

修士学位論文

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 理学研究科 物理学専攻

学生番号 166S111S

竹田康亮

指導教員 藏重久弥

2018年2月2日

概要

Large Hadron Collider (LHC) は欧州原子核研究機構 CERN に建設された世界最高エネルギーの陽子ビームを用いた陽子・陽子衝突型加速器である。LHC に設置されている ATLAS 検出器を用いて陽子同士の衝突事象を観測し、素粒子標準模型の精密測定や新物理探索を行っている。ATLAS 実験では、発生する事象のうち物理解析にとって重要と考えられる事象のみを選別しデータを記録するために、二段階のトリガーシステムを採用している。初段のレベル 1 トリガーはハードウェアベースのシステムであり、全衝突事象に対しトリガー判定を行い、 $2.5 \mu\text{s}$ 以内に 100 kHz までイベントレートを削減する。最終段のハイレベルトリガーはソフトウェアベースのシステムであり、レベル 1 トリガーを通過した事象を更に精密に測定しデータ取得のためのトリガー判定を行う。特にミュオンは検出しやすくその他の事象との識別が容易であるため、ミュオントリガーは非常に重要なトリガーの一つとなっている。

LHC は 2019 年から改良のための期間に入り、2021 年から重心系エネルギー 14 TeV、瞬間ルミノシティ $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で運転を行うため、ATLAS 実験では現行のミュオン検出器の一部を、より分解能の良い新しいミュオン検出器 (New Small Wheel : NSW) へ置き換える。NSW はミュオントリガー用検出器としても用いることが可能であり、既存のミュオントリガー用検出器 (Thin Gap Chamber : TGC) と併用する事でさらに精度の良いトリガーロジックが実装可能となる。

本研究ではまず、NSW を補完的に用いることで TGC 検出器に構造上存在しているトリガー不感領域を減らすためのトリガーロジック開発を行った。TGC 検出器には他の精密測定用検出器の位置補正を行うためのビームアライメント用の穴が空いており、TGC を通過するミュオンの軌道によってはトリガー処理を正しく行うことが出来ない。そこでアライメントホールを通過したミュオンに対して、別の場所に設置されている NSW とのコインシデンスを取る事で不感領域の削減を試み、シミュレーションデータを用いて実際にトリガーロジックが正しく動作出来ることを確認した。

さらに本研究では、データ読み出しシステムの刷新のためのソフトウェア開発を行った。NSW の設置に伴い新しいトリガー判定用回路が導入され、それに伴いデータ読み出しシステムの再開発が必要であるが、現行のデータ読み出しシステムはハードウェアベースで実装されており再開発・変更が容易ではないので、新たにソフトウェアベースのシステムへと移行させる。NSW の導入やその他のシステムの刷新により読み出しシステムが扱うべきデータ量が増加するが、開発しているソフトウェアベースのシステムは、現行のハードウェアでは扱いきれないデータ量に対しても処理する事の出来る処理性能を備えており、ソフトウェアベースの利点を活かした汎用性と運用のしやすさを兼ね備えたシステムとなる様に設計を行った。2016 年には CERN の SPS の H8 ビームラインを使った試験を行い、開発したシステムが他の読み出し回路と正しく通信を行いデータ取得が出来ることを確認した。さらに、実際の ATLAS 実験と同じデータフローを CERN のテストベンチ上に再現し、後段のシステムまで含めた統合試験を行った。この試験を通じ、開発した読み出しシステムが実験のデータフローの中で正しく動作する事を確認できたため、2021 年からの ATLAS 実験のデータ取得に使用出来ることを示すことに成功した。本研究によってこのシステムは ATLAS 実験で 2021 年より使用する事が決定している。

目次

第1章 序論	1
第2章 LHC-ATLAS 実験	5
2.1 LHC 加速器	5
2.2 ATLAS 検出器	6
2.2.1 内部飛跡検出器	8
2.2.2 カロリメーター	8
2.2.3 ミューオン検出器	10
2.2.4 Restive Plate Chamber (RPC)	11
2.2.5 Monitored Drift Tube (MDT)	11
2.2.6 Casode Strip Chamber (CSC)	11
2.2.7 Thin Gap Chamber (TGC)	14
2.2.8 TGC の配置	14
2.3 Run-3 における目標とする物理探索	14
第3章 ミューオントリガーシステムアップグレード計画	17
3.1 ミューオントリガーシステム	17
3.2 レベル1 エンドキャップミューオントリガー	17
3.2.1 トリガーエレクトロニクス	17
3.2.2 トリガー単位	22
3.2.3 Run-2 におけるトリガー効率と問題点	23
3.3 New Small Wheel の導入	24
3.3.1 Small strip TGC (sTGC)	28
3.3.2 Micromegas (MM)	28
3.3.3 New Sector Logic	28
第4章 新検出器を用いたトリガーロジック改良による不感領域削減	37
4.1 現行の Level-1 エンドキャップミューオントリガーの不感領域	37
4.2 NSW との位置マッチングを用いたリカバリーロジック	38
4.2.1 トリガー不感領域削減のためのロジック	38
4.2.2 コインシデンスウィンドウの定義	39
4.3 アライメントホールによる影響をうける RoI	39
4.4 TGC-BW と NSW のヒットの $d\eta, d\phi$ 分布	40
4.5 新ロジックによるトリガー効率の改善	41
4.6 新ロジックによるトリガーレートへの影響	44

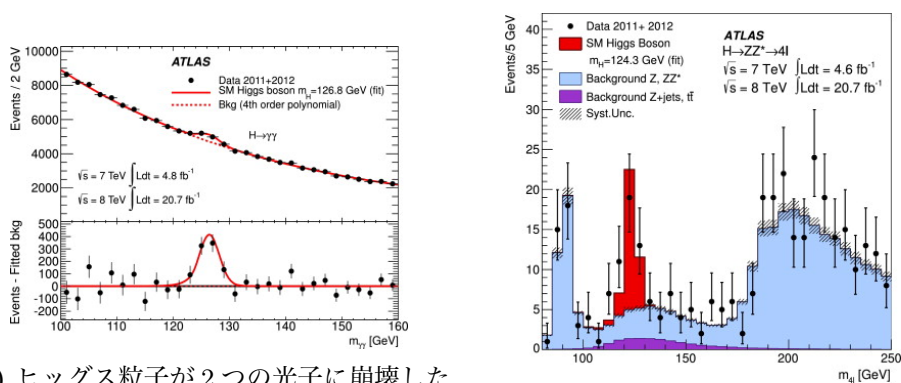
第 5 章	レベル 1 エンドキャップミュオントリガー用データ読み出しシステムの開発	47
5.1	ATLAS Trigger/DAQ システム	47
5.1.1	トリガーデータ読み出しシステム	48
5.1.2	ハイレベルトリガー発行に関するデータ処理	49
5.1.3	TDAQ ステートマシン	51
5.1.4	Object Kernel Support	53
5.2	データ読み出しシステム	53
5.2.1	Sector Logic のデザイン	55
5.2.2	TTC-Fanout Board のデザイン	56
5.3	Software-beased ROD	58
5.3.1	要求される処理能力	58
5.3.2	マルチプロセスアーキテクチャ	60
5.3.3	プロセス間通信	62
5.4	通信用の新開発の PCI-Express カード	65
5.4.1	S-LINK 規格	65
5.5	入出力データフォーマット	66
5.5.1	TTC-Fanout ボードからのデータフォーマット	66
5.5.2	セクターロジックからのデータフォーマット	67
5.5.3	ROD データフォーマット	68
5.6	SFO が出力するデータフォーマット	71
5.7	統合試験による SROD の性能評価	72
5.7.1	ビームテストによる性能評価	72
5.7.2	統合試験に用いたテストベンチのセットアップ	74
5.7.3	VME クレート	75
5.7.4	ラックマウント PC	75
5.7.5	TTC2LAN	75
5.7.6	新たに生産された Sector Logic 実機 12 台を用いた性能評価	77
5.8	DAQ システムの性能評価と課題	78
5.8.1	FILAR カードを用いた S-LINK カードの性能評価	78
5.8.2	テストベンチを用いた性能評価	79
第 6 章	結論	81
	謝辞	83
	参考文献	85

第1章 序論

欧州原子核研究機構 CERN に建設された大型汎用衝突型加速器 LHC は陽子・陽子衝突型の円形加速器であり、世界最大エネルギーの陽子ビームを用いた実験を行っている。衝突点にはそれぞれ、物理探索の手法が異なる 4 つの大型検出器が設置されており、特に本論文では全長 40 m、直径 25 m の円筒形の大型汎用検出器を用いた ATLAS 実験について述べる。

ATLAS 実験では、衝突事象により生成される事象を全て記録するのではなく、様々な物理事象による閾値を事前に設けておき、それらの条件を満たした衝突事象を記録するトリガーシステムを用いて興味のある事象を選別し、データ記録を行っている。どの様な物理事象をトリガーに用いるかは非常に重要であり、特にミュオンは最小電離損失粒子として振る舞うため、内部飛跡検出器、カロリメーターを通過する際のエネルギー損失が小さく、容易に検出器の最外層にまで届く。そのため粒子同定が容易であり、ミュオンは非常に精度良くトリガーを行うことのできる物理事象の一つである。更に W ボゾン、Z ボゾン、理論的に予言されている超対称性粒子が高い運動量を持ったミュオンを伴い崩壊するため、高い運動量のミュオンを正しく測定しトリガー判定を行う事が非常に重要となる。本論文の研究対象もミュオンを用いたトリガーシステムであり、安定的なミュオン検出器の動作は ATLAS 実験の円滑な運転には欠かせないシステムの一つである。

