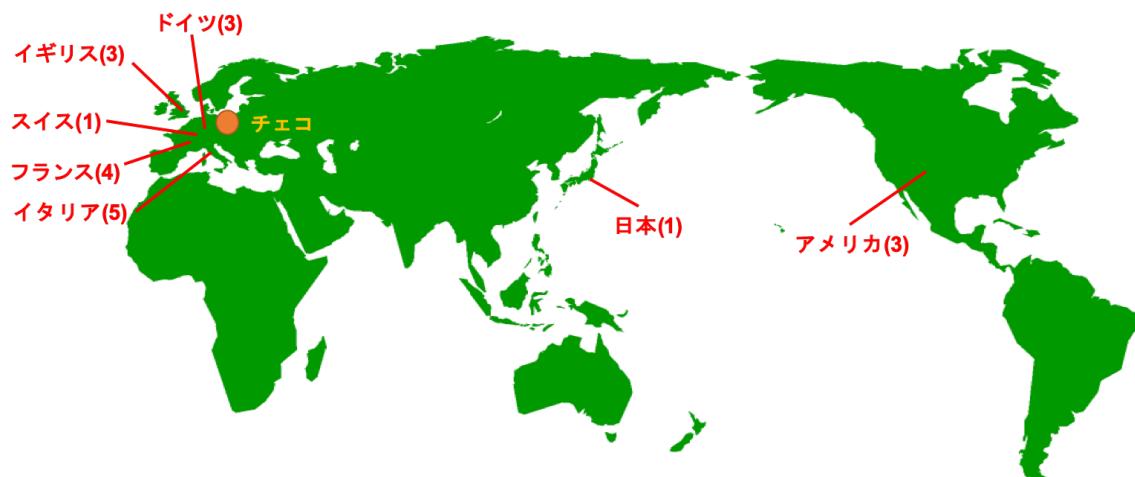


図 C.2 ローカルデータベースシステム導入及び試運転場所。赤文字は設置している地域、括弧内の数字はその地域におけるシステム導入場所の数を示している。2020 年 11 月現在、ローカルデータベースシステムは世界 18 の機関で試験運転がなされている。日本を除いてその多くはヨーロッパとアメリカに位置していることが分かる。

必要となっている状況である。ローカルデータベースについて、導入及び試験運用を行っている機関を以下に示す。また世界地図を C.2 に示す。

- 高エネルギー加速器研究機構 (KEK), 日本
- 欧州原子核研究機構 (CERN), スイス
- University of Liverpool, イギリス
- University of Oxford, イギリス
- University of Glasgow, イギリス
- Paris-Saclay University, フランス
- パリ第 6 大学, フランス
- フランス国立科学研究中心, フランス
- University of Grenoble, フランス
- University of Gottingen, ドイツ
- University of Siegen, ドイツ
- University of Genoa, イタリア
- University of Salento, イタリア
- University of Milan, イタリア
- University of Udine, イタリア
- University of Trento, イタリア
- University of Oklahoma, アメリカ
- Argonne National Laboratory, アメリカ
- Lawrence Berkeley National Laboratory(LBL), アメリカ

付録 D

モジュール生産状況の解析

データベースシステムを使って、モジュール生産状況の解析を行うことができる。モジュールの組み立て工程は各組み立て機関のローカルデータベース上に記録され、組み立て工程ごとに中央データベースへ同期される。そのため全モジュールの現在工程を中央データベース上で取得できることができ、この情報を用いて世界的な生産状況の解析を行うことができる。現在は生産は行われていないが、想定している解析結果のイメージを図 D.1 に示す。

