## 修士学位論文

# LHC-ATLAS実験Run-3における 初段ミューオントリガーのための モニタリングシステムの開発

2020年2月7日

- 専攻名 物理学専攻 学籍番号 188s101s
  - 氏名 網本圭輔

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

LHC-ATLAS 実験は、陽子陽子衝突型加速器 LHC を用いて、新物理探索を行う実験 である。LHC の陽子陽子衝突点から飛来する二次粒子を ATLAS 検出器で検出し、 素粒子標準模型の精密測定や新物理の探索などを行っている。

ATLAS 実験では、限られたストレージリソースを有効に活用するために、物理 解析に必要な事象のみを保存するためのトリガーシステムが構築されている。トリ ガーシステムは、LHC の陽子衝突に同期したハードウェアベースの初段トリガーシ ステムと、全検出器の情報を用いて精密な解析を行う後段トリガーシステムに分か れている。ATLAS 検出器の最外層のエンドキャップ部に設置されている、高運動量 ミューオンの運動量を測定するためのミューオンスペクトロメータでは、TGC 検出 器を用いた初段トリガーシステムが構築されている。

LHC と ATLAS 検出器は、2019 年からアップグレードを行い、2021 年から第三 期運転を開始する。TGC 検出器では、衝突点で発生した高運動量ミューオンのほか に、LHC ビームに起因するバックグラウンド事象が検出される。初段トリガーでは、 バックグラウンドと高運動量ミューオンを正確に識別する必要がある。2019 年から のアップグレードにおいて、新しい検出器 NSW を導入し、ミューオン識別能力を 向上する。NSW に対応したシステムも必要で、新しいトリガー回路や、読み出しシ ステムが開発されている。

ATLAS検出器全体の安定したデータ取得のために、初段エンドキャップミューオ ントリガーシステムは、常に安定したトリガー判定を提供しなければならない。そ のために、ハードウェアシステムが正しい動作をしていることを適宜確認する必要 があり、そのためのキャリブレーションがほぼ毎日行われる。キャリブレーション の確認項目は多岐にわたり、関与するハードウェアの数も膨大なため、作業を自動 化したキャリブレーションシステムが構築されている。キャリブレーションシステ ムは、これまでの実験でもトリガーシステムの安定性に貢献してきた。

本研究では、TGC検出器を用いた初段トリガーシステムのアップグレードに伴 い、キャリブレーションシステムを最適化した。第三期運転におけるキャリブレー ションではデータ取得法を変更し、高速に大量のデータを取得することができるよ うになった。キャリブレーションに用いるテストパルスのパターンを増やすことが できるようになり、より多くのハードウェアにキャリブレーションを施すことができ るようになった。第三期運転に向けて、TGC検出器のハードウェアシステム全体に キャリブレーションを施すために、最適なテストパルスのパターンを選定した。ま た、これまで手動で行っていたモニタリングのための解析作業を自動化した。キャ リブレーションで得られたデータを自動で解析し、解析結果をデータベースで管理 するウェブベースのモニタリングシステムを開発した。本研究の開発によって、シ ステム運用者の確認作業の負担を軽減し、システムの異常の早期発見に貢献した。

# 目 次

第1章	序論	1
第2章	LHC-ATLAS 実験	3
2.1	LHC	3
2.2	ATLAS 検出器	3
	2.2.1 マグネットシステム	6
	2.2.2 内部飛跡検出器	7
	2.2.3 カロリメータ	8
	2.2.4 ミューオンスペクトロメータ	9
2.3	トリガー・データ読み出しシステム	14
第3章	Run-3 に向けた初段エンドキャップミューオントリガー	19
3.1	初段エンドキャップミューオントリガーシステム	19
3.2	読み出しシステム	21
3.3	トリガーロジック	21
3.4	トリガー情報の読み出し	26
3.5	トリガーパフォーマンス	27
第4章	初段エンドキャップミューオントリガーのキャリブレーション	<b>32</b>
4.1	キャリブレーションで確認するべき問題	32
4.2	初段エンドキャップミューオントリガーシステムに対するキャリブレー	
	ション	33
4.3	データ取得	36
4.4	トラックパターンの最適化........................	37
第5章	モニタリングシステムの開発	42
5.1	モニタリングシステムの重要性	42
5.2	モニタリングシステムの設計	44
5.3	キャリブレーション結果の管理	48
5.4	WEB ページとモニタリング	53
5.5	まとめ	55
第6章	結論と展望	59
付録 A	テストパルス詳細	64

# 第1章 序論

LHC-ATLAS 実験は、陽子陽子衝突型加速器 LHC を用いて高エネルギーの陽子 を衝突させるエネルギーフロンティア実験である。実際に 2012 年ヒッグス粒子を 発見するなど、輝かしい結果を残してきている。データ取得 · 解析を続けることで、 衝突点で生成された粒子の質量や崩壊分岐比を測定し、素粒子標準模型の精密測定 や新物理の探索などを行っている。LHC を用いた物理探索では、より高いエネル ギー領域における陽子陽子衝突事象を集める必要があるため、LHC と ATLAS 検 出器は 2019 年から運転を停止し、アップグレードを実施する。LHC は 2021 年か ら第三期運転 (Run-3) を開始し、重心エネルギー 14 TeV、最大瞬間ルミノシティ  $2.2 \times 10^{34}$  cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> で運転する計画である [1]。

ATLAS 検出器は、LHC の衝突点から飛来する二次粒子を効率的に検出すること を目的として建設された汎用検出器である。LHC の衝突点で生成される粒子のうち 検出器を用いて直接検出できる粒子は、検出器が設置されているところまで飛来す る粒子に限られる。ATLAS 検出器は様々な種類の検出器を組み合わせて粒子を検出 しており、物理解析に必要な事象を選別するためのトリガーシステムによって、ス トレージ領域を有効に活用している。

ATLAS 検出器の最外層に設置されたミューオンスペクトロメータは、衝突点から突き抜けてくるミューオンの運動量を測定する。衝突点から飛来する粒子の中で、 最小電離損失粒子としてふるまう高運動量ミューオンは、検出器最外層まで飛来す るため、粒子の同定が容易である。ミューオンは衝突点で生成される様々な粒子の 崩壊によっても生成され、ウィークボソンの崩壊などでヒッグス粒子や超対称性粒 子の物理に感度がある。したがって、高運動量ミューオンに関連する事象をいかに 効率的に収集するかが鍵である。Run-3 における LHC のルミノシティの増加に伴 い、ミューオンスペクトロメータに飛来するミューオンとバックグラウンドの量が 多くなる。エンドキャップ部におけるミューオンの精密な運動量測定とトリガー判 定のパフォーマンスを維持するため、新しい検出器 NSW (New Small Wheel)が導 入される。NSW はエンドキャップトロイド磁石の内側に設置され、高い時間分解能 と位置分解能をもち、エンドキャップミューオンスペクトロメータのミューオント リガーと、ミューオン運動量の精密測定能力を向上させることが期待される。

LHCの陽子衝突に同期した初段エンドキャップミューオントリガーでは、トロイ ド磁石の外側に設置されたTGC検出器を用いてトリガー判定を行っている。トリ ガーシステムはハードウェアベースで構築されており、Run-3ではNSWに対応した トリガーシステムを導入する。新しいトリガー判定回路が導入され、そのトリガー 情報を読み出すためのモジュールも導入される[2]。

ハードウェアベースで実装されるエンドキャップ初段ミューオントリガーシステム は、ATLASの実験期間全体にわたって安定してトリガー判定を提供することが求め られる。そのため、システムが正しく動作していることを確認するためのキャリブ レーションを適宜行う必要がある。キャリブレーションにおいては、検出器チャン ネルと接続されているモジュールを含めたシステム全体が正しく動作することを確 認しなければならない。確認項目は、ハードウェア間のケーブルの導通や、信号の タイミングなど、多岐にわたるため、一部の作業を自動化したキャリブレーション システムが必要である。キャリブレーションシステムは、これまでの実験でも、ト リガーシステムの安定性に貢献した。

本研究では、Run-3における初段ミューオントリガーシステムのアップグレード に対応し、キャリブレーションシステムを最適化した。これまでのトリガーシステ ムは、検出器の読み出しとトリガー回路の読み出しに共通のモジュールを用いてい たため、キャリブレーションにおいても、VMEを介した読み出しモジュール単位で のデータ取得を行っていた。Run-3では、トリガー判定回路専用の読み出しモジュー ルが新たに導入されるため、これまでのデータ取得では、トリガー判定回路のキャ リブレーションが行えなくなった。Run-3のトリガー・データ取得システムでは、よ り後段の ATLAS 共通のシステムで検出器とトリガー判定回路の情報が統合される ため、そこでキャリブレーションのデータを取得する。この変更は、高速に大量の データ取得を可能にし、キャリブレーションに用いる擬似トラックパターンを増や すことができるようになった。本研究では、テストパルスのパターンを最適化する ことで、トリガー判定アルゴリズムに関与する全てのハードウェアと、その入出力 データフォーマットに対応したキャリブレーションを可能にした。

また、キャリブレーション結果を速やかにモニタリングするためのシステムを-から開発した。キャリブレーションはほぼ毎日行われるが、これまでは得られたデー タの解析は手動で行われていた。本研究で開発したシステムによって、キャリブレー ション結果を自動で解析し、解析結果をデータベースで管理するウェブベースのモ ニタリングが可能となった。ウェブを用いたモニタリングによって、確認作業の負 担が軽減され、システムの異常がより簡単にわかるようになった。

本論文では、2章でRun-3におけるLHC-ATLAS実験の概要、3章で初段エンド キャップミューオントリガーシステムの概要を述べる。4章では、Run-3における キャリブレーションシステムのデザインと、トリガーアルゴリズムに基づいたテス トパルスの最適化について述べる。5章では、モニタリングシステムの概要、デー タ管理、およびその実装について述べる。6章では、キャリブレーション、モニタ リングシステムの今後の展望について述べる。

2

# 第2章 LHC-ATLAS 実験

LHC-ALTAS 実験は、LHC (Large Hadron Collider)を用いた陽子陽子衝突によっ て生成された娘粒子をATLAS (A Troidal LHC ApparatuS)検出器によって検出し、 標準模型における既知粒子の崩壊事象を精密測定するほか、新粒子探索などを行う 実験プロジェクトである [3]。LHC は 2018 年に Run-2 を終了し、2021 年から Run-3 を開始する。2019 年から 2020 年にかけて、LHC 及び ATLAS 検出器のアップグレー ドが行われる。本章では、LHC の運用計画と ATLAS 検出器のデザイン、及びアッ プグレードの詳細について述べる。

### 2.1 LHC

LHC (Large Hadron Coloider) は高エネルギー物理学実験を目的に CERN (欧州 原子核研究機構) が建設した陽子・陽子衝突型加速器である。スイスとフランスの国 境をまたいだ地下 100 m のトンネルに周長 27 km の加速器が建設されており、加速 した陽子ビームを衝突させることができる。陽子ビームはバンチと呼ばれるまとま りをもった構造になっており、現在の各バンチの衝突頻度は 40 MHz となっている。 衝突点には ATLAS や CMS などの検出器が設置されており、衝突によって生成され た娘粒子の飛跡や運動量、エネルギーを測定している。LHC および検出器の全体像 を図 2.1 に示す。

LHC を用いたエネルギーフロンティア実験はより高いエネルギー領域における 陽子陽子衝突事象を集める必要があるため、重心エネルギーおよびルミノシティを 徐々にアップグレードしながら運用されている。LHC は 2011 年に重心エネルギー 7 TeV で Run-1 を開始し、2018 年には重心エネルギーは 13 TeV で、最大瞬間ルミ ノシティは  $2.1 \times 10^{34}$  cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> で Run-2 を終了した。図 2.2 に示すように、Run-2 全 体の積分ルミノシティは 156 fb<sup>-1</sup> に達した。[4]

2019 年以降の LHC の運用スケジュールを図 2.3 に示す。2021 年から始まる Run-3 では、重心エネルギー 14 TeV、最大瞬間ルミノシティ2.2 × 10<sup>34</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> で運転 する予定である。2019 年から 2020 年の LS2 (Long Shutdown 2) にて、LHC および ATLAS 検出器のアップグレードが行われている。

## 2.2 ATLAS 検出器

ATLAS検出器は、LHCの陽子衝突事象において衝突点で生成される粒子を、LHC の衝突点周り全方向にわたって検出することを目的とした、汎用検出器である。検 出可能な寿命をもつ粒子には、荷電レプトン、光子、ハドロンがあり、それらの飛 跡と運動量またはエネルギーを検出する。



図 2.1: LHC の全体像 [5]。地下 100 m にある LHC に設けられた 4 つの衝突点に ATLAS, CMS, ALICE, LHCb などの検出器が配置されている。



図 2.2: LHC Run-2の積分ルミノシティ[4]。Run-2 全体で 156 fb<sup>-1</sup> に達した。

ATLAS 検出器の概観を図 2.4 に示す。ATLAS 検出器は、内側から内部飛跡検出 器、カロリメータ、ミューオンスペクトロメータで構成される。内部飛跡検出器は ソレノイド磁石の内側に設置されており、磁場によって曲げられた荷電粒子の飛跡 の曲率半径から運動量と飛来方向を測定する。内部飛跡検出器に飛来する粒子はま だそのエネルギーを測定していないため、質量厚さを抑えた半導体検出器を用いて、



図 2.3: LHC 運用スケジュール [6]。2019 年から 2020 年までの LS2 の間に LHC 及 び ATLAS 検出器のアップグレードが行われ、Run-3 が 2021 年から 2024 年にかけ て行われる。



図 2.4: ATLAS 検出器の概観 [3]。衝突点を覆うように、内側から内部飛跡検出器、 カロリメータ、ミューオンスペクトロメータが配置されている。

できるだけ粒子のエネルギーを失わない設計になっている。カロリメータは、電磁 カロリメータとハドロンカロリメータがあり、電磁カロリメータで電子とγ線、ハ ドロンカロリメータでハドロンを吸収し、エネルギーを計測している。運動量が高 いミューオンは、カロリメータにおけるエネルギー損失が小さく、カロリメータを 突き抜けてしまう。カロリメータの外側には、高運動量ミューオンの運動量を測定 するためのミューオンスペクトロメータが設置されており、トロイド磁石によって 曲げられたミューオンの飛跡から運動量を見積もっている。ATLAS検出器は、こう した複数の検出器システムを組み合わせることで、陽子陽子衝突で生成される様々 な粒子を検出している。 ATLAS 検出器を構成する各検出器には、データ読み出しのためのハードウェア システムがそれぞれ導入されている。各検出器から統一的にデータを取得するため に、データ読み出しモジュール、データフォーマット、通信規格などが定められて いる。ATLAS 検出器からのデータ読み出しでは、LHC の陽子衝突で起こる物理事 象のうち、ATLAS 実験の物理解析で興味のあるデータを効率的に収集するための トリガーシステムを構築している。トリガーシステムは検出器の情報をもとに解析 に必要なデータを選別しており、解析に必要であると判断した場合のみ、検出器の データをストレージに蓄える。トリガーシステムは、LHC のバンチ衝突に同期した 初段トリガーシステムと、より精密な検出器データを用いる後段トリガーシステム に分かれている。初段トリガーに用いる検出器の読み出しシステムには、トリガー のためのハードウェアモジュールが設置されている。