LHC の最初の運転 (Run-1) は 2011 年に開始され、2011 年には重心系エネルギー 7 TeV、2012 年には重心系エネルギー 8 TeV にエネルギーを上げ、瞬間最大ルミノシティ $0.6 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で運転した。約 2 年間の運転の中で、図 1.1 に示すように標準模型最後の未発見粒子であったヒッグス粒子を発見し、また標準模型における各種パラメーターの精密測定を行い現代素粒子物理学の発展に貢献することが出来た。



(a) ヒッグス粒子が 2 つの光子に崩壊した事象の不変質量を組んだ質量分布。 (b) ヒッグス粒子が 2 つの Z ボゾンに崩壊した事象の不変質量を組んだ質量分布。

図 1.1 : Run-1 におけるヒッグス粒子の探索結果 [1]。ヒッグス粒子が 2 つの光子に崩壊した時に不変質量を組んだ時の分布と、2 つの Z ボゾンに崩壊した時の不変質量の分布を示している。どちらの分布もヒッグス粒子の質量付近にピークが確認できる。

その後 LHC の性能向上のためにロングシャットダウンと呼ばれる休止期間に入り、2015 年から

2度目の運転 (Run-2) を再開した。Run-2では、重心系エネルギー 13 TeV、瞬間最大ルミノシティ $2.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ での運転を行っており、2018年まで継続する予定である。Run-2は現在も順調に継続されており、各検出器グループの安定的な動作によって目標としていた統計量以上のデータを取得する事が出来ている。Run-2の後再びLHCはロングシャットダウンの期間を設けており、2021年から3度目の運転 (Run-3) を再開させ、重心系エネルギー 14 TeV、瞬間最大ルミノシティ $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で運転を行う予定である。Run-3ではこれまで以上に高エネルギーかつ高ルミノシティ環境下での運転になるため、パイルアップと呼ばれる陽子・陽子衝突一回の衝突事象における反応数が増加し、またルミノシティ増加に比例するバックグラウンドによって検出器へのヒットレートが増加することが分かっている。現行の検出器システムのままRun-3を迎えた場合、上述の原因からヒットレート・占有率が非常に高くなり、精密飛跡測定用検出器であるミュオン検出器の性能に限界が来てしまう事が分かっている。また陽子・陽子衝突により、超前方領域にブーストされたハドロジェットが中性子を発生させ、その発生した中性子が結果として低エネルギーの陽子を生じる事がある。低エネルギーの陽子は磁場領域で大きく曲げられ興味のある物理事象であるような軌道を取る。その結果、ミュオン以外の要因による誤ったトリガー (フェイクトリガー) が発行されてしまい、トリガーレートを圧迫してしまうことが理解されている。そこでATLAS検出器の現行のミュオントリガー用検出器の一部を取り替え、新たに位置分解能・角度分解能を飛躍的に向上させた新型ミュオン検出器 (New Small Wheel : NSW) の導入を行い、さらに今まで設置されていなかった領域に補完的なミュオントリガー用検出器を設置することで、ミュオンの再構成効率を維持し、さらにフェイクトリガーの削減を行い、Run-3で予想される厳しい環境化でも安定的なデータ取得の要求を満たし動作する事を目的とした改良を行う。

NSWを用いた新しいトリガーロジックの研究はなされており、現行のエンドキャップミュオントリガー用検出器 (Thin Gap Chamber : TGC) とのコインシデンス処理を追加する事で、閾値以上のトリガー効率は維持しつつ、フェイクトリガーの削減によるトリガーレートの削減を行える事が示されている [2]。本研究では、TGCのトリガーに対する不感領域をNSWを用いて削減することができるのではないかと考案した。TGCには、ミュオンの運動量を精密に測定するための検出器の位置補正用にアライメントレーザーを通過させることができるアライメントホールと呼ばれる穴が存在しており、アライメントホールを通過したミュオンに対して適切にトリガー発行を行うことが出来ない。このような事象に対してもNSWとのコインシデンス処理を取ることで適切なトリガー発行を行うことができるのではないかと考え、トリガーロジックを開発し、その性能評価を行った。また、実際にトリガーレートがどれだけ上昇するのかを計算し、開発したトリガーロジックを導入した際のRun-2のトリガーレートに対する上昇の割合を算出した。

Run-3に向けて様々なミュオン検出器が導入されるため、トリガー判定を行うためのハードウェアモジュールの刷新 (Sector Logic ボード)、またそれに伴うデータ読み出しシステムの改良を行う必要がある。データ読み出しシステムは現行のシステムはハードウェアベースのものであるが、Run-3を迎えるにあたり汎用性の持ったシステムである事が望ましいこと、開発を行い必要となる期間までが短いハードウェアベースでの再開ではなく、ソフトウェアベースでのシステム (Software-based ReadOut Driver:SROD) の開発を行った。

SRODの基本的なシステム構成についての先行研究はなされている [3]。Linux上で動作するマルチプロセスアーキテクチャを採用したシステムとして開発し、ネットワークスイッチを介してデータ読み出しを行えるように、イーサネット経由でデータを受信する機能を実装し、基本的な動作原理についての設計が完成した。さらに、SRODはATLAS実験のデータ収集システムのフレームワークである Trigger & DAQ システム (TDAQ システム) 上で動作させるための開発を

行い、ATLAS 実験全体のシステムと同期してデータ読み出しを行うことが可能であることを示した [4]。さらに、エミュレータープロセスを用いた SROD の最適化と性能評価を行い、要求される性能を満たすシステムとしての開発を行った。

本研究では、さらに安定的に動作するように開発を行いながら、実際の ATLAS 実験のデータフローを構成するシステムとの通信試験を行うために、CERN のテストベンチ上に SROD より後段のシステムを構築した。また、Sector Logic12 台の生産を行い、実際に SROD が通信しなければならない Sector Logic の実機と同じ台数のモジュールをテストベンチ上で管理することで、本番に近い環境下での SROD の性能評価を行った。さらに SROD が後段のシステムとの通信に用いるための PCI Express カードを SROD 用の PC へと実装している。これらの環境の下で、SROD がどのような処理性能を持って動作するかの検証を行った。

本論文では、2 章で LHC-ATLAS 実験の概要について記述し、3 章で Run-3 に向けたミュオントリガーシステムのアップグレードについて述べる。4 章では Run-3 における NSW を用いる事によりトリガー効率がどのように回復することができるかを述べ、5 章ではデータ読み出しシステムのソフトウェアの概要と、CERN のテストベンチを用いた性能評価について述べる。6 章では、以上に得られた結果をまとめ、今後の課題について議論する。

第2章 LHC-ATLAS実験

2.1 LHC 加速器

Large Hadron Collider (LHC) はスイス・ジュネーブ郊外の欧州原子核研究機構 (CERN) の地下 100 m に建設された周長 27 km の世界最大の陽子・陽子衝突型円形加速器であり、LHC 加速器全体の写真を図 2.1 に示す。

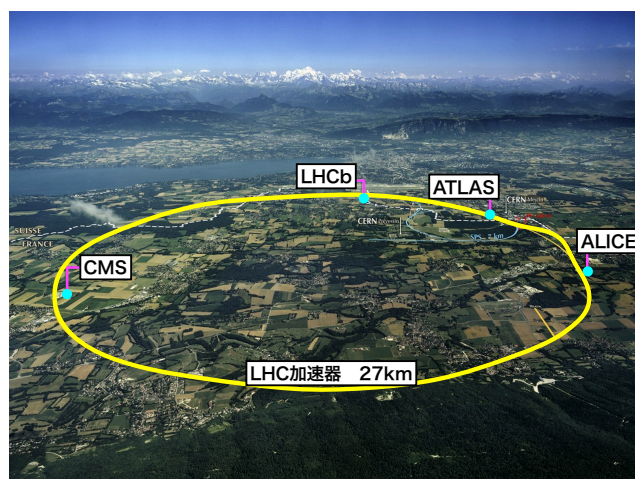


図 2.1 : LHC の航空写真。スイスとフランスの国境沿いに設置された周長 27 km の円形加速器である。

LHC の運用スケジュールを図 2.2 に示す。LHC は 2011 年に重心系エネルギー 7 TeV で運転を開始し、2 年間の衝突事象生成を行った (Run-1)。その後、ロングシャットダウン (Long Shutdown: LS) と呼ばれる加速器性能向上のための休止期間に入り、2015 年から現在まで重心系エネルギー 13 TeV での運転を行っている (Run-2)。また、Run-2 は 2018 年で終わり再びロングシャットダウン期間に入る。特にこの期間は Phase-1 アップグレード期間と呼ばれ、ATLAS 検出器も大幅に改良が加えられる。2021 年からは LHC の最高性能である重心系エネルギー 14 TeV での運転を行い、更なる新物理探索を行っていく。LHC には陽子バンチが衝突する地点が合計 4 箇所設けられており、それぞれの衝突点を目指す新物理の目標に沿った検出器が設定されている。特に、本研究では Point-1 と呼ばれる場所に設置されている大型汎用検出器を用いた ATLAS 実験について述べる。LHC に関する主要なパラメータの、Run-2 と Run-3 の比較を表 2.1 に示す。LHC の陽子ビームはバンチ構造を持っており、バンチ同士を 40 MHz の頻度で交叉させ 25 ns の間隔で陽子同士の衝突を行っている。