生産数や生産レートのモニタリングを行うことで、今後の生産計画や問題解決に役立てることが可能である。

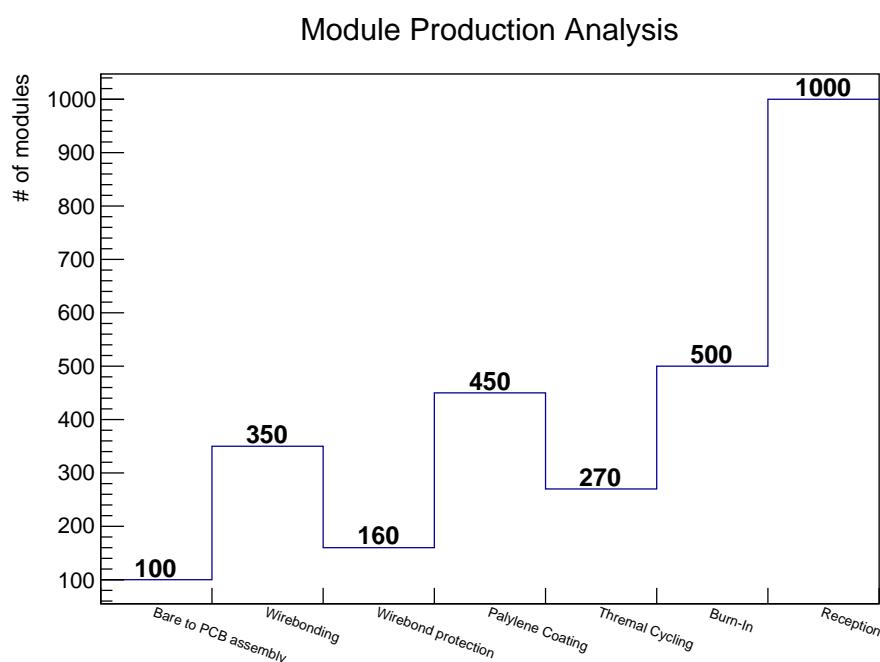


図 D.1 生産時のモジュール組み立て状況解析の例。ローカルデータベースにて組み立て工程は管理され、工程毎に中央データベースに同期されるため、生産時には全モジュールの現工程を中央データベースで取得できる。図の例のように各段階におけるモジュール数を見ることで生産状況の確認ができる。さらにある期間ごとに工程を取得することで生産レートなども計算することができ、今後の生産計画やモジュール選別の参考とすることができます。

付録 E

ファイル送信時におけるデータ容量と処理時間の考察

始めに、処理速度遅延の原因として以下をあげる。

- サーバーの読み書き速度.
- サーバーのファイル転送アルゴリズム.
- サーバーのファイル転送時におけるパケットサイズ.
- サーバー間のネットワーク上の距離.
- サーバー間ネットワークの処理性能.

KEK と LBNL に設置されているサーバーにおいて、中央データベースへのファイル送信処理時間に差が出る理由について考察する。

ここで、ファイル送信時におけるデータ容量と処理時間の関係は、線形性を示さない。図 E.1 は KEK から LBNL のサーバーに scp コマンドを用いてファイル送信を行い、データ容量と処理時間の関係を取得したものである。赤線が線形フィットであるが、測定点は優位にずれている。これは TCP 通信においてパケットの送信に輻輳制御 [48] と呼ばれる技術が使われており、データ送信量を変化させながら情報通信を行っているためである。

scp によるファイル送信を以下の 2 つの場合に対して行い、ファイル容量と処理時間の関係を取得した。

1. KEK から LBNL.
2. LBNL から KEK.

結果を図 E.2 に示す。ここで処理時間に差が生まれる原因について調査したものを以下に示す。

- 読み書き速度を測定したところ同程度であった。
- 輻輳制御アルゴリズムは Cubic をどちらも使用していた。
- パケットサイズは変わらなかった。
- ping による応答時間確認は同程度であった (111 msec)。

よって各サーバが置かれているローカルネットワークの性能に差があると考えた。一般的には上りより下りの方が太いと考えると、KEK ローカルの上りネットワークの性能が、LBNL ローカルの上りネットワークと比べて悪いと考えられる。これにより、ファイル送信時間に差が生まれている。