以下に、各検出器とトリガー・データ取得システムの詳細を述べる。

### 2.2.1 マグネットシステム

ATLAS検出器では、荷電粒子の電荷及び運動量の測定を、磁場を用いて行っている。ATLAS検出器に導入されている荷電粒子の飛跡検出器は、内部飛跡検出器と ミューオンスペクトロメータがある。それぞれの飛跡検出器に適切な磁場を提供す るための超伝導磁石が3つ設置されている。

マグネットシステムの概観を図 2.5 に示す。ATLAS 検出器ではソレノイド磁石、



図 2.5: ATLAS のマグネットシステムの概観 [3]。内側のソレノイド磁石と外側の トロイド磁石の組み合わせになっている。

バレルトロイド磁石、エンドキャップトロイド磁石の3種類を組み合わせており、ソ

レノイド磁石のまわりにカロリメータを挟んでトロイド磁石が配置されている。ト ロイド磁石がビーム軸に対して回転方向に磁場を形成している。ソレノイド磁石は ビーム軸方向に磁場を形成しており、内部飛跡検出器に磁場を提供している。トロ イド磁石はビーム軸に対して回転方向に磁場を形成しており、エンドキャップ、バレ ル領域それぞれのミューオンスペクトロメータに磁場を提供している。

ソレノイド磁石は円筒状の超伝導磁石で、外側をリターンヨークで覆うことでト ロイド磁石に磁場が漏れないようになっている。粒子のエネルギーを計測するカロ リメータの内側に設置されているため、通過した粒子のエネルギーを失わないよう に、厚さが放射長の0.66倍に抑えている。バレルトロイド磁石は8つのトロイド磁 石が1組になって構成されている。トロイド型の超伝導磁石を8つ組み合わせるこ とによって、リターンヨークがなくても磁場が外に漏れないようになっている。ト ロイド磁石の間に検出器が配置され、ミューオンのヒットを検出する。エンドキャッ プトロイド磁石は、バレルトロイド磁石と同様、8つのトロイド型超伝導磁石を組 み合わせている。超電導冷却容器に全てのトロイド磁石が収まっているため、検出 器をトロイド磁石の前後に配置することで、ミューオンのヒットを検出する。

### 2.2.2 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器の概観を図2.6に示す。3種類の検出器がソレノイド磁石の内側に設



図 2.6: 内部飛跡検出器の概観 [3]。Pixel 検出器、SCT、TRT からなる。半導体検 出器とガス検出器を用いて、質量厚さを抑えることによって、粒子のエネルギーを 失わないデザインになっている。

置され、磁場によってビーム軸に対して方位角方向 ( $\phi$ 方向) に曲げられた荷電粒子の 飛跡を検出する。検出器は、内側から Pixel 検出器、SCT (Semi Conductor Tracker)、 TRT (Transition Radiation Tracker) がある。Pixel 検出器は面積 50 × 400  $\mu$ m<sup>2</sup> のシ リコンピクセルを並べた検出器で、荷電粒子の二次元的なヒット位置を得ることが できる。SCT は、幅 16 μm のシリコンストリップ 2 枚を 40 mrad 傾けて重ねること により、二次元的なヒット位置を取得している。TRT は、直径 4 mm のチューブ内 に直径 30 μm のアノードワイヤを張ったドリフトチューブを多数重ねた連続飛跡検 出器である。

内部飛跡検出器は、粒子のエネルギーを計測するカロリメータの内側に設置され ており、検出器構成物による粒子のエネルギー損失を抑制する必要がある。検出器 及びその他構造物による厚さは、最大で放射長の 2.5 倍、吸収長の 0.7 倍に抑えて いる。

### 2.2.3 カロリメータ

ソレノイド磁石の外側には、カロリメータが設置されている。カロリメータは、 粒子のエネルギーを吸収し、測定する検出器である。カロリメータには、電子・光子 のエネルギーを吸収し、発生した電磁シャワーを計測する電磁カロリメータと、ハ ドロンによるシャワーを計測するハドロンカロリメータがある。カロリメータの概 観を図 2.7 に示す。



図 2.7: カロリメータの概観 [3]。オレンジ色の部分が液体アルゴンカロリメータ、 灰色の部分がタイルカロリメータになっている。ソレノイド磁石とトロイド磁石の 間に配置されている。

電磁カロリメータには、液体アルゴンカロリメータが用いられている。液体アルゴ ンカロリメータは、鉛の吸収体と液体アルゴンを用いたサンプリングカロリメータ である。ATLASの電磁カロリメータでは、バレル部で放射長の24倍、エンドキャッ プ部で放射長の22倍の厚さがある。 ハドロンカロリメータには、エンドキャップ部とフォワード部に液体アルゴンカ ロリメータ、バレル部にタイルカロリメータが用いられている。タイルカロリメー タは鉄を吸収体に用いており、シンチレータと波長変換ファイバーを用いた光読み 出しになっている。タイルカロリメータの厚さは、衝突点からビーム軸に垂直な方 向では、吸収長の9.7倍である。エンドキャップ部、フォワード部の液体アルゴンカ ロリメータの厚さは吸収長の10倍である。

### 2.2.4 ミューオンスペクトロメータ

カロリメータの外側には、ミューオンスペクトロメータが設置されている。ミュー オンスペクトロメータでは、衝突点からカロリメータを突き抜けて飛来する高運動 量ミューオンの運動量を測定する。ミューオンスペクトロメータの概観を図 2.8 に 示す。



図 2.8: ミューオンスペクトロメータの概観 [3]。カロリメータの外側に配置された トロイド磁石の磁場中にミューオン検出器が配置されている。TGC, RPC は初段ト リガーに用いられ、MDT, CSC は飛跡の精密測定に用いられる。

カロリメータの外側にトロイド磁石が設置されており、トロイド磁石を覆うよう にミューオン検出器が配置されている。ミューオン検出器は、LHCのバンチ衝突識 別が可能な時間分解能が高い検出器と、ミューオンの飛跡を精密に再構成するため の空間分解能が高い検出器で構成されている。時間分解能が高い検出器の情報を初 段トリガーシステムに提供している。 時間分解能が高い検出器には RPC (Resistive Plate Chamber) と TGC (Thin Gap Chamber) があり、空間分解能が高い検出器には MDT (Multiple Drift Tube) と CSC (Cathode Strip Chamber) がある。RPC はバレル部、TGC はエンドキャップ 部に設置されており、CSC はフォワード部に設置されている。MDT はバレル部と エンドキャップ部に設置されている。

検出器の最外層に位置するミューオンスペクトロメータには、高運動量ミューオ ン以外の粒子も多く飛来する。その多くはLHCビームに起因する中性粒子である。 ミューオン検出器では、こうしたミューオン以外の粒子によるバックグラウンド事象 が多く検出される。ミューオンスペクトロメータでは、複数の検出器を重ね合わせ ることでミューオンの飛跡を精密に再構成するとともに、バックグラウンドによる ヒット情報をトリガーしないように設計されている。Run-3 では、LHC のルミノシ ティが増加するため、検出器に飛来する高運動量ミューオンやバックグラウンドの 量が増える。ミューオンスペクトロメータとミューオントリガーシステムは、飛跡 をより正確に再構成することが求められる。Run-3 では、CSC、EI TGC、フォワー ド部 MDT を新しい検出器 NSW (New Small Wheel) に置き換えて、ミューオンス ペクトロメータとミューオントリガーシステムのパフォーマンスを維持する。以下 に、ミューオンスペクトロメータで用いられているミューオン検出器について、そ れぞれ概略を述べる。

### TGC

TGC は、エンドキャップ部に設置されたミューオン検出用の MWPC(Multi Wire Proportional Chamber) で、バンチ衝突識別に十分な時間分解能をもち、初段ミュー オントリガーに用いられる。図 2.9 に TGC 検出器の配置を示す。

エンドキャップトロイド磁石の外側に TGC-BW と呼ばれる大型の検出器ステー ションがあり、トロイド磁石の内側に EI/FI TGC と呼ばれる比較的小さい検出器ス テーションがある。TGC-BW は内側から M1、M2、M3 ステーションに分かれてお り、M3 ステーションのヒット位置と M1、M2 ステーションのヒット位置の差から、 通過したミューオンの運動量を見積もることができる。EI/FI TGC は、TGC-BW を通過したミューオンのヒット情報とコインシデンスをとるために用いられる。コ インシデンスをとることで、バックグラウンドに起因する誤ったミューオントリガー を抑制することができる。

図 2.10 に示す通り、TGC 検出器のガス層は2または3層に重なっており、M1 ス テーションは3層(トリプレット)、M2、M3 ステーションは2層(ダブレット)の ものが用いられている。

TGC 検出器の内部構造を図 2.11 に示す。ガスギャップは 2.8 mm、ワイヤーピッ チは 1.8 mm となっており、複数のワイヤーをまとめて 1 つのチャンネルとして読 み出している。

### $\mathbf{RPC}$

RPC はバレル部に設置されたミューオン検出器で、バンチ衝突識別に十分な時間 分解能をもち、初段ミューオントリガーに用いられる。2 mm のガスギャップを抵抗



図 2.9: TGC 検出器の配置 [3]。TGC-BW と呼ばれるステーションが M1、M2、M3 ステーションに分かれており、M3 ステーションをピボットとして M1、M2 におけ るヒット位置のズレから運動量を見積もる。トロイド磁石の内側の I ステーション には、TGC-BW におけるバックグラウンド事象によるヒットを識別するためのコ インシデンス用の検出器が配置されている。S,L ステーションは、MDT 検出器のス テーションである。



図 2.10: TGC 検出器のダブレット、トリプレット構造 [3]。TGC 検出器は、ガス ギャップを複数枚重ねた構造になっており、3 枚重ねたものと 2 枚重ねたものが用い られている。それぞれのガスギャップに、ワイヤーの読み出しとストリップの読み 出しがある。



図 2.11: TGC 検出器の内部構造 [3]。2.8 mm のガスギャップ中にワイヤーが 1.8 mm ピッチで並んだ MWPC(Multi Wire Proportional Chamber) 構造になっている。ワ イヤーにかけられた高電圧でガス中の電離電子を加速、増幅し、電気信号を得る。

体ではさみ、垂直に交差したストリップによって二次元読み出しを行う。RPCの内 部構造を図 2.12 に示す。

### $\mathbf{MDT}$

MDT はバレル部とエンドキャップ部に設置されたミューオン検出器で、積層した ドリフトチューブを用いてミューオンの飛跡を検出している。カソードチューブの 中に1本のアノードワイヤーが張られている。積層したチューブのガス増幅にかか る時間差を用いて、擬ラピディティη方向に高い分解能をもって通過したミューオ



図 2.12: RPC の内部構造 [3]。抵抗体ではさんだ 2 mm ガスギャップに高電圧をかけ、直交するストリップで 2 次元読み出しを行う。

ンの角度情報を得ることができる。ドリフト時間が遅いため、バンチ衝突の識別は できない。MDT の構造を図 2.13 に示す。



図 2.13: MDT の構造 [3]。中にワイヤーを張ったチューブを3または4層重ね、それぞれのチューブ内のガス増幅の時間差を利用して、ミューオンの飛跡を精密に測定することができる。図中の赤線はアラインメントのための光線である。

### $\mathbf{NSW}$

NSW (New Small Wheel) は、エンドキャップトロイド磁石の内側にある CSC、 フォワード部 TGC、および MDT に代わって、Run-3 から導入されるミューオン検



図 2.14: NSW のレイアウト [7]。エンドキャップ部のトロイド磁石の前面にディス ク型の検出器が配置される。

出器である。TGC-BW と組み合わせてコインシデンスをとることで、バックグラウ ンドとミューオンをより正確に識別できるようになる。Run-3 では、LHC のルミノ シティの増加に伴い、ミューオンスペクトロメータに飛来する高運動量ミューオン とバックグラウンドが増加する。現在用いられている CSC や MDT では、バックグ ラウンド事象の増加に対応したまま飛跡検出のパフォーマンスを維持することがで きない。エンドキャップミューオンスペクトロメータを用いた初段ミューオントリ ガーにおいても、これまでのフォワード部 TGC では、η が高い領域におけるバック グラウンド事象の選別に対応できない。これらの問題に対応するため、より高い位 置分解能と十分な時間分解能をもった検出器 NSW が新たに導入される。

NSW は図 2.14 のようにホイール型になっており、それぞれのチェンバーは図 2.15 のように sTGC と MicroMegas の 16 層サンドイッチ構造になっている。 sTGC を用 いてミューオンをトリガーし、MicroMegas を用いて精密な測定を行う。時間分解能 が高く、バンチ衝突を識別することができるため、初段ミューオントリガーに用い られる。EI TGC に比べて位置分解能を向上しており、通過したミューオンのヒッ ト位置だけでなく、飛来した角度の情報を得ることができる。

## 2.3 トリガー・データ読み出しシステム

ATLAS 実験では、各検出器のハードウェアから統一的にデータを収集するため のデータ読み出しシステムが構築されている。ATLAS 検出器のデータ読み出しシ ステムは、LHC の陽子衝突を用いた効果的な物理探索のために、検出器から得ら



図 2.15: NSW 層構造 [7]。4 層の MicroMegas2 つを 4 層の sTGC ではさみ、全体で 16 層構造になっている。

れたデータを効率的に収集、記録する必要がある。LHCにおけるバンチ衝突頻度は 40 MHzと高く、1回のバンチ衝突において起こる陽子陽子衝突事象は複数ある。バ ンチ衝突における陽子衝突事象の重なりはパイルアップと呼ばれ、データ取得の段 階ではそれぞれの衝突事象を区別することができない。図2.16に示す通り、各バン チ衝突におけるパイルアップの量は40ほどである。物理探索に効果的な解析を行う ためには、この膨大な衝突事象の中から、ATLAS実験が目的とする素粒子標準模型 やヒッグス粒子、超対称性粒子に関連する事象を抽出しなければならない。このた めに、物理解析に必要な事象を選別するためのトリガーシステムが実装され、限ら れたストレージリソースを効率的に利用している。

ATLAS実験では、検出器から効果的にデータ読み出しを行うために、TDAQ (Trigger and Data AcQuisition)システムが構築されている。Run-3における TDAQ シ ステムの概観を図 2.17 に示す。ATLAS の TDAQ システムでは、2 段階のトリガー システムを採用しており、バンチ衝突ごとにトリガー判定を行う初段トリガーシス テム Level-1 Trigger と、検出器の精密な情報をもとにトリガー判定を行う後段トリ ガーシステム HLT (High Level Trigger) がある。Level-1 Trigger と HLT のトリガー 判定頻度はそれぞれ 100 kHz、1 kHz となっており、2 つのシステムを用いて段階的 にトリガー判定を行うことで、精密なトリガー判定を行い、物理に興味のある事象 を選別することができる。