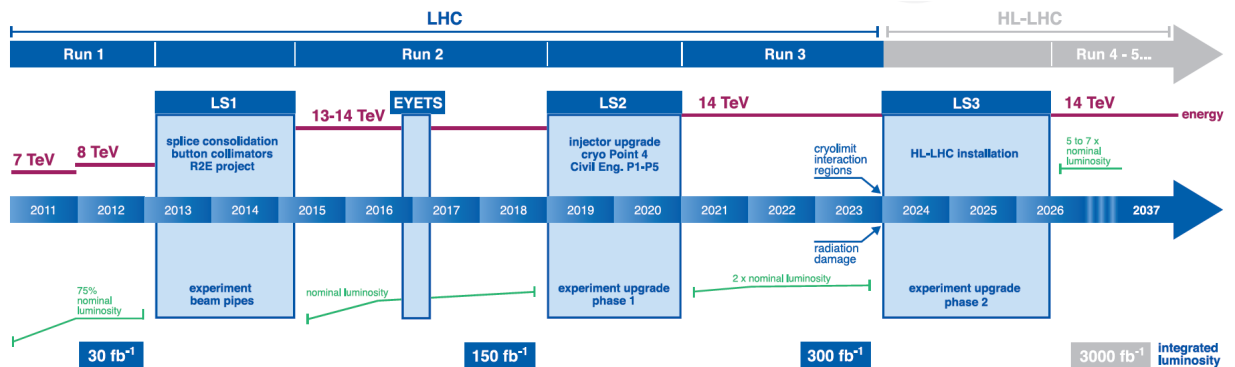


図 2.2 : LHC の運用スケジュールの概要。2011 年の Run-1 からロングシャットダウン (Long Shutdown : LS) を挟みながら LHC 加速器の性能を順調に向上させている。

	Run-2 (2015～2018 年)	Run-3 (2021～2024 年)
バンチ衝突頻度		40 MHz
バンチ当たりの陽子数		$< 1.15 \times 10^{11}$
ビームサイズ σ_x		16 μm
ビームサイズ σ_y		16 μm
重心系エネルギー	13 TeV	14 TeV
瞬間最大ルミノシティ	$2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

表 2.1 : Run-2 と、ロングシャットダウン後の Run-3 における LHC の主要なパラメーター [5]。特に重心系エネルギーの大幅な上昇、瞬間最大ルミノシティの増加が挙げられる。

2.2 ATLAS 検出器

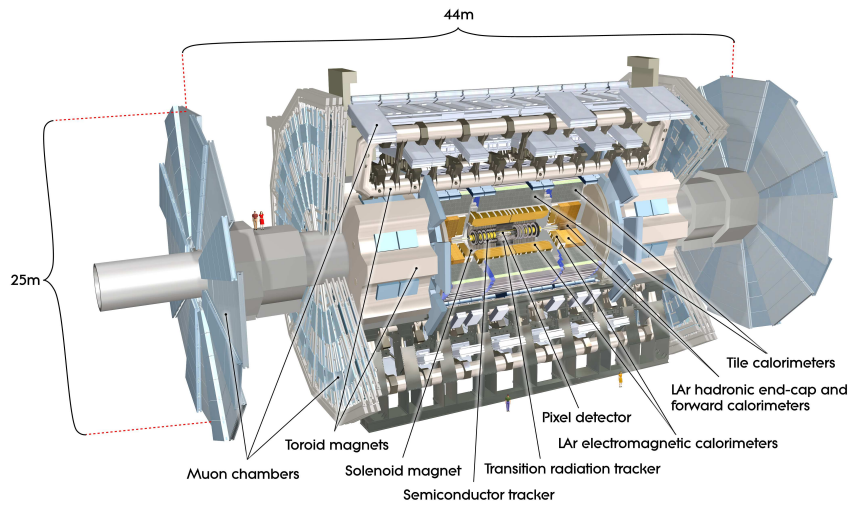
ATLAS 検出器の全体像を図 2.3 に示す。直径 25 m、全長 44 m の円筒形をした大型汎用検出器である。陽子・陽子衝突によって生成された事象を効率よく観測するために、過去に行われてきた高エネルギー衝突実験を参考に構成されており、内部から順に飛跡検出器、カロリメーター、最外層にミュオン検出器を配置している。ATLAS 検出器の座標系は図 2.3(b) に示されているように、LHC の中心を向く方向に x 軸を、ビーム軸に垂直な方向に y 軸を、ビーム軸に平行な方向に z 軸を取る。また原点からの天頂角を θ 、方位角を ϕ で表す。特に非常に高いエネルギー領域での衝突事象を観測する ATLAS 実験では、座標原点から粒子が放出される方向を示すためにラピデティの高エネルギー極限である擬ラピデティ η と呼ばれる物理量を使用する。まず、ラピデティは以下のように定義され、

$$y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_z}{E - p_z} \right)$$

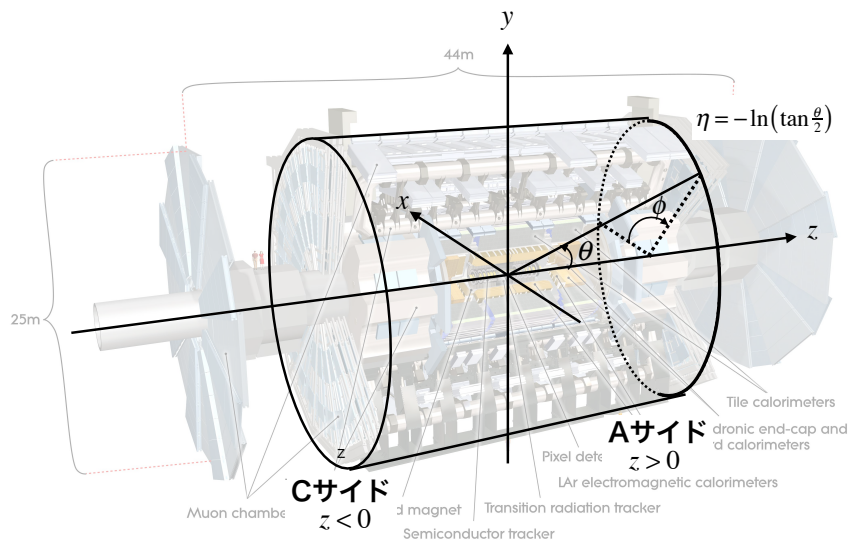
高エネルギー極限では

$$\eta = \lim_{E \rightarrow \infty} y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \cos\theta}{1 - \cos\theta} \right) = \ln \frac{\cos \theta/2}{\sin \theta/2} = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$$

と定義される。ATLAS 検出器では $z > 0$ を A サイド、 $z < 0$ を C サイド呼び、円筒の側面に対応する領域を $|\eta| < 1.03$ をバレル領域、底面に対応する領域を $|\eta| > 1.03$ をエンドキャップ領域と呼ぶ。



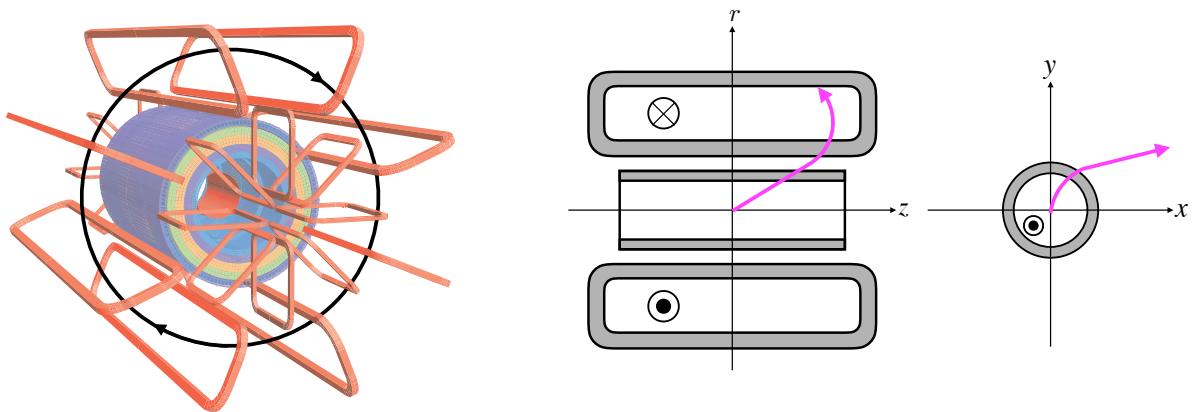
(a) ATLAS 検出器の全体像。内側から順に内部飛跡検出器、電磁カロリメーター、ハドロンカロリメーター、ミューオン検出器が設置されている。



(b) ATLAS 実験で採用されている座標系を示す。ATLAS 検出器は円筒状の検出器であり、円筒の側面に相当する領域をバレル領域、円筒の底面に相当する領域をエンドキャップ領域と呼ぶ。