次に、下の 2 つの場合に対して行い、ファイル容量と処理時間の関係を取得した。

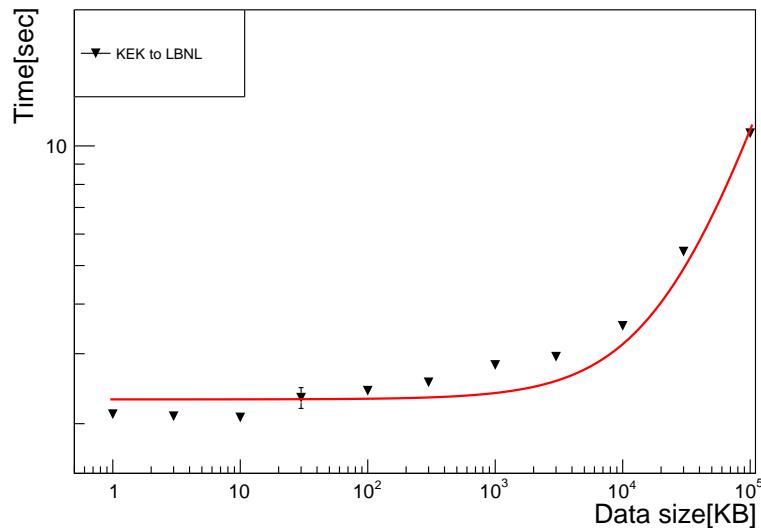


図 E.1 scp 送信におけるファイルサイズと処理時間の関係。横軸はファイルサイズ、縦軸は時間を示している。赤線は線形フィットを示している。測定点はフィット関数から優位に離れており、scp 送信においてファイルサイズと処理時間は線形性を示さないことが分かる。

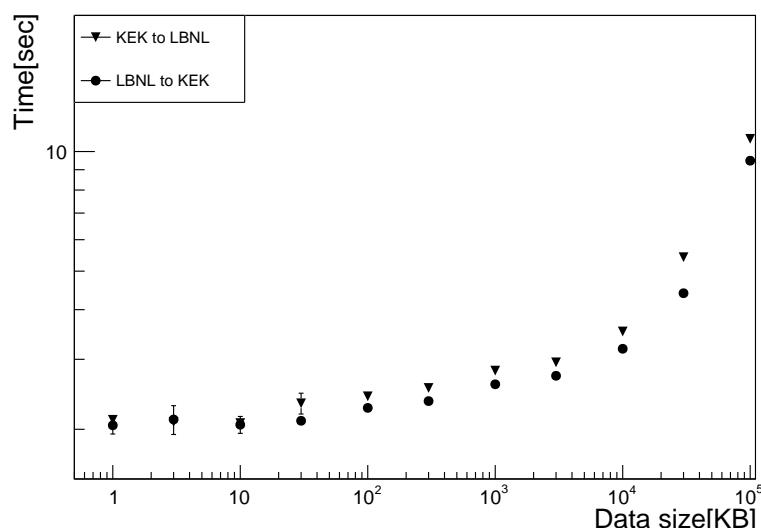


図 E.2 KEK、LBNL 間のファイル送信におけるファイルサイズと処理時間の関係。横軸はファイルサイズ、縦軸は時間を示している。三角は KEK から LBNL、丸は LBNL から KEK に送信した場合のものである。比較して KEK から LBNL へのファイル送信の方が時間がかかる。

1. KEK から CERN(Lxplus).
2. LBNL から CERN(Lxplus).

結果を図 E.3 に示す。KEK ローカルの上りネットワークは細いため、処理時間に差が生まれる。加えてこの場合はサーバ間の距離による遅延も含まれていると考えられる。ping による応答時間が測定 1 では 170 msec 程度なのに対し、測定 2 は 150 msec 程度であった。これも処理速度遅延に影響していると考えられる。

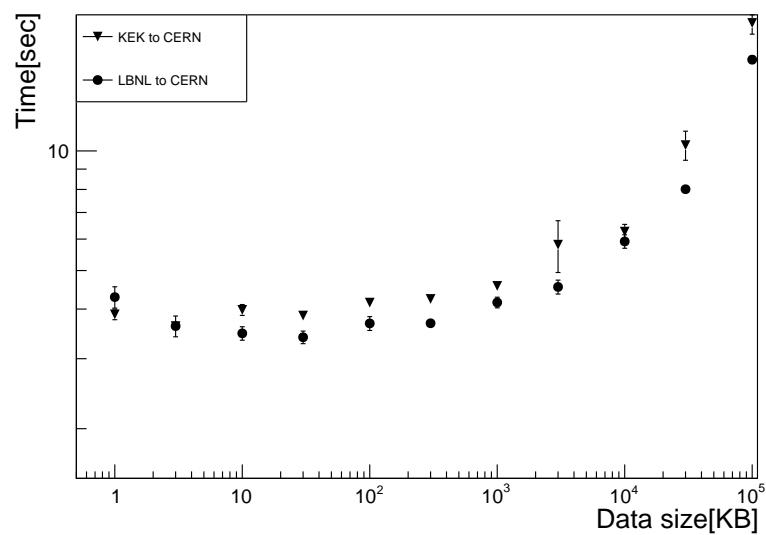


図 E.3 KEK、LBNL と CERN 間のファイル送信におけるファイルサイズと処理時間の関係。横軸はファイルサイズ、縦軸は時間を示している。三角は KEK から CERN、丸は LBNL から CERN に送信した場合のものである。比較して KEK から CERN へのファイル送信の方が時間がかかることがある。

CERN と中央データベースが地理的に近い距離であることを考慮し、上述したことをまとめると KEK と LBNL の間で処理時間の差が生まれる要因は以下であると考えた。

- ローカルネットワークの性能.
- ネットワーク上の距離差.