Level-1 Trigger システムは、カロリメータとミューオンスペクトロメータの情報 を用いてトリガー判定を行っている。カロリメータとミューオンスペクトロメータ それぞれのモジュールで、各バンチ衝突におけるトリガー判定を行った後、初段トリ ガー判定プロセッサ CTP (Central Trigger Processor)が最終的な初段トリガー判定 を行う。検出器を RoI (Region of Interest)と呼ばれる領域に分割し、陽子バンチ衝



図 2.16: LHC のバンチ衝突あたりのパイルアップ数 [4]。パイルアップはルミノシ ティに対して増加し、Run-2 における重心系エネルギー 13 TeV でのパイルアップ数 は 40 程度であった。



図 2.17: ATLAS の Run-3 における TDAQ システムの概略図 [1]。ミューオンスペ クトロメータとカロリメータの情報を用いた初段トリガーシステム Level-1 Trigger と、全検出器の情報を用いた後段トリガーシステム HLT (High Level Trigger) が実 装されている。

突に同期して各 RoI にトリガー判定を行っている。トリガー判定された RoI の情報 は後段の HLT に渡される。Level-1 Trigger 全体でのトリガー判定の頻度は 100 kHz になるように調整されており、CTP が発行する L1A (Level-1 Accept) と呼ばれる信 号によって、各検出器の読み出しシステムに初段トリガー判定が行われたことを伝 達する。

L1A を受け取った各検出器の読み出しシステムは、ROD (Readout Driver)と呼ば れるモジュールから、決められたフォーマットに従って後段の ROS (Readout System) にデータを送信する。ROS の情報と、Level-1 Trigger によってトリガーされ た RoI の情報をもとに、HLT がトリガー判定を行う。HLT のトリガー判定の頻度は 1 kHz になるように調整されており、HLT のトリガー判定を受けた検出器のデータ は SFO (SubFarm Output)と呼ばれるストレージ領域に蓄積される。SFO に蓄積さ れたデータはデータサーバに転送され、物理解析に用いられる。

ATLAS 検出器は様々な種類の検出器から構成されており、各検出器からのデータ の読み出しにはそれぞれ独自のハードウェアシステムを構築している。それぞれの 検出器のフロントエンドエレクトロニクスから統一的にデータ読み出しを行うため の通信規格として S-LINK が開発されており、ROD から ROS へのデータ転送に用い られている。S-LINK 通信に対応したインターフェースも開発されており、ATLAS の ROS では Run-2 から、PCIe バス規格に対応した S-LINK 通信用インターフェー ス RobinNP カードが用いられている [2]。

ATLAS の TDAQ システムでは、トリガー信号を LHC のバンチクロスに同期し て全検出器に配布するための TTC (Timing Trigger and Control) システムを実装し ている。TTC システムの概観を図 2.18 に示す。CTP は LHC からバンチ衝突に同期 した信号を受け取っており、LHC のバンチ衝突に同期してトリガー判定を行ってい る。バンチ衝突のクロックのほかに、LHC1 周分のバンチクロスごとに Orbit Signal を受け取っている。各検出器ごとに TTC パーティションと呼ばれる単位が割り当 てられており、LTP (Local Trigger Processor)を介して LHC のバンチ衝突に同期し たトリガー信号が配布される。TTC システムは TTCvi、TTCex、TTCrx などのモ ジュールで構成されている。LTP の信号を TTCvi でシリアル化し、TTCex を用い てパーティション内の全てのモジュールに TTC 信号を送信して、各モジュールに搭 載された TTCrx で TTC 信号を受信する。TTC 信号には L1A 信号のほか、LHC バ ンチ衝突に同期したクロック信号や、バンチ衝突 ID、トリガー ID、イベントのカ ウントをリセットするための信号がある。TTC 信号の内訳を表 2.1 に示す。

LHC CLOCK	LHC のバンチ衝突に同期したクロック信号
L1A	CTP が配布する Level-1 Accept 信号。
BCR	Bunch Counter Reset。Orbit 信号をうけて TTCvi で生成される。
ECR	CTP が配布する ATLAS Event Counter Reset。
Reset	リセット信号。レジスタの値などが初期値に再設定される。
Test Pulse TrigIger	テストパルスを出力する際にトリガーとなる信号。

表 2.1: TTC 信号 [8]。



図 2.18: ATLAS の TDAQ システムにおける TTC システムの概念図 [3]。CTP から LTP を介して、各 TTC パーティションに、LHC のバンチ衝突に同期した TTC 信号が配布され、さらに TTCvi、TTCex を用いて、検出器システム全体に TTC 信号を配布している。

# 第3章 Run-3に向けた初段エンド キャップミューオントリガー

2.3節で述べたように、ATLAS検出器では2段階のトリガーシステムが構築されて おり、LHCバンチ衝突に同期した初段トリガーシステムは、カロリメータとミュー オンスペクトロメータの情報を用いてトリガー判定を行っている。初段エンドキャッ プミューオントリガーシステムは、TGC検出器を用いて、衝突点から飛来する高 運動量ミューオンとバックグラウンドを識別している。Run-3では、ルミノシティ の増加に対応するため、エンドキャップトロイド磁石内側に新しく導入される検出 器 NSW の情報も用いてトリガー判定を行う。本章では、初段エンドキャップミュー オントリガーシステムの概要と、NSW を用いたトリガーアルゴリズムについて述 べる。

## 3.1 初段エンドキャップミューオントリガーシステム

初段エンドキャップミューオントリガーシステムは、TGC検出器を用いてトリガー 判定を行う。トリガー判定に用いる検出器の配置を図3.1に示す。トロイド磁石の外 側に大型のTGC検出器ステーションTGC-BW (TGC Big-Wheel)が設置されてい る。TGC-BW はさらに3つのステーションに分かれており、衝突点から飛来する高 運動量ミューオンの飛跡を検出する。3つのTGC検出器ステーションにおけるヒッ ト位置を、衝突点からの直線飛跡と比較し、トロイド磁場で曲げられたミューオン の運動量を見積もっている。TGC検出器を用いた初段エンドキャップミューオント リガーシステムはハードウェアベースで実装されており、主にTGC検出器読み出 しシステム、トリガー判定システム、トリガー信号配布システムからなる。

Run-2 における垂直運動量閾値 20 GeV の初段ミューオントリガーのイベント数 を図 3.2 に示す。取得したデータの詳細な解析でミューオンの飛跡が再構成されたイ ベント数が赤色で示されているのに対し、初段ミューオントリガーでトリガーされ たイベント数を青色で示している。TGC 検出器は 1.05 ≤ |η| ≤ 2.40 の領域に設置さ れている。エンドキャップ部において、初段ミューオントリガーのイベント数が多 くなっている。これは、初段エンドキャップミューオントリガーシステムが、バック グラウンドによるヒット事象をミューオンの飛跡として誤ってトリガーしてしまっ ているためである。

バックグラウンドを除去できずに高運動量ミューオンとして誤ってトリガーして しまうフェイクトリガーは、初段トリガーシステムのレートの許容量である100 kHz を超える要因になってしまう。これを防ぐために初段エンドキャップミューオント リガーシステムは、TGC-BWの飛跡情報とトロイド磁石の内側に設置された検出



図 3.1:初段エンドキャップミューオントリガーアルゴリズムの概念図 [3]。ATLAS 検出器のビーム軸方向の断面図を表示している。ミューオンスペクトロメータは、 ビーム軸に対して方位角方向にラージセクターとスモールセクターがあり、図はラー ジセクターについて示している。トロイド磁石の外側に大型の TGC 検出器ステー ション TGC-BW が設置されている。TGC-BW の3つの TGC 検出器ステーション におけるヒット位置を、衝突点からの直線飛跡と比較し、トロイド磁場で曲げられ たミューオンの運動量を見積もっている。トロイド磁石の内側に設置されているタ イルカロリメータの D5、D6 層、EI TGC、RPC BIS78、NSW とコインシデンスを とることで、バックグラウンドと高運動量ミューオンを識別する。EI TGC はラー ジセクターに、RPC BIS78 はスモールセクターに設置されている。

器の情報のコインシデンスをとることで、衝突点から飛来しないバックグラウンド を除去している。Run-2においては、図 3.1 で示したタイルカロリメータの D5、D6 層、EI/FI TGC をコインシデンスに用いていた。Run-3 では、トロイド磁石の内側 に新しく導入されるミューオン検出器 NSW や RPC BIS78 を用いたトリガーアルゴ リズムによって、フェイクトリガーを削減する。NSW 導入後のトリガーレートの見 積もりを図 3.3 に示す。エンドキャップ、フォワード部におけるフェイクトリガーが 削減され、初段ミューオントリガーの性能が向上される見積もりである。



図 3.2: Run-2 における垂直運動量閾値 20 GeV の初段ミューオントリガーレート に相当するイベント数 [9]。精密測定結果を用いた解析でミューオンの飛跡が再構成 されたイベント数を赤色で示している。初段ミューオントリガーでトリガーされた イベント数を青色で示している。エンドキャップ領域 (|η| > 1.0) では、初段ミュー オントリガーのイベント数が多くなっている。

## 3.2 読み出しシステム

TGC 検出器のヒット情報は、TGC 検出器に設置されたフロントエンドエレクト ロニクスから読み出される。フロントエンドエレクトロニクスのヒット情報は、初 段トリガーのトリガー信号を受信した場合のみ、後段に転送される。読み出しシス テムのアルゴリズムの概略を図 3.4 に示す。TGC 検出器のワイヤー、ストリップか ら送られてくるアナログの電気信号は、ASD (Amplifier Shaper Descriminator)に よってデジタル化される。ASD は、電流信号を電圧信号に変換、増幅したあと、し きい値電圧を用いて信号を識別し、検出器のヒット情報を LVDS 規格のデジタル信 号で PP (Patch Panel) ASIC に出力する。PP ASIC は ASD の出力信号を LHC の バンチクロスに同期してサンプリングし、ヒット情報に BCID (バンチ衝突の ID)を 付与する。PP ASIC の出力は SLB (Slave Board) ASIC のバッファに一時的に蓄え られ、SLB は初段トリガー信号 L1A を受信した場合のみデータを後段の ROD に出 力する。L1A 信号に関連したバンチ衝突のヒット情報と、その前後のバンチ衝突に 対応したヒット情報を後段に送信する。

## 3.3 トリガーロジック

TGC 検出器を用いたトリガー判定は SL (Sector Logic) と呼ばれるモジュールで 行われる。トリガーアルゴリズムの概観を図 3.5 に示す。PP ASIC から送られてき



図 3.3: Run-3 における垂直運動量閾値 20 GeV の初段ミューオントリガーレートの見積もり [9]。NSW を用いたトリガーアルゴリズムによってバックグラウンドに起因するフェイクヒットが削減され、初段ミューオントリガーの性能が向上される。白、水色、黄色の部分が、Run-3 で削減が期待されるフェイクトリガーである。 1 < |\eta| < 1.3 の領域は、NSW でカバーすることができないため、フェイクトリガーが残る。



図 3.4: ヒット情報の読み出し方法 [8]。ASD でデジタル化されたヒット情報は SLB のバッファに蓄えられ、L1A 信号を受信した場合のみデータを後段に送信する。

た TGC-BW のワイヤー、ストリップのヒット情報を用いて、SLB ASIC の中でト リプレット、ダブレットごとにコインシデンスをとる。SLB ASIC のコインシデン ス結果をもとに HPT (High-PT) board と呼ばれるモジュールでトリプレット、ダブ レットをまたいだコインシデンスをとり、SL に結果を送信する。

SL はピボットの TGC 検出器を RoI 単位に分割し、それぞれの RoI についてトリ ガー判定を行う。RoI の分割単位を図 3.6 に示す。トリガー判定はトリガーセクター



図 3.5: TGC 検出器におけるトリガーアルゴリズム [8]。SLB がトリプレット、ダブ レットそれぞれでコインシデンスをとる。HPT は SLB の情報をもとにトリプレッ ト、ダブレットをまたいだワイヤー、ストリップごとにコインシデンスをとり、SL は HPT から来るワイヤーとストリップの情報を統合したトリガー判定を行う。



図 3.6: 初段エンドキャップミューオントリガーのセグメンテーション [1]。緑の線 で囲まれたトリガーセクターは、ピボットの TGC 検出器を φ 方向にエンドキャップ 部で 48 分割、フォワード部で 24 分割している。1 つのトリガーセクターの中で最も 高い運動量でトリガーされた RoI が、最大 4 つ MuCTPi に送信される。

と呼ばれる単位で行われ、1つの SL で 2 つのトリガーセクターを担当する。トリ ガーセクターはピボットの TGC 検出器をビーム軸に対して方位角方向 (φ方向) にエ ンドキャップ部で 48 分割、フォワード部で 24 分割している。RoI は 1 つのトリガー セクターを φ 方向に 4 分割している。エンドキャップ部の RoI は、1 つのトリガーセ クターをビーム軸に対して垂直な方向 (*R* 方向) に 37 分割しており、フォワード部 の RoI は *R* 方向に 16 分割している。

Run-3 では、NSW の導入に伴いトリガー判定に用いるデータ量が増え、従来のト リガー判定回路では対処できないため、新たなトリガー判定回路として NSL(New SL) が導入される。NSL の写真を図 3.7 に、ダイヤグラムを図 3.8 に示す。 NSL



図 3.7: NSL ボードの写真 [10]。

は、TGC-BWのHPTからトリガー情報を受け取るために、G-Link規格に対応したSFP規格の光通信モジュールを搭載している。TGC-BW以外の検出器の情報を受け取るために、GTX規格に対応したSFP+規格の光通信モジュールを搭載している。FPGA (Kintex-7 FPGA XC7K410T-1FFG900, Xilinx inc)をメインプロセッサとして搭載しており、ファームウェアを記録するためのBPIメモリ、VMEバスコントロールのためのCPLD (Xilinx CoolRunner-II XC2C256-7Q208C)などが搭載されている。NSLは、1つのトリガーセクターのなかで運動量の高いミューオン候補を最大で4つ選別し、MuCTPI (Muon-to-CTP Interface)に送信する。MUCTPI はバレル部とエンドキャップ部のミューオントリガー情報を統合し、CTP に伝達する。

Run-3 で導入されるトリガー判定回路 NSL は、TGC-BW とトロイド磁石の内側 にある検出器の情報を統合してトリガー判定を行う。NSL のトリガーロジックの概 観を図 3.9 に示す。TGC-BW の HPT から、ミューオン候補の情報が G-Link 規格 で送られてくる。HPT の情報には、TGC-BW の最外層 (BW3) と再内層 (BW1)の



図 3.8: NSL ボードのダイヤグラム [10]。NSL には光通信モジュール、FPGA、 CPLD、BPI memory、Ethernet PHY chip などが搭載されており、VME を介した 通信と、イーサネットを用いた通信ができる。