図 2.3 : ATLAS 検出器の全体像 [6]。

また、ATLAS 検出器の大きな特徴の一つにトロイダル磁場を持たせていることが挙げられる。ビーム軸に沿ってソレノイド磁場を配置するためのソレノイドコイル、それらを囲むような形でトロイダル磁場をかけているトロイダル磁石を持っている。ソレノイドコイルは 2 T、バレル領域のトロイダル磁石は 1.5~5.5 Tm、エンドキャップ領域のトロイダル磁石は 1~7.5 Tm の強さの磁場をそれぞれ作る [6]。図 2.4 に設置されている磁石の概要を示す。ソレノイド磁場で、荷電粒子を ϕ 方向に曲げ内部飛跡検出器で運動量を測定する。トロイダル磁場はミューオンの運動量の測定に用いられる。カロリメーターを貫通させた後にトロイダル磁場でミューオンを r 方向に曲げることでその曲率半径を測定し、運動量の測定を行う。



(a) 矢印の方向にトロイダル磁場が形成されている。

(b) ミューオン μ^- は矢印の様な軌道に曲げられる。

図 2.4 : ATLAS 検出器を囲む超電導磁石の概要 [6]。ATLAS 検出器は特徴的なトロイダル磁場を持っていて、これによりミューオンの軌道を曲げ運動量を測定する。(a) はソレノイド磁石とトロイダル磁石の配置図であり、(b) はミューオンが生成された場合に磁場によりどの様な軌道を取るかを示した概要図になっている。

2.2.1 内部飛跡検出器

ビーム軸上の衝突点の測定を行い、またソレノイド磁場で曲げられた荷電粒子の測定を行うために ϕ 方向の位置分解能が良い。さらに、二次崩壊点の測定も行うことで長寿命粒子の識別も可能にしている。図 2.5 に示すように、内部飛跡検出器はビーム軸に近い側から 4 層のピクセル検出器、6 層のシリコンストリップ検出器、Transition Radiation Tracker (TRT) を配置している。

2.2.2 カロリメーター

図 2.6 にカロリメーターシステムの断面図を示す。内部飛跡検出器の外側に置かれているカロリメーターは大きく分けて 2 種類使用されており、電子・光子の電磁シャワーを計測するための電磁カロリメーターと、ハドロンシャワーを計測するハドロンカロリメーターである。電磁カロリメーターは液体アルゴン中に吸収体として鉛を配置したサンプリング型カロリメーターであり、電子と光子によって生じる電磁シャワーのエネルギーを測定する。電磁カロリメーターの厚さはバレル部で 24 放射長、エンドキャップ部で 22 放射長である。

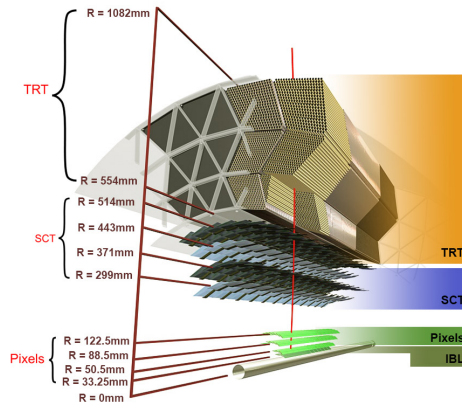


図 2.5 : ATLAS 内部飛跡検出器の断面図 [7]。

またハドロンカロリメーターは設置されている場所によって、タイルカロリメーター、液体アルゴンエンドキャップカロリメーター (HEC)、液体アルゴンフォワードカロリメーター (FCal) の 3 種類が使用されている。タイルカロリメーターは $|\eta| < 1.7$ の領域に設置されており、長さ 5.8 m の Long Barrel 部と、長さ 2.6 m の 2 つの Extended Barrel 部に分けられ、タイルカロリメーターは鉄とプラスチックシンチレーターを並べたサンプリング型カロリメーターである。最外層の D 層と呼ばれる領域 (Tile D-layer) のヒット情報はレベル 1 エンドキャップミュオントリガーの判定に使用する事ができる。液体アルゴンハドロンカロリメーターは $1.5 < |\eta| < 3.2$ の領域に設置されており、エンドキャップ領域の電磁カロリメーターのすぐ後ろに設置されている。そして、フォワードカロリメーターは $3.1 < |\eta| < 4.9$ の領域に設置されており、超前方領域まで覆うことでカロリメーターシステムがビーム軸をなるべく密閉して覆うように設計されている。

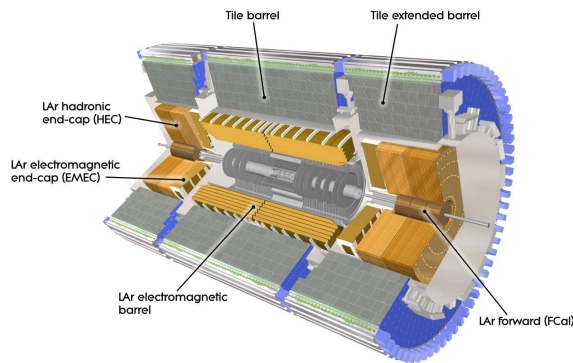


図 2.6 : ATLAS 検出器で使用されているカロリメーターの断面図。電磁カロリメーターであるバレル領域に置かれた液体アルゴンカロリメーター、エンドキャップ領域に置かれた液体アルゴンエンドキャップ電磁カロリメーター (EMEC) と、ハドロンカロリメーターであるタイルカロリメーター、エンドキャップ領域に置かれた液体アルゴンハドロンカロリメーター (HEC)、超前方領域に置かれた液体アルゴンカロリメーター (FCal) から構成されている。 [6]

2.2.3 ミューオン検出器

ミューオンは検出器の最外層まで貫通するため、ミューオン検出器は最外層に設置されている。ミューオン検出器は大きく分けて高速な応答が可能なトリガー用検出器と、精密測定用検出器の2種類に分類される。トリガー用検出器はバレル部では Resistive Plate Chamber (RPC)、エンドキャップ部では Thin Gap Chamber (TGC) を使用している。精密測定用検出器である Monitored Drift Tube (MDT)、Casode Strip Chamber (CSC) は磁場領域を挟むように設置されており、磁場によって曲げられる飛跡の曲率半径を測定することで運動量の測定を行っている。

ミューオン検出器の配置図を図 2.8 に示す。エンドキャップ領域ではミューオン検出器は円盤状のステーションと呼ばれる単位にまとめられており、衝突点に近い側から順にインナー、ミドル、アウターと呼ばれるステーションを構成している。バレル領域ではミューオン検出器は円筒状のステーションを構成しており、衝突点に近い側から順にインナー、ミドル、アウターと呼ぶ。バレル領域ミューオン検出器の x, y 断面図を図 2.7 に示す。C サイドから A サイドを見た時の断面図であり、バレル領域に置かれている MDT はラージセクターとスモールセクターと呼ばれる2種類の大きさのチェンバーにすることによって、 ϕ 方向を全て囲む様な配置にしている。また、エンドキャップ領域では MDT と CSC はステーションを構成する際に、バレル部と同様にラージセクターとスモールセクターを交互に組み合わせた形式を取っている。

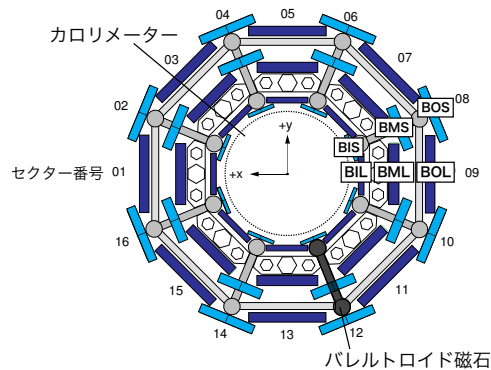


図 2.7 : ATLAS 検出器のビーム軸に垂直な方向の断面図であり、バレル部に配置されたミューオン検出器の三層の構造と、ラージセクターとスモールセクターがどのように配置されているかを示す [9]。

さらに、ミューオン検出器の配置を表す時に、ステーションの位置とセクターの大きさを示す頭文字を取って表現することがあり、用いられる呼称について表 2.2 にまとめる。

		インナー (Inner)	ミドル (Middle)	アウター (Outer)
エンドキャップ領域 E (Endcap)	L (Large Sector)	EIL	EIM	EOL
	S (Small Sector)	EIS	EIS	EOS
バレル領域 B (Barrel)	L (Large Sector)	BIL	BIM	BOL
	S (Small Sector)	BIS	BIS	BOS

表 2.2 : ミューオン検出器の位置を示す際に用いられる略語。三文字で表され、エンドキャップ領域 (バレル領域) の情報に続き、ステーションの位置、セクターの大きさを示している。