参考文献

- [1] “現代素粒子物理実験的観点からみる標準理論”
末包文彦・久世正弘・白井淳平・湯田春雄, 森北出版株式会社, 2016 年 12 月第 1 版第 1 刷発行.
- [2] “Quarks and Leptons”.
Francis Halzen, Alan D.Martin. John Wiley & Sons Inc. 1984 年 9 月 1 日.
- [3] 藤井恵介. “自発的対称性の破れ”. 2000-2 <https://www-jlc.kek.jp/general/DOC/oho95-html/node6.html>, (2021-1)
- [4] ATLAS Collaboration. “Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 80 fb^{-1} of proton–proton collision data at $\sqrt{s}= 13 \text{ TeV}$ collected with the ATLAS experiment”. CERN Document Server. 2019-9 更新.
<http://cdsweb.cern.ch/record/2629412/>, (2021-1)
- [5] Stephen P. Martin. “A Supersymmetry Primer”. arXiv.org. 2016-1 更新.
<https://arxiv.org/abs/hep-ph/9709356>, (2021-1)
- [6] Damerau,H et al. “LHC Injectors Upgrade Technical Design Report”. CERN Document server. 2016-05
<https://cds.cern.ch/record/2153863>, (2020-12)
- [7] Georges Aad et al. “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider”. Semantic Scholar. 2008-8
<https://www.semanticscholar.org/paper/The-ATLAS-Experiment-at-the-CERN-Large-Hadron-Aad-Gr7d771b20731969fe10c267465582ee60e9383db3>, (2020-12)
- [8] ATLAS Collaboration. “The upgraded Pixel Detector of the ATLAS Experiment for Run 2 at the Large Hadron Collider”. ScienceDirect. 2016-9
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.018>, (2020-12)
- [9] L. Evans and P. Bryant. “LHC Machine”. Journal of Instrumentation. 2008-8.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/3/08/S08001/pdf>, (2021-1)
- [10] Apollinari, G;Bjar Alonso, I; Brning, O; Lamont, M; Rossi, L. “High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) : Preliminary Design Report”. CERN Document Server. 2015-12
<https://cds.cern.ch/record/2116337>, (2020-12)
- [11] The HL-LHC project. “The HL-LHC project”. CERN Accelerating science. 2020-8
<https://hilumilhc.web.cern.ch/content/hl-lhc-project>, (2020-12)
- [12] ATLAS Collaboration. “Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Pixel Detector”. CERN Document Server. 2018-8
<https://cds.cern.ch/record/2285585>, (2020-12)