ヒット位置のズレが含まれている。M3のヒット位置を表す $\eta$ 、 $\phi$ 、およびそれとコイ ンシデンスがとれた M1のヒット位置のズレ $\Delta R$ 、 $\Delta \phi$ が入力される。RPC BIS78、 タイルカロリメータ、EI TGC からは、検出器におけるヒット情報が送られてくる。 NSW からは、通過したミューオの飛跡情報が送られてくる。NSW の情報には、ヒッ ト位置を表す $\eta$ 、 $\phi$ 及びミューオンが飛来した角度 $\theta$ が含まれている。NSL はこれ らの情報をもとにトリガー判定を行い、トリガー判定結果を MUCTPI に送信する。

NSL で行われるトリガー判定は CW (Coincidence Window) と呼ばれる Look-Up Table を用いて行われる。図 3.10 に示すように、TGC-BW と内側の検出器のヒット がミューオンの運動量に依存してどれだけズレるかが、シミュレーションで見積も られている。特定の運動量に対応する領域にコインシデンスの窓を開けるように、CW が作成される。NSL は、メモリに記録された Look-Up Table を参照する方法に よって、高速なトリガー判定演算を実現している。

NSL におけるトリガーロジックのダイヤグラムを図 3.11 に示す。NSL 内のトリ ガーセクターに対するトリガー判定は、SSC という単位で行われている。各 SSC の 中に、TGC-BW を用いたトリガー判定回路と、その他の検出器のヒット情報を用い たトリガー判定回路が実装されている。SSC における TGC-BW を用いたトリガー 判定は、図 3.12 に示すように、RoI8 つをまとめた単位になっている。SSC 1 つに入 力される TGC-BW のヒット情報は、ワイヤーの HPT 1 つ、ストリップの HPT2 つ 分である。ワイヤーの HPT から入力されるビット列の先頭が Pos (Position) に対応 しており、ストリップの HPT から入力されるビット列の先頭が φ に対応している。



図 3.9: NSL のトリガーロジック [10]。NSL には TGC-BW 以外に NSW、 RPC BIS78、タイルカロリメータ、EI TGC から入力がある。TGC-BW からくる飛 跡情報と、NSW の飛跡情報や他検出器におけるヒット情報等を用いてコインシデン スをとり、トリガー判定を行う。

NSL は、Pos と $\phi$ およびストリップの HPT の ID を用いて SSC 内の 8 つの RoI を区 別しており、コインシデンスがとれた RoI をミューオン候補とする。

TGC 検出器のトリガー・読み出しシステムでは、ATLAS の TDAQ システムにお ける TTC システムに則ってトリガー信号を各モジュールに配布している。図 3.13 に示すように、USA15 にて LTP が CTP から信号を受け、TTCvi、TTCex へと信 号を渡す。TTCex から、TGC 検出器の TTC システム全体に TTC 信号が配布され る。UX15 にある SPP (Service Patch Panel) が TTCrx を搭載しており、SLB が載っ た PSB や HPT へ信号を配布する。USA15 にある SL への信号の配布は Run-2 まで SPP が担っていたが、Run-3 からは新たに TTC-Fanout ボードを導入する。

## 3.4 トリガー情報の読み出し

Run-3 では新しいトリガー判定回路 NSL が導入されるため、NSL の読み出しモ ジュールが必要になる。NSL のトリガー情報の読み出しには、従来通りの ROD に 置き換えて SROD が導入される。[2] SROD は、PC上で動作するソフトウェアベー スの読み出しシステムである。NSL の読み出しモジュール開発にあたって、従来の ROD と同じようなハードウェアベースの読み出しシステムを開発する期間がなく、



図 3.10: ある RoI における運動量に依存した NSW のミューオンヒット位置と、そ れをもとに作成される Coincidence Window[10]。シミュレーションで見積もった運 動量ごとのミューオンヒット情報をもとに、高運動量ミューオンに対応する領域を 定義する。

デバッグ、改良が容易なソフトウェアベースでの開発となった。図 3.14 に示すよう に、12 個の NSL を 1 つの SROD で読み出す。このアップグレードにより、Run-3 で は検出器のヒット情報の読み出しとトリガー判定回路の読み出しが、ROD と SROD に分離されることになる。SROD は、NSL および TTC-Fanout ボードのデータを イーサネットケーブルと GbE で高速に送信する。SROD は、PCIe バス規格に対応 した S-LINK 通信用のカードを搭載しており、ROS への高速なデータ送信が可能で ある。

## 3.5 トリガーパフォーマンス

初段エンドキャップミューオントリガーは、安定して効率よく高運動量ミューオ ンをトリガーしなければならない。Tag-And-Probeと呼ばれる手法を用いて、初段 ミューオントリガーの効率を見積もっている。2018年の各垂直運動量閾値における トリガー効率を図 3.15 に示す。解析において Z ボソンの崩壊によるミューオンペア



図 3.11: NSL のダイヤグラム [10]。SSC ごとに CW を用いてトリガー判定を行う。



図 3.12: SSC における TGC-BW のトリガーアルゴリズム [10]。RoI8 つ分の領域に 対応する 1 つの SSC に対してトリガーが判定される。



図 3.13: TGC 検出器における TTC システムの概観 [8]。CTP が発行した L1A 信 号を、LTP、TTCvi、TTCex、TTCrx を用いて TGC 検出器全体に配布している。 TTCrx は SPP に搭載されており、そこから SLB と SL に信号が伝達される。



図 3.14: NSL から SROD へのデータ転送 [10]。SROD は、GbE スイッチを用いて、 SROD 1 台あたり 12 台の NSL と 1 台の TTC-Fanout ボードのデータを高速に読み 出すことができる。SROD は PCIe バス規格に対応した出力ポートを持ち、ROS や CTP に高速にデータを送信することができる。

のうち、一方(タグミューオン)が後段トリガーを通過してデータ取得されたとき、 もう一方のミューオン(プローブミューオン)が初段ミューオントリガーを通過した 割合を示している。この手法によって、トリガーシステム自身のバイアスを受ける



図 3.15: 2018年の各垂直運動量閾値のトリガー効率 [11]。エンドキャップ部における、プローブミューオンの精密測定運動量に対する各垂直運動量閾値での初段トリ ガー判定効率を表している。

ことなく、トリガー効率を求めることができる。精密測定で求めたプローブミュー オンの運動量に対する、各垂直運動量閾値の初段ミューオントリガーの効率を示し ている。初段エンドキャップミューオントリガーはミューオンの垂直運動量をよく 識別しており、トリガー効率のプラトーは9割ほどになっている。

TGC 検出器は  $1.05 \le |\eta| \le 2.40$  の領域に設置されている。初段エンドキャップ ミューオントリガーは、この TGC 検出器が設置されている領域全体にわたって、安 定して高い効率でミューオンの飛跡を検出、トリガーしなければならない。

Run-2における初段エンドキャプミューオントリガー効率の位置依存性を図 3.16 に示す。2018年の垂直運動量閾値 20 GeV の初段ミューオントリガーの効率を示し ている。エンドキャップ領域とフォワード領域にそれぞれ、TGC 検出器の空間的な アラインメントを行うための穴が開いており、トリガー効率が低下している。

エンドキャップ部トロイド磁石とバレル部トロイド磁石の境目付近にあたる領域 でトリガー効率が低下している。 $1.05 \le |\eta| \le 2.40$ の、TGC 検出器が配置されて いる領域の中に、トリガー発行効率が低い領域が複数確認できる。バレル部トロイ ド磁石とエンドキャップ部トロイド磁石の境目では、磁場の重なりによって磁場強 度が弱くなってしまい、ミューオンを十分に曲げることができないところがある。  $|\eta| \sim 1.4$ ,  $|\eta| \sim 1.6$ の領域には、ミューオンを十分に曲げることができず、トリガー ロジックを実装すると、トリガーレートが5~10 倍ほど高くなってしまう RoI があ る。このような RoI は、トリガーが発行されないように、あえてマスクが施されて いる。



図 3.16: 2018 年の垂直運動量閾値 20 GeV のトリガー効率 [11]。エンドキャップ領 域とフォワード領域にそれぞれ、TGC 検出器の空間的なアラインメントを行うため の穴が開いており、トリガー効率が低下している。 |η| ~ 1.4、 |η| ~ 1.6 の領域は、 エンドキャップトロイド磁石とバレルトロイド磁石の境界となっており、磁場の強 度の低下によってミューオンを十分に曲げることができず、トリガーレートが高く なってしまうため、トリガーロジックにあえてマスクを施している。

上記のような既知の不感領域以外でトリガー効率が低下しているところは、検出 器やエレクトロニクスの不調により、高電圧の供給を停止しているところである。

図 3.16 で示すように、一部の場所でトリガー効率の低下はあるものの、1.05 ≤ |η| ≤ 2.40 の領域全体にわたって、高いトリガー効率を実現している。安定して高い トリガー効率を保つためには、検出器の全ての読み出し、トリガーエレクトロニク スが、常に正常に動作していることを確認し、意図しないトリガー効率の低下を防 がなければならない。

各垂直運動量閾値に対して、1.05 ≤ |η| ≤ 2.40 の領域全体にわたって高いトリガー 発行効率を維持するためには、トリガー効率低下の原因を把握し、検出器システムに 対して常に適切な処置を施していなければならない。エレクトロニクスの異常によ るトリガー効率の低下は、問題を把握し、解決することが容易ではなく、初段ミュー オントリガーシステムのパフォーマンスを不安定にする。TGC 検出器を用いた初段 エンドキャップミューオントリガーシステムは、ASD、SLB、HPT、NSL、ROD、 SROD など、様々なモジュールを用いており、その全てのモジュールで異常が発生 する可能性がある。全てのモジュールとその通信に異常がないことを確認するため に、キャリブレーションを行い、システムの安定性を確保することが必要である。

# 第4章 初段エンドキャップミューオン トリガーのキャリブレーション

エンドキャップ初段ミューオントリガーは、ATLAS実験における物理解析のため にミューオンのデータを効率よく取得し、システム全体のパフォーマンスを実験期間 全体にわたって安定させなければならない。トリガーシステムとして安定したミュー オントリガー判定を提供するために、システムが正しく動作していることを確認す るためのキャリブレーションを適宜行う必要がある。キャリブレーションにおいて は、確認するベきハードウェア、確認項目が多岐にわたるため、一部の作業を自動 化したキャリブレーションシステムが必要である。Run-3でNSWが導入され、トリ ガー判定回路およびデータ読み出しシステムがアップグレードされるため、本研究 ではそれに合わせてキャリブレーションシステムを最適化した。本章では、Run-3 におけるキャリブレーションシステムについて述べる。

## 4.1 キャリブレーションで確認するべき問題

TGC検出器を用いたハードウェアベースのトリガー発行・データ読み出しは、LHC のバンチ衝突に同期して行われている。キャリブレーションでは、TGC検出器の読 み出しシステムとトリガーシステムが、LHCクロックに同期して正しく情報を入出 力していることを確認しなければならない。読み出しモジュールへの入力信号のタ イミングは、ケーブルの長さによってチャンネル毎に異なる。ハードウェアにはそ れぞれ内部クロックがあり、クロックと入力信号のタイミングを調整しなければな らない。SLBの Coarse Delay によって 25 ns、Patch Panel の Fine Delay によって 0.9 ns ステップで、チャンネルごとに入力信号のタイミングを調整している。クロッ クと信号のズレや、エレクトロニクスの電磁ノイズによるビット異常は、ハードウェ アの通信、演算に異常をきたす。ケーブルからの信号の入力タイミングにはふらつ きがあり、信号の入力タイミングは確率分布で表される。図 4.1 に示すように、確 率分布で信号が最も遅く到達するケーブルに合わせて、全てのチャンネルに Delay を施している。

図 4.2 に示すように、ケーブルから入力された信号に対して、LHC クロックの位 相を同期させ、信号の確率分布に合わせたゲート幅を用意し、バンチ識別を行って いる。信号が到達するタイミング、クロックの位相、ゲート幅がうまく調整されて いないと、ハードウェア間の通信においてビットエラーが生じ、トリガーシステム に異常をきたす。

キャリブレーションでは、テスト用の信号を用いて、TGC 検出器からの入力信号、 LHC クロック、トリガー信号を用意し、入力信号に対してシステムが正しく動作し、



図 4.1: 信号タイミングの調整 [8]。ケーブルからの入力信号の確率分布に対して、 一番遅いケーブルに合わせて他のケーブルの信号を遅らせる。



図 4.2: ゲート幅設定 [8]。ケーブルからの入力信号の確率分布に対して、LHC ク ロックの位相をあわせ、確率分布を覆うようにゲート幅を設定する。

期待される出力が得られることを確認する。キャリブレーションが必要なハードウェ アモジュールは多岐にわたるため、一部の作業を自動化したキャリブレーションシ ステムが構築されている。キャリブレーションシステムのデザインは初段ミューオ ントリガーシステムのデザインに依存するため、Run-3におけるアップグレードに 伴い、システムを最適化した。

# 4.2 初段エンドキャップミューオントリガーシステムに 対するキャリブレーション

初段エンドキャップミューオントリガーシステムのキャリブレーションとは、主に 検出器のヒット情報の読み出しエレクトロニクスと、トリガー判定回路が正しく動 作していることを確認することである。図 4.3 に示すように、LHC は毎日衝突実験 を行い、実験ごとに LHC ビームを発生させない時間がある。LHC でビーム衝突が



図 4.3: LHC ビームのルミノシティ[12]。LHC は毎日衝突実験を行っており、実験 ごとにビームを発生させない時間がある。このような時間を使って、ATLAS 検出器 のキャリブレーションを行う。キャリブレーションはほぼ毎日行われる。

起こっていない状態で、初段エンドキャップミューオントリガーシステムのフロン トエンドにてテスト用のパルス信号を発生させ、テストパルスの信号を受け取った エレクトロニクスの出力を解析することによって、システムの状態を判断する。テ ストパルスのパターンおよび動作モードによってキャリブレーションのメニューは ASD テスト、ランダムテスト、トラックテストの3つがある。ASD テストでは、フ ロントエンドエレクトロニクスにおける ASD の全てのチャンネルにテストパルスを 入力し、検出器のヒット情報が正しく出力されているかを見る。得られたデータか ら、検出器のチャンネルごとの各バンチタグごとのイベント数を確認し、入力した テストパルス量に相当する出力がカレントバンチに反映されているかどうかを確認 する。ランダムテストでは、トリガー信号のみを入力し、電気的なノイズなどによ る期待しないヒット情報がどれだけ発生しているかを見る。得られたデータから検 出器のチャンネルごとのヒット数を確認し、ノイズによるヒットがどれだけあるか を確認する。トラックテストでは、擬似ミューオントラックに対応するテストパル スのパターンをフロントエンドに設定し、テストパルスを SLB から入力する。NSL のトリガー情報と検出器の読み出し情報を比較することで、トリガー判定回路の動 作を確認する。得られたデータから、トリガーロジックにおいてトリガーが発行さ れた RoIを抽出し、テストパルスパターンのデータベースを参照して、データベー スに登録されている検出器のチャンネルにヒットがあるかどうかを確認する。デー タベースに登録されているテストパターンに対応する出力が十分であるかどうかを 確認する。