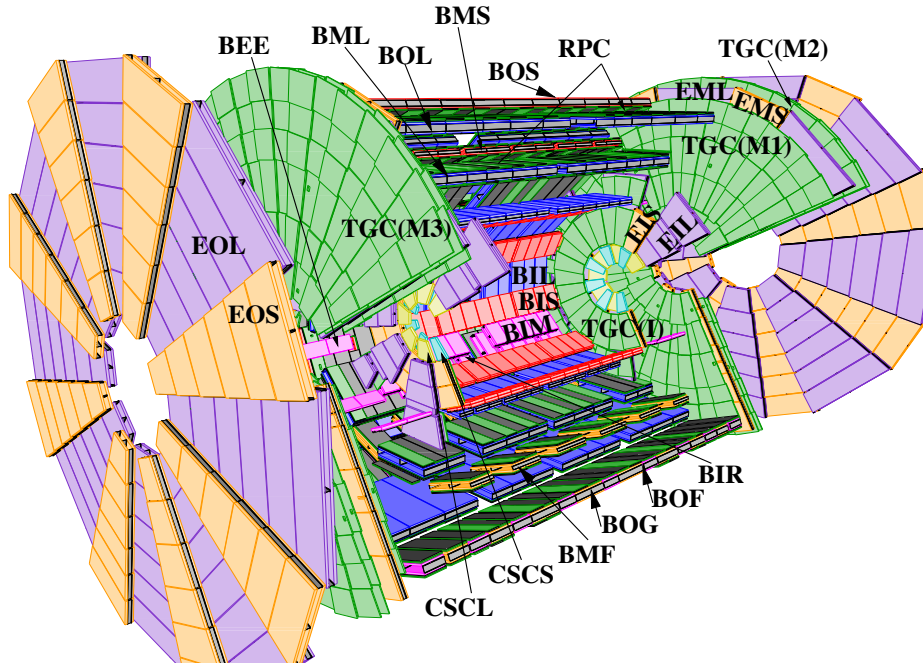


図 2.8 : 設置されているミュオン検出器の配置場所と、呼称を示している [6]。

2.2.4 Restive Plate Chamber (RPC)

1.02 < $|\eta|$ のバレル部分に設置されているレベル1 ミュオントリガー用検出器であり、ビーム軸を囲むように同心円状に3層構造設置されている。図 2.9 に示すように、2 mm のガスギャップを抵抗層で挟み、それらをストリップで挟んだ構造を取っている。ストリップは互いに直行しており、 z 方向、 ϕ 方向の測定を行うことができる。図 2.10 に示すように赤色で示されているラージセクターと青色で示されているスモールセクターの2種類の大きさのチェンバーによってバレル領域の ϕ 方向を完全に囲むように設置されている。

2.2.5 Monitored Drift Tube (MDT)

ドリフトチューブを並べた構造を取っており、エンドキャップ領域では R 方向、バレル領域では z 方向にのみ分解能を持っている。1本のドリフトチューブは図 2.11(a) に示すような直径 30 mm のカソードチューブの中心に直径 50 μm のアノードワイヤーが張られており、位置分解能は 80 μm を持っている。チェンバーとして構成する時は、ドリフトチューブを図 2.11(b) の様に並べて配置することで一つの MDT チェンバー単位を形成している。

2.2.6 Casode Strip Chamber (CSC)

2.0 < $|\eta|$ < 2.7 の超前方領域に設置されており、図 2.12 に示すように MWPC の構造を持っている。ワイヤー間隔 2.54 mm、ストリップ間隔 5.1 mm で信号の大きさの重心を求める事により位置分解能 60 μm を達成している。

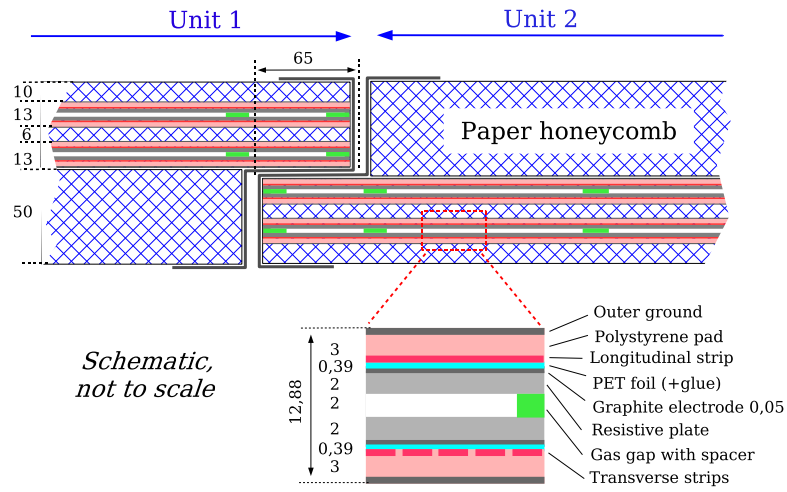


図 2.9 : RPC の断面図 [6]。

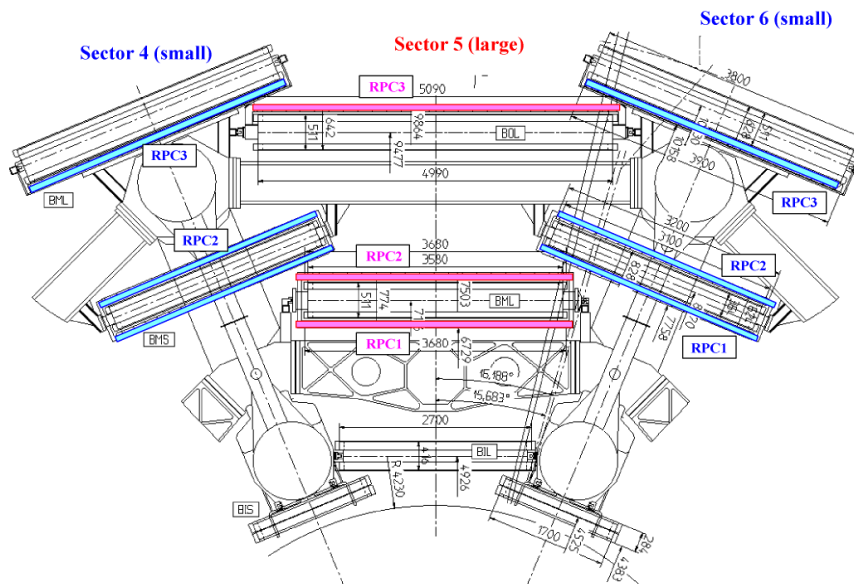


図 2.10 : ラージセクターとスモールセクターの RPC の配置図を示している。 [6]

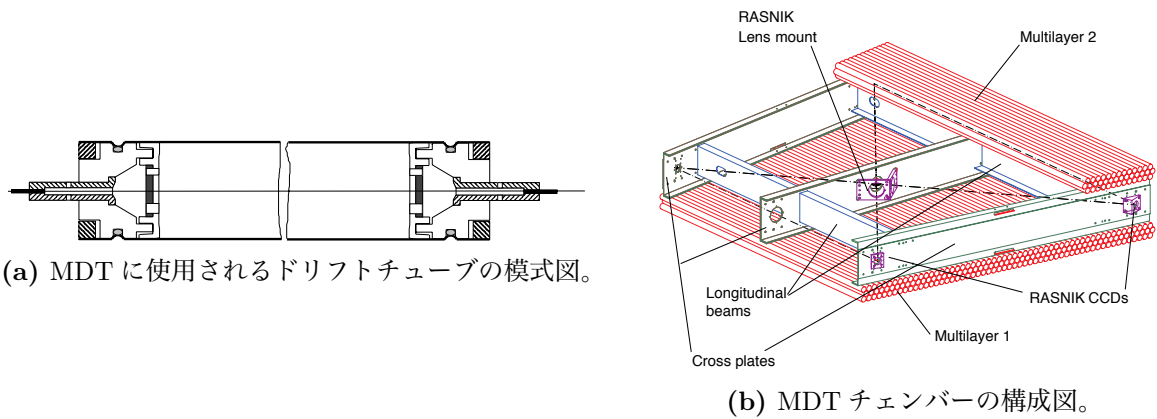


図 2.11 : MDT チェンバーの模式図。(a) に示したドリフトチューブ内を荷電粒子が通過すると、ガスがイオン化され生じた電子がアノードワイヤーから読み出される。また、(b) はエンドキャップ領域に配置される MDT チェンバーの概要図を示している。ドリフトチューブを 3 層並べた構造を取っており、また位置補正用のレーザーシステムを備えている。[9]。

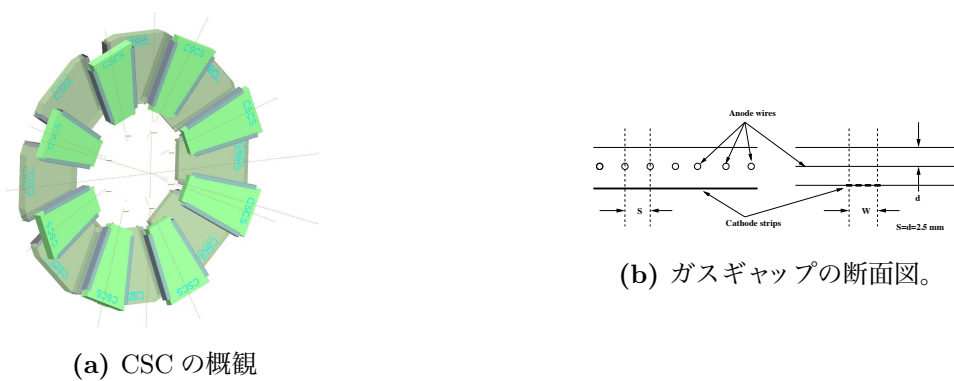


図 2.12 : CSC の模式図 [6]。(a) は CSC がスモールセクターとラージセクターを合わせてホイールを形成している概要図を示し、(b) は CSC の持つガスギャップの断面図を示す。