- [13] ATLAS Collaboration. “Projections for measurements of Higgs boson signal strengths and coupling parameters with the ATLAS detector at a HL-LHC”. CERN Document Server. 2020-5 更新.
[https://cds.cern.ch/record/1956710,\(2020-1\)](https://cds.cern.ch/record/1956710,(2020-1))
- [14] ATLAS Collaboration. “Observation and measurement of Higgs boson decays to WW with the ATLAS detector”. CERN Document Server. 2020-6 更新.
[https://cds.cern.ch/record/1975394,\(2020-1\)](https://cds.cern.ch/record/1975394,(2020-1))
- [15] “Semiconductor Devices Physics and Technology”.
S.M. Sze 著, 南日康夫・川辺光央・長谷川文夫訳, 産業図書, 2015 年 3 月第 2 版第 11 刷発行.
- [16] “Pixel Detectors”.
Rossi, L., Fischer, P., Rohe, T., Wermes, N. Springer, 2006-7-8
- [17] “トータルドーズ効果”. 天文学辞典. 2018-3
[https://astro-dic.jp/total-dose-effect/,\(2020-12\)](https://astro-dic.jp/total-dose-effect/,(2020-12))
- [18] Danilo Giugni. “General approach for thermal-mechanics QA and QC”. CERN Indico. 2019-12
[https://indico.cern.ch/event/860761/contributions/3661710/,\(2020-12\)](https://indico.cern.ch/event/860761/contributions/3661710/,(2020-12))
- [19] Johannes Weller. “Characterisation of Pixel Sensors for the ATLAS ITk Upgrade”. CERN Indico. 2020-7
[https://indico.cern.ch/event/935007/contributions/3928837/attachments/2075810/3485805/BA_pres_\\$jweller.pdf,\(2020-1\)](https://indico.cern.ch/event/935007/contributions/3928837/attachments/2075810/3485805/BA_pres_$jweller.pdf,(2020-1))
- [20] Vasilije Perovic, CMS Tracker Group. “Serial powering in four-chip prototype RD53A modules for Phase 2 upgrade of the CMS pixel detector”. ScienceDirect. 2020-10.
[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900220308330,\(2021-1\)](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900220308330,(2021-1))
- [21] Timon Heim. “YARR - A PCIe based Readout Concept for Current and Future ATLAS Pixel Modules”. IOP Science. 2017
[https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/898/3/032053,\(2020-12\)](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/898/3/032053,(2020-12))
- [22] “物理数学 II”.
西森秀穎 著, 丸善出版, 平成 27 年 9 月 30 日発行.
- [23] Meng, Lingxin. “RD53A Module Testing Document”. CERN Document server. 2020-9
[https://cds.cern.ch/record/2702738,\(2020-12\)](https://cds.cern.ch/record/2702738,(2020-12))
- [24] “Unicorn University - Unicorn College”. Unicorn University.
[https://unicornuniversity.net/en/,\(2020-1\)](https://unicornuniversity.net/en/,(2020-1))
- [25] “MongoDB: The most popular database for modern apps”. MongoDB, Inc.
[https://www.mongodb.com/2,\(2020-12\)](https://www.mongodb.com/2,(2020-12))
- [26] “Welcome to Flask”. Flask Documentation.
[https://flask.palletsprojects.com/en/1.1.x/,\(2020-12\)](https://flask.palletsprojects.com/en/1.1.x/,(2020-12))
- [27] 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” CERN Box. 2020-3
[https://cernbox.cern.ch/index.php/s/BdhvSTAuuE5xHxt,\(2020-1\)](https://cernbox.cern.ch/index.php/s/BdhvSTAuuE5xHxt,(2020-1))
- [28] “Databases and Collections”. MongoDB Manual.
[https://docs.mongodb.com/manual/core/databases-and-collections/,\(2020-12\)](https://docs.mongodb.com/manual/core/databases-and-collections/,(2020-12))
- [29] “WiredTiger Storage Engine”. MongoDB, Inc.

- <https://docs.mongodb.com/manual/core/wiredtiger/>, (2020-1)
- [30] “PyMongo 3.11.2 Documentation”. PyMongo 3.11.2 Documentation.
<https://pymongo.readthedocs.io/en/stable/>, (2020-12)
- [31] “ROOT: analyzing petabytes of data, scientifically.”. ROOT Team.
<https://root.cern/>, (2020-12)
- [32] “QC Software doc”. ITk Docs.
https://itk.docs.cern.ch/pixels/qc__software/rd53a__demo__flow/, (2020-1)
- [33] “InfluxDB: Purpose-Built Open Source Time Series Database”. influxdata.
<https://www.influxdata.com>, (2020-12)
- [34] “Grafana: The open observability platform”. Grafana Labs.
<https://grafana.com>, (2020-12)
- [35] “PySerialComm”. GitLab.
<https://gitlab.cern.ch/solans/PySerialComm>, (2020-12)
- [36] “RD53A Single Chip Card Configuration”. CERN twiki. 2018-5-14
https://twiki.cern.ch/twiki/pub/ RD53/ RD53ATesting/ RD53A__SCC__Configuration.pdf, (2020-12)
- [37] Renesas Electronics Corporation. “GPIO”. RENESAS.
<https://www.renesas.com/jp/ja/support/engineer-school/mcu-programming-peripherals-01-gpio>, (2020-12)
- [38] Microchip Technology. “2.7V Dual Channel 10-Bit A/D Converter with SPITM Serial Interface”. 秋月電子通商. 2006-08
<https://akizukidenshi.com/download/ds/microchip/mcp3002.pdf>, (2020-12)
- [39] “Raspberry Pi 3 Model B+”. RASPBERRY PI FOUNDATION.
<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>, (2020-12)
- [40] “E3640A E3649A Programmable DC Power Supplies - Data Sheet”. Keysight Technologies. 2018-3
<https://www.keysight.com/jp/ja/assets/7018-06827/data-sheets/5968-7355.pdf>, (2020-12)
- [41] “XpressK7-160-Gen2”. Mouser Electronics.
<https://www.mouser.jp/ProductDetail/ReFLEX-CES/XpressK7-160-Gen2?qs=rrS6PyfT74eSJLUPLu1P5g%3D%3D>, (2020-12-22)
- [42] Wielers, Monika. “Pixel production database serial numbering scheme”. CERN Document Server. 2020-12-07
<https://cds.cern.ch/record/2728364>, (2020-12)
- [43] “Berkeley Lab — Lawrence Berkeley National Laboratory”. Berkeley Lab.
<https://www.lbl.gov>, (2020-1)
- [44] “LocalDB docs”. LocalDB docs.
<https://localdb-docs.readthedocs.io/en/top/>, (2020-12)
- [45] “Selected Exercises in Particle and Nuclear Physics”. Lorenzo Bianchini, Springer, 2017-9 published.
- [46] Garcia-Sciveres, Maurice. “The RD53A Integrated Circuit”. CERN Document Server. 2017-10