ASD テストの概念図を図 4.4 に示す。TGC システムにおけるフロントエンドエレ クトロニクスの最も末端にある ASD チップにて、全てのチャンネルにテストパル スを入力し、同時にデータ取得のためにトリガー信号を入力する。トリガー信号を 受け取ったハードウェアは、各チャンネルのヒット情報を後段システムに送信する。



図 4.4: ASD テストの概観。フロントエンドエレクトロニクスの末端から TGC シ ステムの全チャンネルにテストパルスを挿入し、LTP からトリガー信号を入力する。 読み出しシステムが正しく動作していれば、入力した信号は全てカレントバンチに 出力されているはずである。

ヒット情報は、トリガー信号を基準に、プレビアス、カレント、ネクストバンチの ものがある。全てのチャンネルにおいて、入力したテストパルスと同等のイベント がカレントバンチに出力されていることを確認する。

ランダムテストの概念図を図 4.5 に示す。ランダムテストにおいては、テストパ



図 4.5: ランダムテストの概観。テストパルスを入力せず、トリガー信号をランダ ムなタイミングで入力する。本来であれば、全てのチャンネルの全ての読み出しバ ンチ衝突タグにおいて、出力はないはずであるが、電磁ノイズなどに起因するヒッ ト情報が読み出されることがある。

ルスを入力せず、トリガー信号をランダムなタイミングで入力する。本来であれば、 ビーム衝突もなく、テストパルスもない状態では、全てのチャンネルの全ての読み 出しバンチ衝突タグにおいて、出力はないはずであるが、TGC検出器のチェンバー の劣化や、エレクトロニクスの電磁ノイズなどに起因するヒット情報が読み出され ることがある。こうしたノイズは、TGCシステム全体の健全性に悪影響を及ぼすた め、ノイズが多いチャンネルを同定するためのテストを行う。

トラックテストの概念図を図 4.6 に示す。トリガーロジックは、ヒット情報のチャ



図 4.6: トラックテストの概観。トリガーロジックにおける判定基準を再現した、 仮想ミューオントラックに対応するテストパルスのパターンを入力する。カレント バンチにおけるトリガーロジックの判定結果およびチェンバーのヒット情報が、入 力したテストパルスと同等の出力になっていることを確認する。

ンネルパターンを用いてトリガー判定を行っている。トリガーロジックにおける判 定基準を再現した、仮想ミューオントラックに対応するテストパルスのパターンを 用意すれば、それに対応したトリガー判定結果と、チェンバーのヒット情報が読み 出されるはずである。トリガー判定を行うトリガーセクターごとにテストパルスの パターンをいくつか設定し、テストパルスとトリガー信号を入力する。全てのトリ ガーセクターにおける全てのテストパルスパターンにおいて、カレントバンチにお けるトリガーロジックの判定結果およびチェンバーのヒット情報が、入力したテス トパルスと同等の出力になっていることを確認する。

## 4.3 データ取得

Run-3において、NSW、NSL、SRODの導入に伴い、初段エンドキャップミュー オントリガーシステムの枠組みが変更される。これにより、キャリブレーションに おけるデータ取得においても、変更が必要になる。図4.7に示すように、従来ではト リガー判定およびヒット情報の全てがRODに集約されており、VMEを介した ROD 単位でのデータ取得が行われていた。Run-3では、NSLの読み出しは SROD によっ て行われ、従来のデータ取得を用いたキャリブレーションは行えない。よって、図 4.8に示すように、ATLAS の TDAQ システムのより後段に位置する SFO にて ROD と SROD の情報を集約し、データを取得する。ROD,SROD から ROS への接続では PCIe 規格を用いており、SFO におけるデータ取得では、より高速によりたくさん のデータを読み出すことが可能になる。



図 4.7: Run-2 におけるキャリブレーションのためのデータ取得。トリガー判定およ びヒット情報の全てが ROD に集約されており、VME を介した ROD 単位でのデー タ取得が行われていた。



図 4.8: Run-3 におけるキャリブレーションのためのデータ取得。ATLAS の TDAQ システムのより後段に位置する SFO にて ROD と SROD の情報を集約し、データを 取得する。PCIe 規格を用いてより高速によりたくさんのデータを読み出すことが可 能になる。

## 4.4 トラックパターンの最適化

トラックテストでは、様々なパターンのミューオントラックに対応するテスト信 号を入力し、ハードウェアの演算や通信の様々なパターンに対応することが望まし い。Run-2における VME を用いた Local Strage におけるデータ取得では、通信速 度に限界があり、トラックテストに用いるトラックパターンの数を制限していた。 限られたテストパターンでは、エレクトロニクス全てに対して十分なキャリブレー ションを行うことができず、システムの異常を把握することに困難が生じることが あった。

図 4.9 は、2016 年の垂直運動量閾値 20 GeV のトリガー効率である。 $1.5 < \eta \le 2$ 、  $\phi \sim 1.5$ の領域に、トリガー効率の低下がみられるが、このトリガー効率の低下は、 検出器の配置、Hot RoI のマスク、電圧供給によるものではなく、原因を解明する ことに時間を要した。

 $1.5 < \eta \le 2$ 、 $\phi \sim 1.5$ の領域のヒット情報から、トリガーロジックの出力を調べると、トリガーロジックにおけるΦ方向のヒット位置のズレが誤って出力されていることがわかった。 $1.5 < \eta \le 2$ 、 $\phi \sim 1.5$ の領域のヒット情報をもとに、CW に相当するヒット位置のズレを抽出すると、図 4.10 に示す通り、CW ではトリガーされ



図 4.9: 2016年の垂直運動量閾値 20 GeV のトリガー効率 [11]。 $1.5 < \eta \le 2$ 、 $\phi \sim 1.5$ の領域に、検出器の配置、Hot RoI のマスク、電圧供給によるものではないトリガー効率の低下がみられる。

ないはずのところにヒットがあった。トリガー情報の間違いは、トリガーエレクト



図 4.10: 誤ったトリガー情報が得られたときのヒット情報。高運動量ミューオンの ヒット位置のズレが、ハードウェアの本来の設計から離れている。

ロニクス間の通信で起きたビットエラーが原因であったが、原因の特定に1年以上 の時間を要した。

2018年の結果(図 3.16)では、2016年にトリガーエレクトロニクスのビットエラー によって生じていたトリガー効率の低下は改善されている。問題のあるハードウェア を交換することで、トリガー効率を回復したが、この間、この領域に飛来したミュー オン事象をトリガーできず、初段エンドキャップミューオントリガーシステムの安 定性を損なった。このハードウェアの異常は、テストパターンを十分に用意してい れば、キャリブレーションによって問題の早期発見が可能だったものである。

Run-3において、SFOを用いた高速なデータ取得が可能になるため、テストパター ンを最適化し、トリガーロジックに対し完全なキャリブレーションを施す。Run-2と Run-3におけるエンドキャップ部のテストパルスに対応する RoI の分布を図 4.11 に 示す。M3-TGC の RoI 分割を黄色で示しており、赤がトラックテストで入力される



図 4.11: トラックテストのテストパルスに対応するエンドキャップの RoI の分布。 M3-TGC の RoI 分割を黄色で示しており、赤が Run-3 のトラックテストで入力され るテストパルスパターンでトリガーされる RoI である。左が Run-2 のパターンで、 右が Run-3 のパターンである。Run-2 では検出器中央部分しかキャリブレーション を施していなかったが、Run-3 で検出器面全体にキャリブレーションを施すことが できる。

テストパルスパターンでトリガーされる RoI である。TGC 検出器面全体にキャリブ レーションを施すことができるようになった。1/12 セクター内のトリガーセクター ごとの RoI の分布は図 4.12 のようになっている。トリガーセクターごとに、接続さ れるハードウェアと対応する RoI を選別し、このテストパルスパターンを用いれば、 全てのハードウェアに対してキャリブレーションが行えるようになっている。

キャリブレーションを施すテストパルスパターンの選定基準を図 4.13 に示す。全 ての RoI に対して、直線トラックのミューオンを想定し、対応するハードウェアの ID とトリガー判定に関わる入力データのビットを列挙した。トリガーハードウェア システムは、ワイヤー読み出しとストリップ読み出しで仕様が変わっている。ワイ ヤー読み出しでは、SSC1 つに対して 1 つの HPT から 1 つのヒットが入力され、RoI



図 4.12: Run-3におけるトラックテストのテストパルスに対応する 1/12 セクター内 の RoI の分布。1/12 セクターにある、エンドキャップ4つ、フォワード 2 つのトリ ガーセクターの RoI 分割と、Run-3 におけるトラックテストでテストパルスパター ンによってトリガーされる RoI を示している。

	_	Left			Right		_		Left			Right	_			Left			Right	
HPTO	Pos0	0	1	2	3		нрто	Pos0	0	1	2	3		НРТО	Pos0	0	1	2	3	
HPTO	Pos1	4	5	6	7	R	нрто	Pos1	4	5	6	7	R	нрто	Pos1	4	5	6	7	R
HPTO	Pos0	8	9	10	11	900	нрто	Pos0	8	9	10	11	900	нрто	Pos0	8	9	10	11	000
		12	13	14	15			•	12	13	14	15			:	12	13	14	15	
		16	17	18	19			•	16	17	18	19			•	16	17	18	19	
		20	21	22	23	FWI			20	21	22	23	FWI			20	21	22	23	P
		24	25	26	27	00-1			24	25	26	27	00-1			24	25	26	27	00-1
		28	29	30	31				28	29	30	31				28	29	30	31	
		32	33	34	35				32	33	34	35				32	33	34	35	
		36	37	38	39	R			36	37	38	39	R			36	37	38	39	R
		40	41	42	43	01-0			40	41	42	43	01-0			40	41	42	43	01-0
		44	45	46	47				44	45	46	47				44	45	46	47	
HPT1	Pos0	48	49	50	51		HPT1	Pos0	48	49	50	51		HPT1	Pos0	48	49	50	51	
HPT1	Pos1	52	53	54	55	R	HPT1	Pos1	52	53	54	55	R	HPT1	Pos1	52	53	54	55	R
HPT1	Pos0	56	57	58	59	01-1	HPT1	Pos0	56	57	58	59	01-1	HPT1	Pos0	56	57	58	59	01-1
HPT1	Pos1	60	61	62	63		HPT1	Pos1	60	61	62	63		HPT1	Pos1	60	61	62	63	
		Φ=0	D=1						Ф=0	Ф=1						Φ=0	Ф=1			

図 4.13: フォワード部のテストパルスパターン選定基準。フォワード部 RoI と、対応する SLB,HPT,POS, *φ* を示している。全ての RoI に対して、同じ SLB,HPT,Pos, *φ* が対応する部分を色分けしている。SLB,HPT,POS, *φ* を全てカバーできる RoI のパターンを選定した。

を同定するための Pos というビットが入力される。ストリップ読み出しでは、SSC1 つに対して1つのHPTから、SSCを左右に分けたところに1つずつ、2つのヒット とストリップ読み出しそれぞれのトリガーシステムに対応して、トリガー判定のた めの入力ビットに対してキャリブレーションを行うための RoIの組を選定した。フォ ワードワイヤー読み出しでは、トリガーセクター1つに SLB 4つ、HPT 2つ、HPT の Pos ビット 2 つのパターンがある。RoI 番号 3.22.41 は、RoI1 つに 1 つの SLB が 対応し、RoI 番号 59,60 は、2 つの RoI が1 つの SLB に対応している。RoI 番号 3, 41 が 1 つの HPT の Pos ビット 0 に対応し、RoI 番号 22 が Pos ビット 1 に対応して いる。RoI 番号 59 が 2 つ目の HPT の Pos ビット 0、RoI 番号 60 が Pos ビット 1 に 対応している。フォワードストリップ読み出しは、対応する SLB が1つしかないた め、HPT のみパターンを考える。RoI 番号 60,41 が、SSC 左側入力の φ ビット 0,1 に対応し、RoI 番号 22 が SSC 右側入力の *o* ビット 0 に対応し、RoI 番号 3,59 が、 SSC 右側入力の ø ビット1 に対応する。エンドキャップのテストパルスパターンも ンを順にシフトさせれば、全ての RoI についてキャリブレーションを施すことが可 能である。

# 第5章 モニタリングシステムの開発

第4章で述べたキャリブレーションはほぼ毎日行われる。トリガーシステムの状態を速やかに判断するために、キャリブレーションが行われるたびに円滑に解析を行う必要がある。これまでは、解析業務を手動で行っていたが、これはシステムを運用する上で負担になっていた。Run-3にむけて、より円滑なシステム運用のために、キャリブレーション結果を自動で解析し、各テストタイプに適切なモニタリングを行うためのシステムを、ウェブベースで一から開発した。本章では、開発した解析プログラム、データの管理方法、およびモニタリング手法のデザインの詳細を述べる。

### 5.1 モニタリングシステムの重要性

キャリブレーションでは、得られたデータからシステムの状態を把握するために、 テストタイプや確認項目に合わせてデータを解析しなければならない。Run-2にお けるキャリブレーションでは、データを手動で解析しており、解析作業は1時間ほ どかかっていた。Run-2における解析、モニタリングの概略を図 5.1 に示す。キャ



図 5.1: Run-2 におけるモニタリング。シフターがキャリブレーションを行い、得 られたデータをエキスパートが手動で確認、解析を行っていた。解析作業は1時間 ほどかかった。

リブレーションにおいては、シフターがキャリブレーションを行うスクリプトを走 らせ、ストレージにデータが保存される。Run-2 においては、得られたデータをエ キスパートが確認し、解析を行うスクリプトを走らせていた。全てのキャリブレー ションを行うのに45分、それぞれの結果を解析するのに1時間ほどかかっており、 エキスパートの負担となっていた。また、その場限りの解析、確認しか行っておら ず、解析結果を管理していなかったため、過去のキャリブレーション結果にアクセ スすることが困難であった。Run-3に向けて、解析作業を自動化し、WEBを介した モニタリングが可能なシステムを開発した。Run-3におけるモニタリングの概略を 図 5.2に示す。得られたキャリブレーションデータを自動で解析し、データベースを



図 5.2: Run-3 におけるモニタリング。シフターがキャリブレーションを行い、得られたデータを自動で解析する。解析結果はデータベースで管理され、WEB に表示される。エキスパートは、WEB ページを確認するだけで過去から現在までの全てのキャリブレーション結果を確認することができる。確認作業は数分程度に短縮される。

用いて解析結果を管理する。WEBを介してデータベースにアクセスし、解析結果 を閲覧することができる。エキスパートは WEB ページにアクセスするだけでキャ リブレーション結果を確認することができ、作業は数分程度に抑えられる。