2.2.7 Thin Gap Chamber (TGC)

TGC はエンドキャップミュオントリガーに用いられ、レベル1 エンドキャップミュオントリガー判定のための読み出しと、 ϕ 方向の位置測定を行うことでMDTを補完する。アノードワイヤーとカソードストリップからなる2次元読み出しが可能な飛跡検出器であり、 R 方向の位置はワイヤーで測定し、 ϕ 方向の位置はストリップで測定する。生成されたミュオンがどのバンチ交叉に由来するものかを決定するために十分な時間分解能を持ち、運動量を測定するために十分な位置分解能を持っている必要がある。ガス層は2.8 mm と薄く設計することで荷電粒子が通過し発生したイオンのドリフト時間を短く抑える事でレート耐性を高め、またワイヤーピッチを要求される時間分解能を実現するのに十分な短さにしている。これにより、TGC は粒子が通過してから25 ns 以内に信号が得られる。

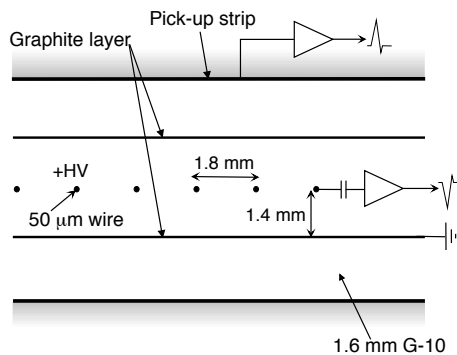


図 2.13 : TGC 検出器の持つ、アノードワイヤー、グラファイトカソード、G-10 層、ピックアップストリップ [6]

2.2.8 TGC の配置

図 2.14 に示すように TGC はトリプレット構造とダブルット構造を持つ2種類のチェンバーに分けられる。ダブルット構造とはワイヤー層と、ストリップ層をそれぞれ2層ずつ持っている構造であり、トリプレット構造とはワイヤー層を3層、ストリップ層を2層持っている構造である。また、TGC の配置を図 2.15 に示す。 $|z| \sim 7$ m 前後に位置している検出器のうち $1.2 < |\eta|$ の領域の検出器群をスモールホイール、 $|z| \sim 14$ m 前後に位置している検出器群をビッグホイールと呼ぶ。 $|z| \sim 7$ m 前後に位置し、 $|\eta| < 1.2$ の領域の TGC を TGC-EI と呼び、スモールホイールに設置されている TGC を TGC-FI と呼ぶ。また、ビッグホイールの TGC は衝突点に近い方から順に M1、M2、M3 と呼ばれ、M2、M3 はダブルット構造の検出器であり、M1 のみトリプレット構造の検出器である。

2.3 Run-3 における目標とする物理探索

2.1 節で述べたように、現在の Run-2 を終わると LHC は設計値での運転を行うための改良期間に入る。2021 年からの Run-3 では重心系エネルギー 14 TeV、瞬間最大ルミノシティ $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ での運転を行い、3 年の期間をかけて合計 300 fb^{-1} の統計量を計測する予定である。現在の Run-2

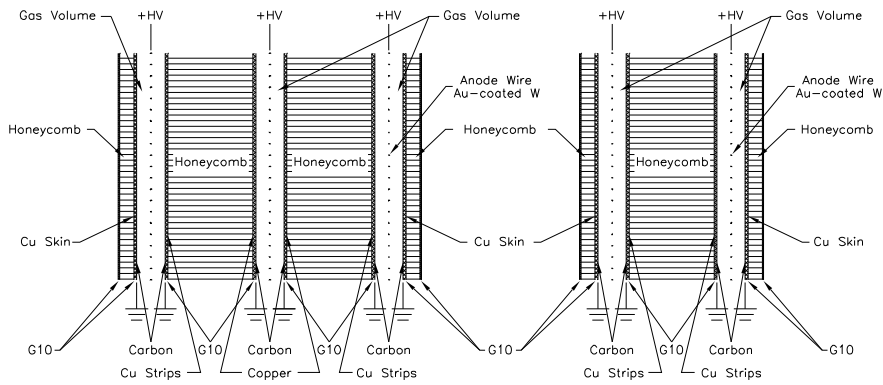


図 2.14 : トリプレットとダブルットの TGC 検出器の断面図。トリプレット構造の TGC 検出器はワイヤー 3 層、ストリップ 2 層の構造を持っている。[6]

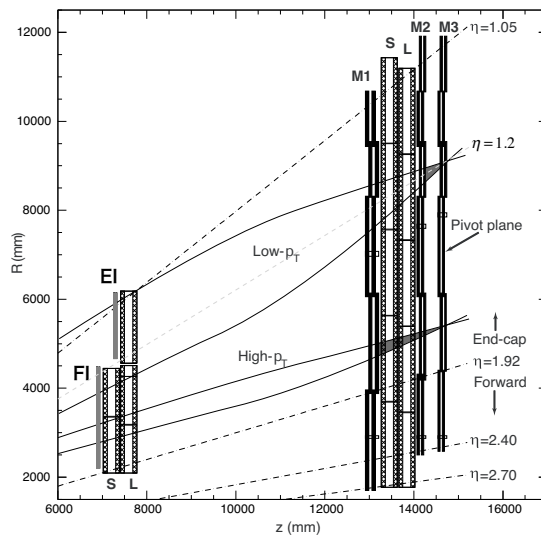
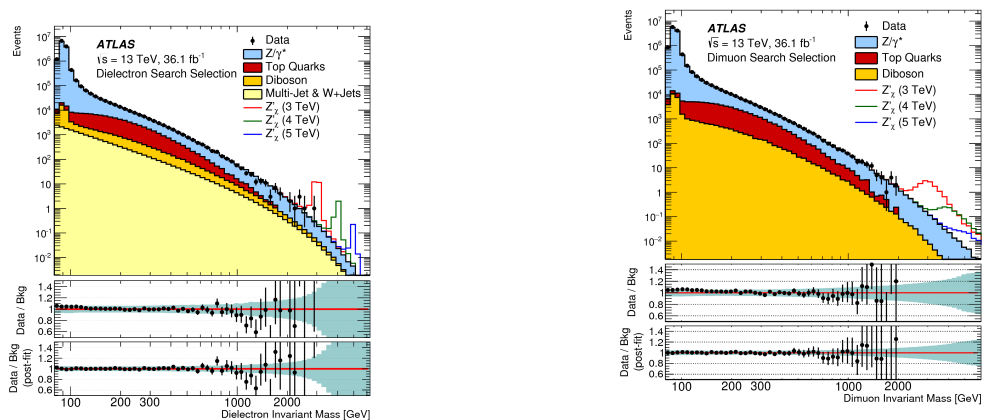


図 2.15 : TGC の配置を示す [6]。横軸にビーム軸に平行な z 軸を取り、縦軸に y 軸を取っている。

の重心系エネルギー 13 TeV からさらにビームエネルギーが上昇すること、瞬間最大ルミノシティが2倍になることから、標準理論のヒッグス粒子やトップ・クォークの生成断面積が上昇し、また高統計での物理解析を行う事ができるようになり、新物理探索に大きな貢献ができる事が予想される。

特に、重心系エネルギーが上昇する事を踏まえると未知の重たい粒子の生成断面積が上昇するので、新粒子の共鳴状態探索の感度が向上すると考えられる。特定の理論モデルを考慮せず、終状態にレプトン対を要求した解析における 2015 年から 2016 年での衝突事象による結果を図 2.16 に示す。また、標準模型を超えた理論で予想されている Z' ボソンの分布を仮定した時の質量分布も記してある。現在まで Run-2 で取得したデータにおける、レプトン対の不変質量の分布は背景



(a) 終状態に 2 つの電子を放出する共鳴状態探索。 (b) 終状態に 2 つのミュオンを放出する共鳴状態探索。

図 2.16 : 終状態に 2 レプトンを放出する反応過程の共鳴状態探索 [8]。

事象による質量分布と一致し、新粒子の兆候を発見するには至らなかった。また、 Z' ボソンに対する質量の制限を図 2.17 に示す様に、3 TeV 以上といった高エネルギー領域にまで質量の下限值がかけられている。これらの新物理探索の感度向上には、高エネルギーの運動量を持ったレプト

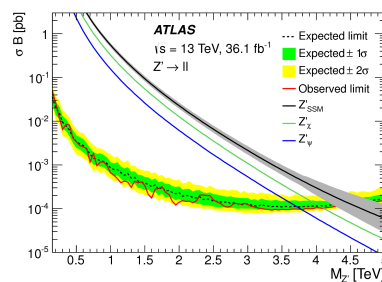


図 2.17 : 横軸に Z' の質量、縦軸に生成断面積と 2 レプトンに崩壊する分岐比の積を表している [8]。

ンを正しく再構成する技法の考案も求められるが、高統計のデータを取得できる高いビームエネルギーも求められる。LHC-ATLAS 実験では、今後またロングシャットダウンを挟み Run-3 を迎えることで、これらの新物理探索に対する感度を向上させ、素粒子物理学の発展に貢献する目的を持っている。

第3章 ミューオントリガーシステムアップグレード計画

現在の Run-2 は 2018 年まで継続され、そこから 2 年間 LHC 加速器の性能向上のためのシャットダウン期間を設けている。シャットダウン後の Run-3 では、重心系エネルギー 14 TeV、瞬間最大ミノシティが現在の約 2 倍の $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に増加させデータ取得を行う予定である。Run-3 を 3 年間継続することで最終的に合計 300 fb^{-1} の統計量を取得する。