[\(2020-12\)](https://cds.cern.ch/record/2287593)

- [47] Patrick McCormack, Maurice Garcia-Sciveres, Timon Heim, Benjamin Nachman, Magne Lauritzen. “New Method for Silicon Sensor Charge Calibration Using Compton Scattering”. arXiv.org. 2020-8.

[\(2020-1\)](https://arxiv.org/abs/2008.11860)

- [48] “TCP 技術入門-進化を続ける基本プロトコル”.
安永遼真, 中山悠, 丸田一輝著, WEB+DB PRESS plus, 2019 年 7 月 6 日発売.

謝辞

研究テーマがシステム開発であり、周りとのコミュニケーション、チームワークを大切にしながら進めていく必要がありました。たくさんの人と関わることができ、感謝の意を感じることが多くありました。

また修士2年次には新型コロナウイルスの流行により、オンラインでの活動が多くなりました。メール、SkypeでのChatなどでコミュニケーションを多く取りました。これを面倒に思わず、開発活動に協力してくれた研究者、指導者の方々にはとても感謝しています。

データベースシステムは、特に大阪大学の人と協力しながら開発を行いました。廣瀬穰さんには開発方針やグループに対する問題提起等、研究を進めるに当たって重要な助言、議論をしてもらいました。大西裕二さん、山家谷昌平さん、Mario Gonzalezさんは開発者としてコミュニケーションを取り、フィードバックをし合いました。KEKの田窪洋介さんはCERNに渡航した際に開発の進捗の確認、議論をしてもらいました。中村浩二さんは日本のデータベースのセットアップや実際にKEKで組み立てたモジュール情報の共有の際にお世話になりました。また日本モジュールグループ長の外川学さんには、実際にKEKに行った時にお世話になりました。

日本人以外の研究者との交流も多くあったのが、このテーマの大きな特徴の1つであると思います。Timon Heimさんはデータベースツールの開発やチュートリアルの際に、多くのコメントをもらいました。中央データベースAPIのpython packageの開発者であるGiordon Starkさんは、packageの使用方法に加えてデータベースシステムに対してのfeedbackを多くもらいました。迅速な返信、時には長時間Skype上で議論をしてもらい開発スピードが大きく上がりしました。Lingxin Mengさんはハードウェアの準備等、チュートリアルの開催にあたって多くの助けを受けました。またデータベースユーザの筆頭として数多くのフィードバックをもらいました。Monika Wielersさんはピクセルグループのデータベース管理者として、私の開発活動に対して助言、議論をしてもらいました。その他多くの海外の研究者と関わることができました。世界的に多くの研究者と会話、議論をし開発を進めてこれたことは、私自信としても大きな財産になりました。語学力はもちろん、母国語でない場で自分の思いを伝える手段を試行錯誤しながら成長することができました。私の拙い英語にも優しく対応し、議論に応じてくれた研究者の方々に感謝いたします。