Run-3におけるキャリブレーションでは、キャリブレーション用 PC の指定した SFO 領域に、得られたデータが送られてくる。SFO のデータはバイトストリーム形 式で記述されており、イベントごと、モジュールごとに、モジュールの ID やチャン ネル、バンチ衝突 ID などが記述されている。TDAQ システムの各モジュールに対応 した階層構造になっており、1 イベントのデータの中に関係するモジュールのデータ が収まっている。キャリブレーションによってハードウェアの異常を検知するために は、得られたデータから、ハードウェアの ID やハードウェア内のチャンネル、バン チ衝突 ID ごとにヒット数やトリガー数を整理し、異常なヒット、異常なトリガーを 判別しなければならない。TGC 検出器の総チャンネル数は約 30 万あり、ハードウェ ア ID やバンチ衝突の ID を整理する作業は容易ではない。決められたフォーマット のデータをデコードし、必要なデータを抽出、整理する作業を自動化するシステム が必要である。さらに、整理したデータは早急にモニタし、ハードウェアの異常を 見落とさないようにしなければならない。モニタリングのために、WEB ベースでシ ステムを開発し、SFO に得られたキャリブレーション結果を自動的にモニタできる システムを開発した。WEB を用いたモニタリングによって、確認作業を簡素化し、 初段ミューオントリガーシステム運用におけるコストパフォーマンスに貢献する。

## 5.2 モニタリングシステムの設計

キャリブレーションプロセスのデザインを図 5.3 に示す。キャリブレーション結果



図 5.3: キャリブレーションを行うプロセスとデータベースに送信する Run 情報を 示す。初段エンドキャップミューオントリガーシステムにテストパルスを打つと同 時に、ATLAS の Run 情報を管理するサービスから Run 番号を取得し、テストタイ プ、日付などと共にデータベースに送信する。

を MySQL データベースで管理し、WEB からアクセス、モニタする。キャリブレー ションを行った時点で、Run 番号、日付、テストタイプをデータベースに保存する。 生成された SFO 出力ファイルとデータベースの Run 情報を照合し、解析を開始す る。解析の後、各チャンネル、RoI のヒストグラムを画像データとして保存し、異 常のあるチャンネルや RoI を、MySQL データベースに記録する。

SFO に出力される TGC の生データは、32bit 単位のバイトストリーム形式のデー タフォーマットで記述されており、データフォーマットは図 5.4 のように定められて いる。TGC の生データはさらにフロントエンドエレクトロニクスの ID ごとにヒッ ト情報が記録されており、フォーマットが図 5.5 のように定められている。

解析の初段では、バイトストリーム形式のデータからヒットチャンネルなどの情報 を抽出し、オブジェクトデータにデコードする。デコードしたデータは、ROOT[13] のTTree クラスのオブジェクトで管理し、データが入ったファイルはバックアップと して永久保存する。生データには、ROD,SSW,SLB などのエレクトロニクスのロー カル ID と、エレクトロニクス内のローカルチャンネルがイベントごとに記録され

		Data	word		Comments
	3124	2316	158	70	
Frame		x'B0F0	)xxxx′		event frame word (control mode word)
Hdr 0		x'EE12	34EE′		start of header marker for ROD data
Hdr 1	reserved	reserved	header	size = 9	words (excluding the x'B0F0xxxx' word)
Hdr 2	ATLAS forma	t version=3.1	TGC format	version=4.0	i.e.: ATLAS=0x03'01, TGC=0x04'00
Hdr 3	0	x'67' or x'68'	0	sector[121]	source id: $x'67' / x'68' = A / C$ endcap;
Hdr 4	Run type		Run number		
Hdr 5		Level	-1 ID		High byte is Extended Level-1 ID
Hdr 6	reserved	reserved	Bunch cross	ing ID[110]	
Hdr 7	reserved	reserved	reserved	Trigger type	
Hdr 8		Detector e	vent type		not used yet
Status	Firs	st status word: s	specific   gene	ric	$\neq$ 0: event is <i>not</i> OK. See Table 2, & [ref. 1]
Status		TGC ROD e	vent status		See Table 3.
Status	ROD VME	E filter bits	Star Switch droppe	timeout or d status	one bit per SSW; Filter:1 = accepted. SSW: 1 = dropped or timed-out (see Table 4)
Status	Local stat	tus word	pres	ence	Presence indicates which of the following fragments are present <sup>a</sup> . See Tables 5 & 6.
Status		orbit o	count		orbit count; zero for first L1AID. <sup>b</sup>
Data	Fragment ID	"raw" data w	ord count <sup>c</sup>		fragment ID =1, length in words
Data	Fragment ID	"readout forn	nat" hit data w	vord count	fragment ID =2, length in words <sup>d</sup>
Data	Fragment ID	"readout form count ("trackle	nat" tracklet d et"= 3/4 or 2/3	ata word coincidence)	fragment ID =3, length in words
Data	Fragment ID	"chamber for	mat" hit data	word count	fragment ID =4, length in words
Data	Fragment ID	"chamber for count	mat" tracklet o	data word	fragment ID =5, length in words
Data	Fragment ID	HipT output	word count		fragment ID =8, length in words
Data	Fragment ID	Sector Logic v	vord count		fragment ID =9, length in words
Data	raw data, hit, t order of the wo	tracklet, sector ord counts.	logic, etc. frag	ments, in the	See [ref. 6] and[ref. 8](raw) and Tables 7 to 10.
Data					
Data	las	t raw data, hit	or tracklet wo	rd	
Trail 0	1	number of statu	ıs elements = 5		
Trail 1		number of da	ata elements		
Trail 2	Status blo	ck position = 0	, i.e. data follo	ws status	
Frame		x'E0F0	xxxx'		event frame word (control mode word)

図 5.4: TGC の生データフォーマット [14]。データは、32bit 単位のバイトストリー ム形式のデータフォーマットで記述されている。

ている。1イベントにおける検出器のヒット情報およびトリガーロジックの出力を vector に詰め、イベントごとに Tree に入力する。デコードにより抽出したエレクト ロニクスとチャンネルのローカルな ID は、モニタリングでわかりやすいように初 段エンドキャップミューオントリガーシステム全体のグローバルな ID に変換する。 データベースを参照してそれらをマッピングするサービスを外部ライブラリとして 用いる。変換したデータはヒストグラムに整理し、画像データの保存およびデータ ベースへの出力を行う。(図 5.6)

解析システムは主に、デコーダー、マッピングサービス、解析、データベースに より構成される。それぞれの機能とデータベースを図 5.7 に示すように 1 つのパッ ケージとして実装する。デコーダーは、生データを出力するモジュールに対応して 細分化している。解析は、キャリブレーションのテストタイプごとにモジュール化

### Version 01 of the TGC Front End link data format

Dec.12,2005 (after PRR) version

Event I	Hea	der	000			Nov	v, R	ecor	d T	ype=	=01																					
	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
		000		RecT	Гуре		SSV	VID								RX	mas	sk p	attei	rn (1	=en	able	d, C	=dis	able	ed)						

Record Type (RecType) is **01** in this format version, hard-wired in FPGA SSWID is arbitrarily set by a dip-switch on each SSW board

### SLB header 010

-																																
I	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
		010			S	LBI	D		0	B	Cma	р	Мо	d Ty	/pe	0		L1	ID							BC	ID					

BCmap shows 3BC data lines taken by RX. 3bit shows {next, current, previous} events. 1=adopted. 0=discarded SLBID, Mod Type, L1ID and BCID are all SLB's data. See SLB documents.

### SLB header 011 0

31 30 29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
011	0	0		F	RXIE	)		0	)	RX	FIFC	) sta	atus			S	LB-	OVF	F					F	X-C	VF			

RXID is RX identified number from 0 to 22.

RX FIFO status tells what amount of data are stored in RX-FIFO then.

SLB-OVF is SLB's data. See SLB documents.

RX-OVF is RX-FIFO overflow counter. This tells the snapshot value when this word is sent from RX to TX.

### SLB trailer 011 1 This word appears after SLB data words only when there is an error

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
	011		1	SEU	OVF	LVD	Slnk			RX	erro	or st	ate		

LVDSInk=LVDS links status. 2bits are {now,old}. 1=Not linked. 0=Linked.

SEU = SLB SEU flag. See SLB documents.

OVF = RX-FIFO overflow flag. If OVF=1, some overflows have happened in this RX data.

### SLB data 100, 101, 110

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
	100			cell	addı	ress				C	ell bi	itma	р		
	101			cell	addı	ress				C	ell bi	itma	р		
	110		(	cell	addı	ress				C	ell bi	itma	р		

In any order: Cell data for Current BC data Cell data for Previous BC data Cell data for Next BC data

#### PAD word 110

15 14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
110			1	1111						0					i.e. 0xDF00

Event Trailer 111

31 30 29	28 2	7 26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
111			0	x1C	A				Glnk	T1C	NRC	T2C						Х	(OR	che	ck s	um						

Glnk = Glink TX status. "Locked" signal of Glink Tx. 1=Not locked. 0=Locked

T1C = Timeout1\_count\_frag. Time-out to collect the event fragment from all the enabled input ports. NRC = Nores\_count\_flag. No response from RX FIFO of "enabled" (not masked) input port. T2C = Timeout2\_count\_flag. Time-out to collect the event fragment from each enabled RX FIFO. These three flags are reset at every event.

The XOR operation includes the first word(16bits) of the event header through the first word of the event trailer. When the result is XOR'ed with the XOR checksum word, the result becomes zero. (the XOR does not include the 0x0B0F an 0x0E0F framing words)

### Framing

Each event is preceeded by the 32-bit word 0x0000'0B0F and followed by the 32-bit word 0x0E0F'0000, both words are sent in Glink control mode.

図 5.5: TGCFrontEnd の生データ [14]。フロントエンドエレクトロニクスの ID ご とにヒット情報が記録されている。



図 5.6: SFO に取得した生データを解析し、結果を出力するまでのプロセスを示す。 cron で定期的にデータベースと SFO を確認し、キャリブレーションの生データが出 力されると、解析を開始する。デコードしたデータは別の場所にバックアップされ る。解析結果はデータベースに記録される。ヒストグラムは WEB からアクセスで きる記録装置に保存する。

している。実際のデコード、解析においては、パッケージから必要なモジュールを 呼びだして用いることになる。パッケージを細分化することで、データフォーマッ トの変更や含まれるモジュールの種類など、キャリブレーションを行う環境の変化 に対応した拡張性をもたせることができる。

デコードしたデータ構造を表 5.1 に示す。ROOT ソフトウェアにおける Tree クラ スは、データサイズを圧縮して蓄積することができる。そのため、キャリブレーショ ンで得られた生データをデコードした Tree を含むファイルを、バックアップとして 保存する。生データにおける TGC エレクトロニクスの情報を失わないように、記 録されている全てのハードウェア ID と出力されたビット列を記録する。

Tree に保存したハードウェア ID とビット列は、マッピングサービスを用いて実際の TGC 検出器内の領域におよびチャンネルに変換することができる。マッピング サービスによって変換された領域の ID およびチャンネルをモニタリングに用いる。 マッピングサービスが示す TGC システムの領域を図 5.8 に示す。

マッピングサービスによって変換されたヒット情報およびトリガー情報は、検出 器の領域の ID およびチャンネル、RoI ごとにヒストグラムに整形し、イベント数が 一目でわかるようにする。



図 5.7: キャリブレーション解析パッケージ構造を示す。主にデコーダーと解析パッケージ、マッピングサービス、データベースからなる。デコーダーはモジュールごとに細分化し、解析パッケージはテストタイプごとに細分化する。実際の解析では、パッケージから適宜関数を呼び出す。

変数名	型	意味
source_id	整数型	TGC の A/C サイド
$\mathrm{sector}_{\mathrm{-id}}$	整数型	TGC 検出器をφ方向に 12 に分割したセクター
ssw_id	整数型	フロントエンドエレクトロニクス SSW の ID
rx_id	整数型	フロントエンドエレクトロニクス RX FPGA の ID
slb_id	整数型	フロントエンドエレクトロニクス SLB の ID
$index_BC$	整数型	カレントバンチを1とした、トリガー前後のバンチクロスタグ
celladdr	整数型	SLB データのアドレス
cellbmp	整数型	celladdr 内の生データのビット列

表 5.1: ROD の生データのデコードに用いる Tree の Branch。ハードウェア ID、 ハードウェアからの生データ、バンチタグを1つの組にして保存する。Tree データ はバックアップとして半永久的に保存する。

### 5.3 キャリブレーション結果の管理

Run2のデータを用いて、キャリブレーションデータを解析した。各テストタイプ のモニタリングに必要なヒストグラムを出力し、MySQLにデータを出力した。

ASD テスト、ランダムテストの解析では、各セクター、 $\phi$ 、ワイヤー/ストリップ、 エンドキャップ/フォワードごとに PDF ファイルをつくり、さらに Layer、rID ごと の各チャンネルのイベント数を、バンチタグ別にヒストグラムに表示する。

ASD テストの結果を図 5.9、5.10 に示す。 検出器のチャンネルごとに、得られた イベント数を示している。イベントが多いチャンネルは、正しく導通していること がわかる。ハードウェアの ID とチャンネルを、検出器システム全体で統一したチャ



図 5.8: TGC システムのパラメータ。A/C サイド、1/12 セクター、*φ*、レイヤーを 用いて、トリガーセクターを同定することができる。トリガーセクターの中にはさ らに RoI や検出器のチャンネルが定義されている。

ンネルに変換している。最初からエレクトロニクスが接続されていないチャンネル や、読み出しエレクトロニクスのチャンネルが重複しているところがある。ASD テ ストでは、接続されているべきチャンネルにイベントが出力されているかどうかや、 重複しているチャンネルのイベント数が正しく増えているかどうかを確認する。

ランダムテストの結果を図 5.11、5.12 に示す。 ランダムテストでは、ランダムト リガーの入力に対して検出器の出力が 10<sup>-4</sup> 以下であることを確認する。ランダム トリガーを 10<sup>5</sup> 回入力した場合には、出力が 10 以上あるチャンネルをノイズが多い チャンネルとみなす。

WEB からはこの PDF を単位にアクセスし、各チャンネルのイベント数をモニタ する。ASD テスト、ランダムテストそれぞれ、各チャンネルのイベント数の閾値を 設け、導通が不安定なチャンネル、ノイズが多いチャンネルを MySQL に出力する。 出力する MySQL のテーブルを図 5.2 に示す。

トラックテストでは、テストパターンのデータベースと解析結果を照合し、期待されるテストパターンが正しくトリガーされているかを確認する。トラックテストの結果を図 5.13 に示す。カレントバンチで正しくトリガーされた数と他のタイミングも含めてトリガーされた数の比を示すヒストグラムを、セクター、*φ*、エンドキャップ/フォワードごとに作成する。

トリガーイベント数またはカレントバンチの割合のいずれかが少ないテストパター ンの RoI を MySQL に出力する。出力する MySQL のテーブル図 5.3 に示す。



図 5.9: ASD テストのワイヤー, エンドキャップのヒストグラム。1 つのトリガー セクターに対応する領域について、Layer 数ごとに結果を並べている。1 つのヒスト グラムは、チャンネルごとのイベント数を表している。イベントが多いチャンネル は、正しく導通していることがわかる。最初からエレクトロニクスが接続されてい ないチャンネルや、読み出しエレクトロニクスのチャンネルが重複しているところ がある。