ATLAS 検出器は Phase-1 アップグレードと呼ばれる検出器改良の期間を設けており、これにより物理探索のアクセプタンスを維持しつつ高ミノシティ環境下での稼働することが出来る。大幅なシステムの改良は主に液体アルゴンカロリメーターの読み出し回路と、エンドキャップミュオントリガーシステムに対して行われる。新しいミュオン検出器である New Small Wheel (NSW) を $1.3 < |\eta| < 2.42$ の範囲に導入する。また、NSW が覆い切れないエンドキャップ領域である $1.0 < |\eta| < 1.3$ の範囲は Run-2 でも使用されている EIL4 を補完的に用いる。

3.1 ミューオントリガーシステム

ATLAS 実験は二段階のトリガーシステムを採用しており、初段のトリガーであるハードウェアベースで処理されるレベル 1 トリガーと、後段のシステムはソフトウェアベースで更に詳細に判定されるハイレベルトリガー (High Level Trigger : HLT) に分類されている。特に、レベル 1 エンドキャップミュオントリガーはエンドキャップ領域に設置されている TGC を用いて判定を行い、レベル 1 トリガーを通過した事象はさらに MDT を用いて詳細にミュオンの運動量を測定する。

トリガー・データ読み出しシステム (Trigger & DAQ : TDAQ) の流れを図 3.1 に示す。図中の右に示されている数値は各処理終了時のデータアウトプット頻度であり、2012 年は Run-1 時点における数値、Post LS1 は現在の Run-2 における数値をそれぞれ示している。ビーム衝突頻度は 40 MHz であり、レベル 1 トリガーによってイベントレートを 100 kHz まで落とす。レベル 1 エンドキャップミュオントリガーでは TGC を Region Of Interest (RoI) と呼ばれる領域に分割した単位でトリガー判定を行う事で興味のある事象を大まかに把握する。RoI には番号が振られており、後段のハイレベルトリガーではその RoI 番号をもとに段階的に精密測定用の検出器情報を用いてミュオンの運動量を測定する事で、最終的にイベントレートを 1 kHz まで落とす。

3.2 レベル 1 エンドキャップミュオントリガー

3.2.1 トリガーエレクトロニクス

TGC 検出器情報を読み出し、レベル 1 エンドキャップミュオントリガーの判定を行うためのエレクトロニクスについて説明する。初めに、TGC M1、M2、M3 を用いた検出器情報の流れ、

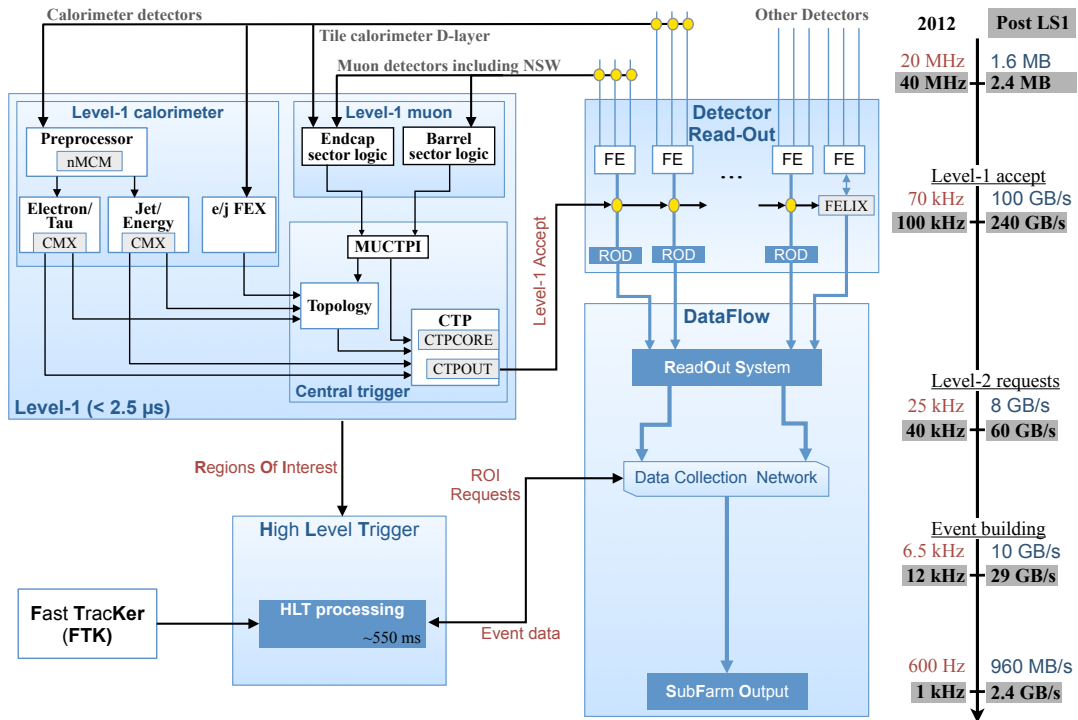


図 3.1 : Run-2 におけるデータフローの概要図 [13]。

トリガー判定のためのコインシデンス処理の流れを図 3.2 に示す。レベル 1 エンドキャップミュオントリガーシステムでは、トロイド磁場の外側に設置されている TGC を用いてトリガー判定を行う。ミュオンの運動量は、磁場によって曲げられた飛跡の曲率半径として計算を行う。ミュオンが TGC にヒット情報を残すと、検出器情報はワイヤー方向・ストリップ方向の情報がそれぞれ独立に読み出し、コインシデンス処理を順に Slave Board (SLB)、High-pt (HPT) ボード、Sector Logic (SL) で行う。SLB、HPT ボードは検出器の置かれている実験ホールに設置されており、HPT ボードのデータは 100 m 先の計測室 (USA15) まで光ケーブルで送信され、レベル 1 エンドキャップミュオントリガーの最終段の SL は USA15 に設置されている。各エレクトロニクスで処理されるコインシデンスについて説明する。

まず、TGC からの信号は SLB が受信し、コインシデンス処理を行う。コインシデンス処理は Sector Logic までワイヤー方向、ストリップ方向の情報を独立して処理する。SLB は M2 と M3 のワイヤー、もしくはストリップの計 4 層からデータを受信し 4 層中 3 層にヒットがある事を要求する。ワイヤー方向の情報から M3 上のヒット点の座標 R_3 、M2 上のヒット点の座標 R_2 を求め、これらの差 $\Delta R_{23} = R_2 - R_3$ を計算する。同様に、ストリップ方向の情報から $\Delta \phi_{23}$ を計算する。 ΔR_{23} 、 $\Delta \phi_{23}$ は無限大の運動量を持っているミュオンの軌道に対して 0 になる様に定義されている。低エネルギーのミュオンは磁場でよく曲げられるため、 ΔR_{23} 、 $\Delta \phi_{23}$ の値は大きくなり、高エネルギーのミュオンは磁場であまり曲げられず、 ΔR_{23} 、 $\Delta \phi_{23}$ の値は小さくなる。また、M1 からの情報について、ワイヤーからの信号に対して 3 層中 2 層にヒットがある事を、ストリップからの信号には 2 層中 1 層にヒットがある事を要求する。これらの様な M2 と M3 を用いたコインシデンス、M1 によるコインシデンスは low-pt コインシデンスと呼ばれる。ワイヤー方向であれば $(R_3, \Delta R_{23})$ の情報、ストリップ方向であれば $(\phi_3, \Delta \phi_{23})$ の情報を low-pt コインシデンスの段

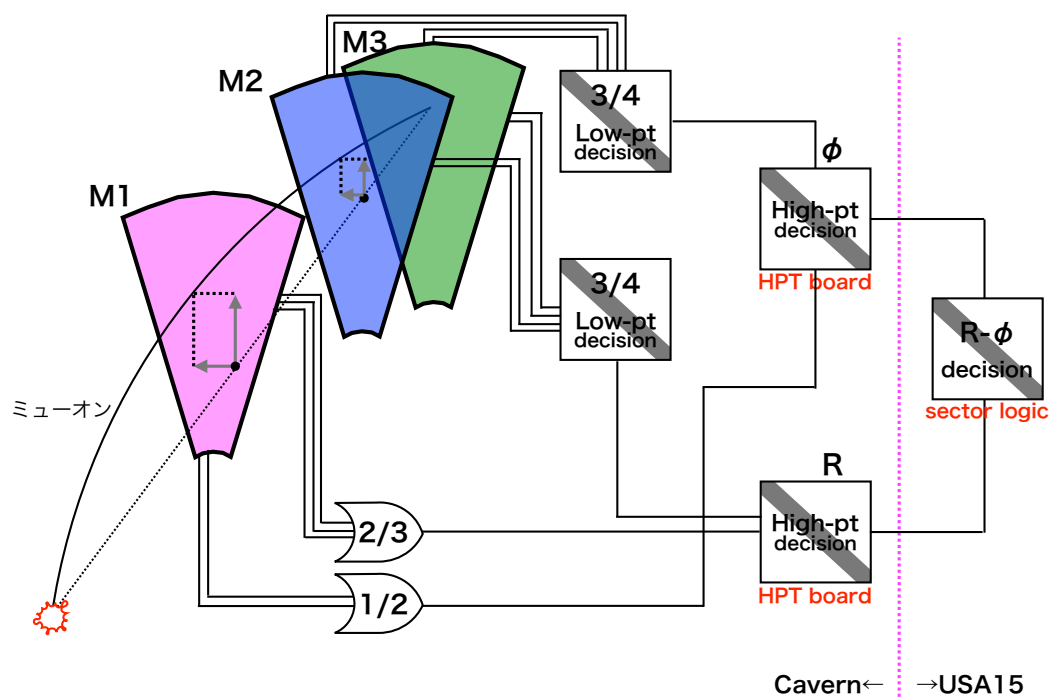


図 3.2 : TGC を用いたトリガー発行処理の流れ。TGC ワイヤ・ストリップのデータは図中の SLB、HPT とそれぞれ独立に読み出されコインシデンスをかけていく。そして計算機室に設置している SL がワイヤ・ストリップの情報を統合してミュオンの運動量と RoI を求める。判定結果は MuCTPi へと送信されていきレベル 1 トリガーの発行処理が行われる。