最後に研究室の皆様に対して感謝申し上げます。陣内研究室に入ってよかったですなあと思う次第でございます。陣内先生が作るこのグループの雰囲気は、いい意味で緩く学生にとって嫌にならないものでした。同時に主体性を重んじる場がありました。2年間を振り返ると過ごしやすく、生き生きと活動できたと思います。ありがとうございました。研究室のメンバーにはお世話になったところではなく、楽しくお話しした思い出もたくさんあります。1人1人書いているとキリがないので名前だけ書きたいと思います。陣内修先生、生出秀行さん、調翔平さん、金恩寵さん、潮田理沙さん、窪田ありさん、池龜遙南さん、松崎貴由さん、木下怜士さん、吉川拓実さん、金岡基成さん、Isai Sotarrivaさん、鈴木敦博さん、橋本純平さん、ありがとうございました。他にも交流のあったOB、OGの方々、ありがとうございました。

図目次

1.1	ヒッグスボテンシャル	2
1.2	標準模型の素粒子の質量とヒッグス粒子との結合定数の関係	3
1.3	加速器の全体像	5
1.4	極角 θ と擬ラピディティ η の関係図	7
1.5	ATLAS 検出器の全体像	7
1.6	内部飛跡検出器の全体像	8
1.7	ピクセル検出器の全体像	9
1.8	ピクセルモジュールの全体像	9
1.9	HL-LHC 運転計画	11
1.10	LHC、HL-LHC における粒子の質量とヒッグス粒子の結合定数の関係と統計誤差の見積もり	12
1.11	パイルアップ数增加のイメージ	13
1.12	ITk の全体像	13
1.13	ITk の断面図	14
1.14	VBF イベントの図	15
1.15	VBF イベントにおけるジェットの運動方向の η 分布	16
2.1	ピクセルモジュールの構成	17
2.2	新型ピクセルモジュールに搭載するシリコンセンサーの断面図	18
2.3	ToT の概念図	19
2.4	RD53A	19
2.5	ピクセルモジュールにおける信号伝達の様子	20
2.6	搭載するモジュールのプロトタイプと ITk における配置	21
3.1	組み立て工程のイメージ図	23
3.2	外観検査の様子	24
3.3	平坦性測定の様子	24
3.4	センサー電流-電圧特性結果の例	25
3.5	FE チップ電流-電圧特性試験結果の例	25
3.6	読み出し試験の様子	26
3.7	デジタル回路読み出しにおける <i>Occupancy</i> 分布の例	29
3.8	入射電荷量と <i>Occupancy</i> の関係	30
3.9	Threshold 値とノイズの分布	30

3.10	ノイズ占有率測定における <i>NoiseOccupancy</i> 分布の例	32
3.11	組み立て工程と対応する品質試験一覧	34
4.1	データベースシステムの模式図	35
4.2	ローカルデータベースシステムの概要	38
4.3	MongoDB の構造の例	39
4.4	先行研究により設計された読み出し試験結果の MongoDB 内部構造	40
4.5	ウェブアプリケーション処理のイメージ	41
4.6	品質試験結果ページの例	42
4.7	中央データベースにおけるモジュールの種類と構造	43
4.8	中央データベース内におけるモジュール構造の一例 (Quad モジュール)	44
4.9	同期ツール処理のイメージ	45
4.10	同期機能の概要	45
4.11	ウェブアプリケーションにおけるコメント機能	47
4.12	ウェブアプリケーションにおけるタグ機能	47
4.13	結果選択画面及び組み立て工程表示の例	51
4.14	ピクセル解析ツールにおけるファイル統合処理のイメージ	52
4.15	Tree ファイルとそのデータ保持のイメージ	53
4.16	ピクセル解析ツールの処理の流れ	54
4.17	ウェブアプリケーションにおける検索機能の様子	55
4.18	各モジュールにおけるデータベース操作の流れ	56
5.1	読み出し試験に用いるソフトウェアの概要	59
5.2	RD53A シングルモジュール (SCC)	60
5.3	モジュール付属サーミスタを用いた温度読み出し回路	61
5.4	用いた電源	61
5.5	使用した FPGA ボード (XpressK7)	62
5.6	使用した FMC-DisplayPort 変換カード	62
5.7	ハードウェアセットアップ	62
5.8	ダウンロードしたモジュール情報確認画面	64
5.9	DCS 情報のモニタリングの様子	65
5.10	検索機能確認の様子	66
5.11	試験結果の閲覧	67
5.12	読み出し試験結果の選択ページ	69
5.13	ピクセル解析結果	70
5.14	各評価基準における不良ピクセルの分布	71
5.15	中央データベースにおける読み出し試験結果ページ	72
6.1	方法 1:Python リストを用いた場合	74
6.2	方法 1 における問題点のイメージ	75
6.3	処理時間のボトルネックとなっているデータ構造	76
6.4	方法 1 における検索処理速度測定結果	76