図 5.10: ASD テストのストリップ, エンドキャップのヒストグラム。ワイヤーのヒ ストグラムの並べ方に加え、ホイール縦方向の分割ごとにヒストグラムを表示して いる。イベントが多いチャンネルは、正しく導通していることがわかる。最初から エレクトロニクスが接続されていないチャンネルや、読み出しエレクトロニクスの チャンネルが重複しているところがある。

各テストパターンの詳細を確認するために、トリガー信号からのタイミングごと のテストパターンのトリガー数や、チェンバーのヒット数を示すヒストグラムを、 同じくΦ、エンドキャップ/フォワードごとに作成する。図 5.14 には、トラックテス トの各バンチにおけるテストパターンごとのトリガー数を示すヒストグラムを示し ており、カレントバンチ以外にトリガーがあるとテストパルスをカレントバンチで 認識できていないことになる。図 5.15 には、トラックテストの各テストパターンに おける RoI トリガー数とチャンバーヒット数を示しており、トリガーのイベント数 と検出器のヒット数が同じでないと、検出器のヒット情報からトリガー判定が行わ れたことが確認できない。



図 5.11: ランダムテストのワイヤー,エンドキャップのヒストグラム。イベントが 多いチャンネルは、ノイズが多いことがわかる。



図 5.12: ランダムテストのストリップ,エンドキャップのヒストグラム。イベント が多いチャンネルは、ノイズが多いことがわかる。

## 5.4 WEBページとモニタリング

キャリブレーションの結果をモニタするウェブシステムでは、MySQL に保存され たキャリブレーション結果に PHP でアクセスし、Web ページに出力する。Run 番 号をキーとして、Run 情報から解析結果にアクセスする。キャリブレーションに用 いる全ての MySQL のテーブルを図 5.16 に示す。

WEB でモニタする情報は、各キャリブレーションのログ、詳細、およびトリガー システムの状態についてのヒストリカルトラッキングである。メインページにて、各 キャリブレーションメニューの主な確認項目についてのヒストリカルトラッキング およびキャリブレーションのログを確認する。ログから詳細ページに移りセクター、 φごとに結果をモニタする。異常の多いφについては赤、正常なφについては緑で 表示している。異常なチャンネルのリストアップおよびヒストグラム画像データの 参照について、さらにリンクを用意している。詳細ページでは、リンクの引数とし て与えられた Run 番号、テストタイプ、セクター番号などから、データベースを検

変数名	型	意味
Run_Number	整数型	キャリブレーションを行った Run の番号
side	'A'/'C'	A/C サイド
EorF	'Endcap'/'Forward'	エンドキャップ/フォワード
sector	整数型	1/12 セクター
phi	整数型	1/12 セクター内のトリガーセクター
layerID	整数型	TGC 検出器の層の ID
rID	整数型	トリガーセクター内 R 方向のチェンバー
WorS	'Wire'/'Strip'	読み出しのワイヤー/ストリップ
channel	整数型	チェンバー内のチャンネル番号
number_of_event	整数型	チャンネルに出力があったイベント数

表 5.2: ASD テスト、ランダムテスト解析結果のデータベーステーブル。イベント が少ない/多い、カレント以外の BC tag にイベントが多いチャンネルについて、Run 番号、チェンバーを同定するためのパラメータ、チャンネル番号、およびイベント 数をカラムにもつ。



図 5.13: トラックテストのテストパターンごとのトリガー数とカレントバンチ割合 を示すヒストグラム。図左には、各テストパルスパターンと、テストパルスパター ンに対応する RoI がカレントバンチでトリガーされた割合を表している。トリガー ロジックの健全性には、カレントバンチにのみ多数のトリガー情報があることが求 められる。もしも前後のバンチ衝突としてトリガーされている事象があったら、こ の割合は1より小さくなる。図右には、各テストパルスパターンと、テストパルス パターンに対応する RoI がカレントバンチでトリガーされた数を表している。トリ ガーされた数が入力したテストパルスの数よりも著しく小さい場合、トリガー判定 回路が正しく動作していないことになる。

索し、異常のあるチャンネルの数やリストを表示する。開発したモニタリングシス テムのウェブページを図 5.17、図 5.18、および図 5.19 に示す。

変数名	型	意味
Run_Number	整数型	キャリブレーションを行った Run の番号
side	'A'/'C'	A/C サイド
EorF	'Endcap'/'Forward'	エンドキャップ/フォワード
sector	整数型	1/12 セクター
phi	整数型	1/12 セクター内のトリガーセクター
RoI	整数型	トリガーセクター内の RoI の番号
number_of_event	整数型	RoIがトリガーされた回数

表 5.3: トラックテスト解析結果のデータベーステーブル。トリガーが少ない、カ レント以外の BC tag にトリガーが多い RoI について、Run 番号、チェンバーを同 定するためのパラメータ、RoI 番号、およびトリガー数をカラムにもつ。



図 5.14: トラックテストの各バンチにおけるテストパターンごとのトリガー数を示 すヒストグラム。トリガー信号を受けたタイミングと、その前後のタイミングにお ける、トリガー判定回路の結果を表示している。1つのヒストグラムは、テストパ ルスパターンと、対応する RoI がトリガーされた数を表している。トリガー信号を 受けたタイミングにのみ、入力したテストパルスと同じ数のイベントがあれば、

### 5.5 まとめ

本研究では、Run-3における TGC 検出器のトリガー・読み出しシステムに対する キャリブレーションのためのモニタリングシステムを開発した。キャリブレーショ ン結果を自動で解析し、WEB でモニタリングできるようになった。データベース を用いて解析結果を管理することで、過去のキャリブレーション結果を参照するこ とができるようになった。Run-2におけるキャリブレーションの結果を用いて開発 したシステムを試験した。今後は、Run-3において NSL のデータを SROD で読み出 した場合のキャリブレーションに対応してシステムを開発し、ATLAS 実験室環境に おける実装のために、システムを最終形にしていく。



図 5.15: トラックテストの各テストパターンにおける RoI トリガー数とチャンバー ヒット数を示すヒストグラム。



図 5.16: キャリブレーションの Run 情報と解析結果についてのデータベーステーブ ル。キャリブレーションを行ったときの基本的な情報と、解析によって見つかった 異常のあるチャンネル、RoIを、Run 番号でたどることができるようになっている。

![](_page_60_Figure_2.jpeg)

図 5.17: モニタリングで最初に確認するページ。Run 番号や日付、テストタイプな どの基本情報が掲載されている。

Random detail	🗞 Random detail page x + - o X											
$\leftrightarrow$ $\rightarrow$ C (	🕂 🔶 🕐 🕜 保護されていない適信   kamimoto.web.cern.ch/kamimoto/Random.php?pagenumber=367247 🔹 🔒 😜										) :	
Random_Test F sector-phi nois	andom_Test Run_Number:367247 ector-phi noisy_channels											
Aside												
	Endcap Forward											
	W	ire			St	rip		W	ire	St	rip	
<u>1-0 1</u>	<u>1-1 0</u>	<u>1-2 0</u>	<u>1-3 2</u>	<u>1-0 0</u>	<u>1-1 0</u>	<u>1-2 0</u>	<u>1-3 0</u>	<u>1-0 0</u>	<u>1-10</u>	<u>1-0 0</u>	<u>1-1 0</u>	
<u>2-0 0</u>	<u>2-1 0</u>	<u>2-2 0</u>	<u>2-3 1</u>	<u>2-0 0</u>	<u>2-1 0</u>	<u>2-2 0</u>	<u>2-3 0</u>	<u>2-0 0</u>	<u>2-1 0</u>	<u>2-0 0</u>	<u>2-1 0</u>	
<u>3-0</u> 0	<u>3-1 0</u>	<u>3-2 0</u>	<u>3-3 0</u>	<u>3-0 0</u>	<u>3-1 1</u>	<u>3-2 0</u>	<u>3-3 0</u>	<u>3-0 0</u>	<u>3-1 0</u>	<u>3-0 0</u>	<u>3-1 0</u>	
<u>4-0</u> 0	<u>4-1 0</u>	<u>4-2 0</u>	<u>4-3 0</u>	<u>4-0 0</u>	<u>4-1 0</u>	<u>4-2 0</u>	<u>4-3 0</u>	<u>4-0 0</u>	<u>4-1 0</u>	<u>4-0 0</u>	<u>4-1 0</u>	
<u>5-0 0</u>	<u>5-1 0</u>	<u>5-2 0</u>	<u>5-3 1</u>	<u>5-0 0</u>	<u>5-1 0</u>	<u>5-2 0</u>	<u>5-3 0</u>	<u>5-0 0</u>	<u>5-1 0</u>	<u>5-0 0</u>	<u>5-1 0</u>	
<u>6-0 0</u>	<u>6-1</u> 0	<u>6-2 0</u>	<u>6-3 0</u>	<u>6-0 0</u>	<u>6-1 0</u>	<u>6-2 1</u>	<u>6-3 0</u>	<u>6-0</u> 0	<u>6-1 0</u>	<u>6-0 0</u>	<u>6-1 0</u>	
<u>7-0 1</u>	<u>7-1</u> 0	<u>7-2 0</u>	<u>7-3 0</u>	<u>7-0 1</u>	<u>7-1 1</u>	<u>7-2 1</u>	<u>7-3 0</u>	<u>7-0 0</u>	<u>7-1 0</u>	<u>7-0 0</u>	<u>7-1 0</u>	
<u>8-0 0</u>	<u>8-1 0</u>	<u>8-2 0</u>	<u>8-3 0</u>	<u>8-0 0</u>	<u>8-1 0</u>	<u>8-2 0</u>	<u>8-3 1</u>	<u>8-0 0</u>	<u>8-1 0</u>	<u>8-0 0</u>	<u>8-1 0</u>	
<u>9-0 0</u>	<u>9-1 0</u>	<u>9-2 0</u>	<u>9-3 0</u>	<u>9-0 0</u>	<u>9-1 1</u>	<u>9-2 0</u>	<u>9-3 0</u>	<u>9-0 0</u>	<u>9-1 0</u>	<u>9-0 0</u>	<u>9-1 0</u>	
<u>10-0 0</u>	<u>10-1 0</u>	<u>10-2 0</u>	<u>10-3 0</u>	<u>10-0 0</u>	<u>10-1 0</u>	<u>10-2 0</u>	<u>10-3 0</u>	<u>10-0 0</u>	<u>10-1 0</u>	<u>10-0 0</u>	<u>10-1 0</u>	
<u>11-0 0</u>	<u>11-1 0</u>	<u>11-2 0</u>	<u>11-3 0</u>	<u>11-0 0</u>	<u>11-1 0</u>	<u>11-2 0</u>	<u>11-3 0</u>	<u>11-0 0</u>	<u>11-1 0</u>	<u>11-0 0</u>	<u>11-1 0</u>	
<u>12-0 0</u>	<u>12-1 0</u>	<u>12-2 0</u>	<u>12-3 0</u>	<u>12-0 0</u>	<u>12-1 0</u>	<u>12-2 0</u>	<u>12-3 0</u>	<u>12-0 0</u>	<u>12-1 0</u>	<u>12-0 0</u>	<u>12-1 0</u>	
					Cs	ide						
			End	lcap					Forv	vard		
	Wire Strip Wire				ire	St	rip					
<u>1-0 0</u>	<u>1-1 0</u>	<u>1-2 0</u>	<u>1-3 0</u>	<u>1-0 0</u>	<u>1-1 0</u>	<u>1-2 1</u>	1-3.3	<u>1-0 0</u>	<u>1-1 0</u>	<u>1-0 0</u>	<u>1-1 0</u>	
<u>2-0 2</u>	<u>2-1</u> 0	<u>2-2 0</u>	<u>2-3 0</u>	<u>2-0</u> 0	<u>2-1 0</u>	<u>2-2 0</u>	<u>2-3 0</u>	<u>2-0</u> 0	<u>2-1 0</u>	<u>2-0 0</u>	<u>2-1 0</u>	
<u>3-0 0</u>	<u>3-1 0</u>	<u>3-2 0</u>	<u>3-3 0</u>	<u>3-0 0</u>	<u>3-1 0</u>	<u>3-2 0</u>	<u>3-3 0</u>	<u>3-0 0</u>	<u>3-1 0</u>	<u>3-0 0</u>	<u>3-1 0</u>	

図 5.18: ある Run 番号の詳細を確認するページ。トリガーセクターごとに細分化 している。異常が多いトリガーセクターは赤色、正常なトリガーセクターは緑色で 表示している。ここでは、ランダムテストの詳細を示している。

😵 Random ListUp page x +	-	σ	×
	☆ ©		:
list of strange channels of the calibration for the Random test of runnumber367247			
strange channels of the Random test will be listed			
▼ results			
▼ noisy			
. LID1rID0channel number 29 number of event 12			
. LID1rID0channel number 29 number of event 33			

図 5.19: ある Run の、あるトリガーセクターにおける、異常のあるチャンネルを 確認するページ。ここではランダムテストの結果を示している。

# 第6章 結論と展望

LHC-ATLAS 実験では、陽子陽子衝突を用いた素粒子標準模型の精密測定および 新物理探索を行っている。LHC と ATLAS 検出器は 2019 年からアップグレードを行 い、2020 年から第三期運転 (Run-3) を開始する。ATLAS 検出器の最外層設置され ているミューオンスペクトロメータは、衝突点から飛来する娘粒子のうち、高運動 量ミューオンの運動量測定を目的としている。ATLAS 実験では、限られたストレー ジリソースを有効に活用するために、物理解析に必要な事象を選別するためのトリ ガーシステムが構築されている。

ミューオンスペクトロメータを構成するミューオン検出器には、高運動量ミュー オン以外のバックグラウンド事象が検出されるため、複数の検出器のコインシデン スによって、高運動量ミューオンを識別している。エンドキャップ部では、TGC検 出器を用いた初段トリガーによって、高運動量ミューオンを識別している。LHCの アップグレードによって、LHCにおける陽子衝突の重心エネルギーおよびルミ ノシティが増加するため、エンドキャップミューオンスペクトロメータに新しい検 出器 NSW を導入し、初段エンドキャップミューオントリガーにおいても、NSW の 情報を用いたトリガー判定を行う。NSW の導入に伴うデータ量の増加に対応するた め、新型トリガー判定回路 NSL (New Sector Logic)、およびそのデータ読み出しモ ジュール SROD (Software-based ReadOut Driver)の導入が決まっている。