6.5	方法 2:検索キーワード専用コレクションを用いた場合	78
6.6	方法 2 における検索処理時間測定結果	80
6.7	方法 2 における検索情報コレクションの生成時間測定結果	81
6.8	方法 2 の検索における詳細処理	82
6.9	方法 2 における詳細処理時間の測定結果	83
6.10	ドキュメント数に対する型変換処理時間の関係	84
6.11	方法 3:検索情報と共に一覧表示に必要な情報を保持、参照	85
6.12	方法 4:検索情報コレクションを分散、マルチスレッドを使用	85
6.13	方法 3、4 に対する処理時間測定結果	86
7.1	各サーバーの設置場所	88
7.2	”createTestRunAttachment” を用いた添付処理におけるファイル容量と処理時間の関係	89
7.3	中央データベースウェブページへの通信時間の測定結果	90
7.4	ダウンロード処理における流れのイメージ図	92
7.5	登録した Quad モジュールと構成部品のシリアルナンバー一覧。	93
7.6	登録した Quad モジュールのダウンロードの様子	94
7.7	モジュール及び構成部品情報取得のイメージ図	96
7.8	中央データベースにおける読み出し試験結果の構造	99
7.9	アップロード処理に関する流れのイメージ図	100
7.10	アップロード機能における詳細処理測定結果	101
8.1	中央データベースにおける選択可能な組み立て工程のイメージ	109
A.1	真性半導体中のシリコン	110
A.2	pn 接合の電流 – 電圧特性	111
A.3	空乏層	111
B.1	アナログ回路	114
B.2	デジタル回路	114
B.3	RD53A の各ピクセルが持つ試験用電荷入射回路の簡略図	115
B.4	RD53A におけるデータフォーマットのイメージ図	115
B.5	フレキシブル基板	116
C.1	ローカルデータベースシステムチュートリアルの様子	117
C.2	ローカルデータベースシステム導入及び試運転場所	118
D.1	生産時のモジュール組み立て状況解析の例	119
E.1	scp 送信におけるファイルサイズと処理時間の関係	121
E.2	KEK、LBNL 間のファイル送信	121
E.3	KEK、LBNL と CERN 間のファイル送信におけるファイルサイズと処理時間の関係	122

表目次

1.1	標準模型のフェルミオン	2
1.2	標準模型のボソン	2
1.3	現行 LHC と HL-LHC の比較	11
1.4	ピクセル検出器設置領域の比較	14
1.5	搭載するピクセルモジュール数の比較	14
1.6	VBF $H \rightarrow WW$ の測定における測定精度の見積もり	15
2.1	センサーのスペック	18
2.2	RD53A のスペック	19
3.1	デジタル回路読み出しにおける結果ファイル一覧	29
3.2	Threshold 測定における結果ファイル一覧	31
3.3	ToT 測定における結果ファイル一覧	31
3.4	ノイズ占有率測定における結果ファイル一覧	31
3.5	ピクセル解析の評価基準一覧	33
4.1	品質試験に用いる主なコレクション	40
4.2	中央データベースにおける組み立て工程と付随するテスト項目	44
4.3	ローカルデータベースユーザ権限及び使用機能一覧	47
5.1	温度読み出しシステムに使用した装置一覧	61
5.2	読み出しに使用した PC の性能	62
6.1	測定に使用したノート PC の性能	79
6.2	検索機能処理時間測定の詳細	79
6.3	処理 3,5 における型変換処理 6.5 の割合	83
7.1	各ローカルデータベースサーバーの性能一覧	87
7.2	同期ツールの中で使用する中央データベースの主な API 一覧	88
7.3	中央データベース API 実行時の処理時間測定結果。	89
7.4	ダウンロード機能を用いて保存する情報一覧。	91
7.5	登録したモジュールのダウンロード処理時間測定結果	95
7.6	ダウンロード機能における詳細処理にかかる時間測定	96
7.7	中央データベースにおける読み出し試験結果に関する情報一覧	99

7.8	アップロード処理における結果、設定値ファイル添付実行結果と処理時間	102
7.8	アップロード処理における結果、設定値ファイル添付実行結果と処理時間	103
7.9	アップロード処理改善後における結果、設定値ファイル添付実行結果と処理時間	104