ATLAS実験の物理解析のために、初段エンドキャップミューオントリガーシステ ムのパフォーマンスを、実験期間全体にわたって安定させなければならない。ハー ドウェアベースのトリガーシステムが正しく動作していることを確認するために、 ハードウェアに対してのキャリブレーションを、適宜行う必要がある。キャリブレー ションに関わるハードウェアの数が膨大なため、作業を自動化したキャリブレーショ ンシステムが構築されている。キャリブレーション項目は、ASDテスト、ランダム テスト、トラックテストの3つがある。ASDテストでは、テストパルスを用いて、 検出器の読み出しシステム各チャンネルが導通していることや、決まったタイミン グで読み出しが行えることを確認する。ランダムテストでは、ランダムなトリガー 信号を用いて、検出器および読み出しシステムのノイズを確認する。トラックテス トでは、仮想ミューオントラックに対応するパターンを用いて、トリガーロジック の応答を確認する。キャリブレーションシステムは、これまでの実験でも、トリガー システムの安定性に貢献してきた。

第三期運転におけるエンドキャップ初段ミューオントリガーシステムのアップグ レードに伴い、キャリブレーションシステムもアップグレードされる。NSL の読 み出しモジュールとして SROD が導入されることにより、Run-2 まで行っていた ROD (ReadOut Driver)単位でのキャリブレーションでは、トリガーロジックのキャ リブレーションが行えなくなった。新しいトリガーシステムに対応するため、TDAQ システムのより後段にあたる SFO (SubFarm Output) でデータを取得する。Run-2 までは、VME を介して ROD からデータを取得していたが、Run-3 では、ATLAS の TDAQ と同じデータフローに従って SFO でデータを取得することで、ROD と SROD の情報を統合しつつ、高速なデータ取得が可能になった。高速なデータ取得 により、トラックテストの飛跡パターンを増やすことができるようになったため、 より最適な飛跡のパターンを一から選定した。Run-3 のトリガーシステムにおいて、 トリガー判定に関わる全てのハードウェアと、その入出力データの組み合わせに対 応したキャリブレーションを施すことができるようになった。

また、キャリブレーション結果を速やかに確認するためのモニタリングシステム をWEBベースで開発した。ほぼ毎日行われるキャリブレーションにおいて、その結 果を解析し、データを管理し、モニタリングできる状態にするまでの作業を自動化 した。ASDテスト、ランダムテスト、トラックテストの全てのキャリブレーション の情報と解析結果の詳細を MySQL データベースで管理し、トリガーセクターごと に細分化されたモニタリングによって、システムの状態が簡単にわかるようになっ た。キャリブレーション情報と解析結果をデータベースで管理することで、問題が 発覚した際に過去の情報を参照し、比較することができるようになった。

トラックテストのパターン及びモニタリングシステムは、ATLAS 実験室の PC 環 境で実装される。Run-3の開始にあたって、ATLAS 実験室におけるシステムの挙動 を確認し、期待通りのキャリブレーションが行えることを確かめなければならない。 また、開発したモニタリングシステムは、Run-2のキャリブレーションデータを用 いて試験している。最新のデータフォーマットに対応したデコードを実装し、Run-3 のキャリブレーションに対応したモニタリングシステムを最終形にする必要がある。

本研究によって、Run-3にむけた初段エンドキャップトリガーにおけるキャリブ レーションのためのモニタリングシステムの開発に、一定の指針を示すことに成功 した。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、様々な面でご協力頂いた全ての方々に、この場をお借 りして感謝申し上げます。

指導教員である前田順平先生には、開発における技術的な問題について度々相談 させていただき、発表資料の作成や修士論文の作成に関して、何度も添削していた だきました。CERNにも同行していただき、私の初めての国外渡航において、不慣 れな手続きなどの補助をしていただき、お世話になりました。神戸 ATLAS グルー プの藏重久弥先生にも、技術的な相談や発表練習、CERN 滞在に関わる手続きなど で、様々な指導、ご意見を頂きました。。そのほか、神戸 ATLAS グループの教員の 方々には、様々な角度からご意見を頂きました。粒子物理学研究室の教員、研究員 の方々には、コロキウムなどで様々なご意見を頂きました。

L1TGC グループの方々にも、大学をまたいで、CERN 現地での様々な活動に際 して、助けてもらいました。

越智敦彦先生には、検出器について基礎的なことからフロンティアに関わること まで、様々に教えていただきました。フォイルのQAQCに携わった経験は、私の視 野を広げるものであったと感じています。

山崎祐司先生には、サマーチャレンジ TA の機会をいただきました。指導者側、伝 える側の工夫と困難の一片を知る良い機会でした。サマーチャレンジで協力してく ださった御茶ノ水大学のスタッフの方々にも、時間にルーズな私と実験や準備をし ていただき、ありがとうございました。

私が TA を担当したサマーチャレンジや授業の生徒たちからも、忘れかけていた 学習の喜びを思い出させてもらう機会が多々ありました。

研究室同期のみんなには、普段の研究のちょっとした問題や、スライドのデザイ ンなどで、気軽に相談させてもらいました。山下君には、セカンドオピニオンをも らうことが多かったですが、いつも僕とは違う目線で意見をくれました。塩沢君は 怒っていることが多かったですが、怒りながらも相談に乗ってくれてありがたかっ たです。説田君は独特な考え方を示してくれることが多々あり、おかげで僕の視野 が広がったと思います。中村君はいつも柔らかい態度で接してくれました。厳しい 意見が飛び交うときには、貴重な存在でした。上野君は自分でなんでもやるタイプ で、その分物知りでした。見習うべきところが多々あったと思います。

学部時代からお世話になった美術部凌美会の方々には、私の自由すぎるふるまい を寛容に受け入れていただきまして、感謝とお詫びを申し上げます。部員には、学 部や専攻の枠をこえて様々な意見を頂きました。多種多様な背景と価値観をもつ人 間と触れ合えたこと、クリエイティビティの楽しさを教わったことは、私の研究活 動を大いに助けるものであったと確信しています。

# 参考文献

- [1] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the Phase-I Upgrade of the ATLAS TDAQ System, Technical Report CERN-LHCC-2013-018, 2013.
- [2] 竹田康亮, LHC-ATLAS 実験 Run-3 におけるデータ読み出しシステムの開発と 不感領域削減のためのトリガーアルゴリズムの性能評価, 神戸大学大学院 修士 論文, 2018.
- [3] ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, JINST **3** S08003, 2008.
- [4] ATLAS Collaboration, LuminosityPublicResultsRun2, https://twiki.cern. ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResultsRun2
- [5] SOME LHC MILESTONES, BUL-NA-2008-132, https://cds.cern.ch/ record/1125888
- [6] Longer term LHC schedule, https://lhc-commissioning.web.cern.ch/ lhc-commissioning/schedule/LHC-long-term.htm
- [7] ATLAS Collaboration, New Small Wheel Technical Design Report, Technical Report CERN-LHCC-2013-006, 2013.
- [8] ATLAS Japan group, TgcOperationInstructionInJapanese https://twiki. cern.ch/twiki/bin/view/Main/TgcOperationInstructionInJapanese
- [9] ATLAS Collaboration, Performance estimation of the Level-1 Endcap muon at Run 3, ATL-COM-DAQ-2018-033, 2018.
- [10] ATLAS Level-1 Endcap Muon Trigger group, Full Design Report of the ATLAS Level-1 Endcap Muon Trigger in the Phase-I upgrade, ATL-DA-ER-0001, 7 March 2018.
- [11] ATLAS Collaboration, L1 Muon Trigger Public Results, https://twiki.cern. ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/L1MuonTriggerPublicResults
- [12] ATLAS internal document, https://indico.cern.ch/event/732684/ contributions/3021451/attachments/1658486/2656002/ATLAS\_TGC\_ 20180530.pdf
- [13] ROOT, https://root.cern.ch

[14] ATLAS internal document, https://twiki.cern.ch/twiki/bin/viewauth/ Atlas/TgcDocument

# 付録A テストパルス詳細

Run-3における ATLAS 実験では、TGC 検出器を用いた初段エンドキャップミュー オントリガーシステムがアップグレードされる。初段エンドキャップミューオント リガーの安定性のために、ハードウェアベースのトリガーシステムに対してキャリ ブレーションが必要である。本研究では、ハードウェアシステムのアップグレード に伴い、キャリブレーションシステムを最適化した。

Run-3 では、新しいデータ取得法により、キャリブレーションにおけるトラック テストに用いるトラックのパターンを増やすことができる。本研究では、Run-3 の トラックテストに用いるトラックパターンを選定した。ここでは、Run-3 における TGC システムのキャリブレーションに用いられる、トラックテスト用パターンの選 定基準について述べる。

ピボットの TGC 検出器トリガーセクター内の RoI に対応する SLB、HPT チップ、 SLB チップが搭載されている PSB ボードの ID と、SSC 内のトリガー判定に用いる Pos、φ ビットのパターンを列挙した。PSB、SLB、HPT、Pos、φ の組み合わせに 対応し、トラックテストに用いるトラックパターンに対応する RoI を選定した。

eta\phi	0	1	2	3 PSB-SLB	HPT chip	Pos	ssc num
0	0	1	2	3 FWD0-0	HPT0		0 0
1	4	5	6	7			1
2	8	9	10	11			0 1
3	12	13	14	15			1
4	16	17	18	19 FWD0-1		0	0 2
5	20	21	22	23			1
6	24	25	26	27			0 3
7	28	29	30	31			1
8	32	33	34	35 FWD1-0			0 4
9	36	37	38	39			1
10	40	41	42	43		3	0 5
11	44	45	46	47			1
12	48	49	50	51 FWD1-1	HPT1		0 6
13	52	53	54	55			1
14	56	57	58	59		1	0 7
15	60	61	62	63			1

図 A.1: フォワードのワイヤー読み出しに関するトラックテスト用テストパルスの 選び方。トリガーセクター内の RoI の番号と、η方向(黄)、φ方向(青)の RoI の 番号を示している。各 RoI に対応する、ピボットプレーンの PSB、SLB、HPT の ID、および SSC の ID と SSC 内で HPT から送られてくる Pos ビットの値を横に示 す。赤または緑で塗られた部分が、トラックテスト用のテストパルスでトリガーさ れる RoI で、全ての SLB、HPT、Pos をカバーしている。

eta\phi	0	1	2	3	PSB-SLB	HPT chip
0	0	1	2	3	FSD0-0	HPT2
1	4	5	6	7		
2	8	9	10	11		
3	12	13	14	15		
4	16	17	18	19		
5	20	21	22	23		
6	24	25	26	27		
7	28	29	30	31		
8	32	33	34	35		
9	36	37	38	39		
10	40	41	42	43		
11	44	45	46	47		
12	48	49	50	51		
13	52	53	54	55		
14	56	57	58	59		
15	60	61	62	63		
φ	0	1	0	1		
	L		R			

図 A.2: フォワードのストリップ読み出しに関するトラックテスト用テストパルス の選び方。トリガーセクター内の RoI の番号と、η方向(黄)、φ方向(青)の RoI の番号を示している。各 RoI に対応する、ピボットプレーンの PSB、SLB、HPT の ID を横に示す。SSC に対する左右の HPT 入力における φビットの値を下に示す。 赤または緑で塗られた部分が、トラックテスト用のテストパルスでトリガーされる RoI で、全ての SLB、HPT、φをカバーしている。

eta\phi	0	1	2	3	PSB-SLB	HPT chip	Pos	ssc num
0	0	1	2	3	EWD0-0	HPT0	1	0
1	4	5	6	7	EWD0-1	HPT1	(	) 1
2	8	9	10	11				1
3	12	13	14	15	5		(	2
4	16	17	18	19				1
5	20	21	22	23	EWD1-0			3
6	24	25	26	27	,			1
7	28	20	30	31				4
8	32	33	34	35				1
0	36	37	38	30				5
10	40	37	10	10	EVIDI-I			1
10	40	41	42	43	,			
11	44	45	40	47				<u>/</u>
12	48	49	50	51	ENVIDO O	UDTO		
13	52	53	54	55	EWD2-0	HP12		2 /
14	56	57	58	59			1	
15	60	61	62	63	5			8
16	64	65	66	67	′		1	í <u> </u>
17	68	69	70	71	EWD2-1		(	) 9
18	72	73	74	75	5		1	( <u> </u>
19	76	77	78	79	•		(	) 10
20	80	81	82	83	5		1	1
21	84	85	86	87	EWD3-0		(	) 11
22	88	89	90	91			1	1
23	92	93	94	95	5		(	) 12
24	96	97	98	99	)		1	1
25	100	101	102	103	EWD3-1	HPT3	(	13
26	104	105	106	107	7		1	1
27	108	109	110	111			(	) 14
28	112	113	114	115	ENVIDA 0			15
29	110	117	118	119	EVVD4-0			15
31	120	125	126	127			(	16
32	128	129	130	131				il
33	132	133	134	135	EWD4-1		(	17
34	136	137	138	139				<u>ا</u>
35	140	141	142	143	5		(	18
36	144	145	146	147			1 1	(1

図 A.3: エンドキャップのワイヤー読み出しに関するトラックテスト用テストパル スの選び方。トリガーセクター内の RoI の番号と、η方向(黄)、φ方向(青)の RoI の番号を示している。各 RoI に対応する、ピボットプレーンの PSB、SLB、HPT の ID、および SSC の ID と SSC 内で HPT から送られてくる Pos ビットの値を横に示 す。赤または緑で塗られた部分が、トラックテスト用のテストパルスでトリガーさ れる RoI で、全ての SLB、HPT、Pos をカバーしている。

eta\phi	0	1	2	3	PSB-SLB	HPT chip
0	0	1	2	3	ESD0-0	HPT0
1	4	5	6	7		
2	8	9	10	11		
3	12	13	14	15		
4	16	17	18	19	ESD0-0/ESD0-1	
5	20	21	22	23	ESD0-1	
6	24	25	26	27		
7	28	29	30	31	ESD0-1/ESD1-0	
8	32	33	34	35	ESD1-0	
9	36	37	38	39		
10	40	41	42	43		
11	44	45	46	47	ESD1-0/ESD1-1	HPT0/HPT1
12	48	49	50	51	ESD1-1	HPT1
13	52	53	54	55		
14	56	57	58	59		
15	60	61	62	63		
16	64	65	66	67		
17	68	69	70	71		
18	72	73	74	75		
19	76	77	78	79		
20	80	81	82	83		-
20	84	85	86	87		
21	88	89	90	91		
	00	03	04	95		S
23	96	93	08	99	ESD1_1/ESD1_2	
25	100	101	102	103	ESD1-7	
25	104	101	102	103	2301-2	
27	108	109	110	111		5
28	112	113	114	115		-
29	116	117	118	119		
30	120	121	122	123		
32	124	125	120	131		
33	132	133	134	135		
34	136	137	138	139		
35	140	141	142	143		
36	144	145	146	147		
Ψ	L		R	1		

図 A.4: エンドキャップのストリップ読み出しに関するトラックテスト用テストパル スの選び方。トリガーセクター内の RoI の番号と、η方向(黄)、φ方向(青)の RoI の番号を示している。各 RoI に対応する、ピボットプレーンの PSB、SLB、HPT の ID を横に示す。SSC に対する左右の HPT 入力における φビットの値を下に示す。 赤または緑で塗られた部分が、トラックテスト用のテストパルスでトリガーされる RoI で、全ての SLB、HPT、φをカバーしている。