階で計算して求め、HPT ボードへ送信する。また M1 からの情報の R_1 、 ϕ_1 も HPT ボードへと送信する。

ワイヤー読み出し用の SLB からデータを受信した HPT ボードは、M1 のワイヤー方向の情報 R_1 を用いて $\Delta R_{13} = R_1 - R_3$ を計算し、同様にストリップ方向の情報についても $\Delta\phi_{13} = \phi_1 - \phi_3$ を計算する。 ΔR_{13} 、 $\Delta\phi_{13}$ も無限大の運動量持っているミュオン軌道に対して 0 になる。M1 からのコインシデンス結果と M2、M3 からのコインシデンス結果を統合し、 $(R_3, \Delta R_{13})$ 、 $(\phi_3, \Delta\phi_{13})$ を計算する処理を high-pt コインシデンスと呼んでいる。M1 上のヒットによる low-pt コインシデンスと M2、M3 のヒットによる low-pt コインシデンスが両方とも取れていた場合に high-pt コインシデンスを通過する。

HPT ボードのコインシデンス結果はレベル 1 エンドキャップミュオントリガーシステムの最終段に位置している Sector Logic へ送信される。ワイヤー方向の情報と、ストリップの情報は初めて Sector Logic 上でコインシデンス処理が行われる。また、TGC EI/FI、Tile D-layer から受信した信号を合わせて最終的な p_T 計算を行いトリガー判定を行い、ミュオンの運動量と RoI の位置をトリガー判定結果として MuCTPi に送る。Run-2 で用いられている Sector Logic の写真を図 3.3 に示す。

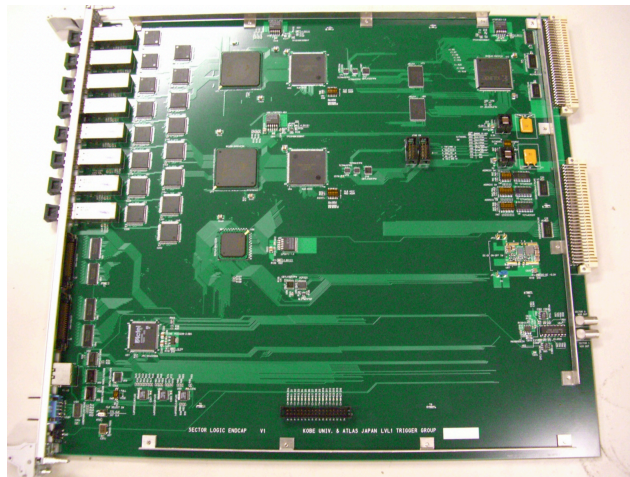


図 3.3 : Run-2 で用いられている Sector Logic の写真 [10]。

Sector Logic では HPT ボードで計算された ΔR_{13} と $\Delta\phi_{13}$ をもとに、FPGA 上に実装された参照表 (コインシデンスウィンドウ) を用いて運動量に変換する。このコインシデンスウィンドウは RoI 毎に定義されており、磁場の非一様性や検出器のアライメントのズレを考慮して条件を事前に設定しておく。ワイヤー、ストリップからの情報がどちらも high-pt コインシデンスを通過したものに対して使用されるコインシデンスウィンドウの一例を図 3.4 に示す。各セルの色分けはミュオンの運動量閾値に対応している。ミュオンの運動量が高く、軌道が磁場によって曲がりにくくなればなるほど ΔR 、 $\Delta\phi$ の値は小さくなり、運動量が低いと磁場によって大きく曲げられるため、コインシデンスウィンドウの外側に分布する。またワイヤーもしくはストリップからの情報のうち、どちらか片方のみ high-pt コインシデンスを通過した、もしくはどちらも high-pt コインシデンスを通過しなかったイベントに対しては、図 3.5 の様なコインシデンスウィンドウが定義されている。つまり、最終的なコインシデンス結果は、ワイヤー・ストリップどちらも high-pt コインシデンスを通過した場合、どちらか片方しか high-pt コインシデンスを通過しなかった場合、どちらも通過しなかった場合の合計 4 通り考えられるため、一つの RoI に対してコインシデンス

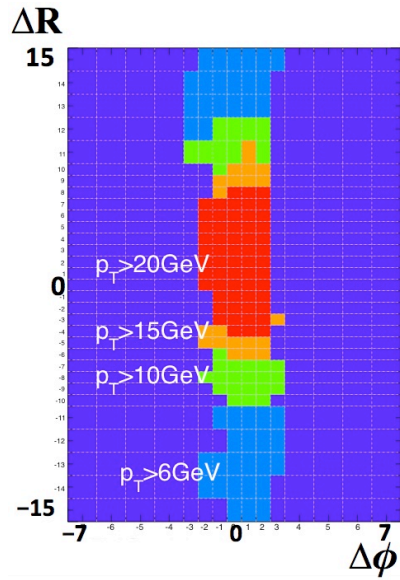


図 3.4 : HPT コインシデンスウィンドウの一例。(ΔR, Δφ) の値が 0 付近の領域から外側に向かって運動量閾値は低くなる。

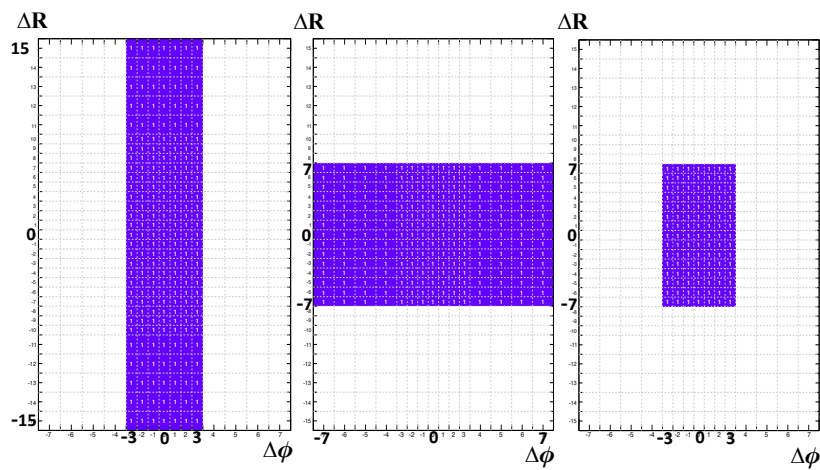


図 3.5 : LPT コインシデンスウィンドウの一例 [11]。

ウィンドウは合計4種類実装されている。トリガー結果は MuCTPi へと送られ、最終的に Central Trigger Processor(CTP) へとまとめられ、CTP がレベル 1 トリガーとして発行すべき情報を選択し、レベル 1 トリガーの発行を行う。

MuCTPi

エンドキャップ、バレル領域の Sector Logic からデータを受信し、統合して CTP へと送信する。ミュオンの運動量閾値毎に、トリガー発行を行うための候補として Sector Logic から送信されてきたミュオンの数をかぞえ、CTP へと伝達する。検出器同士が重なっている領域を通過したミュオンを検出し、二重に数えずに正しく一つのミュオンであるとして数え直す処理も同時に行う。このオーバーラップ領域の情報を処理するためのロジックはエンドキャップとバレル領域それぞれに特殊なものになっている。

3.2.2 トリガー単位

TGC を用いたトリガー発行はトリガーセクターと呼ばれる単位ごとに行われ、トリガーセクター間のヒット情報の共有は行われぬ。TGC は $1.05 < |\eta| < 1.9$ の範囲エンドキャップトリガーセクターと、 $1.9 < |\eta|$ の範囲のフォワードトリガーセクターに分けられる。トリガーセクターはさらに RoI (Region Of Interest) と呼ばれる単位に分割され、レベル 1 エンドキャップミュオントリガー判定時点で扱える最小単位となる。1 エンドキャップトリガーセクターには 148 個の RoI が、1 フォワードトリガーセクターには 64 個の RoI が存在する。レベル 1 ミュオントリガーの判定結果は、運動量閾値と RoI で表されることになる。エンドキャップトリガーセクターにおける RoI はトリガーセクターを η 方向に 37 分割、 ϕ 方向に 4 分割したものであり、フォワードトリガーセクターにおける RoI はトリガーセクターを η 方向に 16 分割、 ϕ 方向に 4 分割したものである。TGC 検出器のセクターの分け方を図 3.6 に示す。

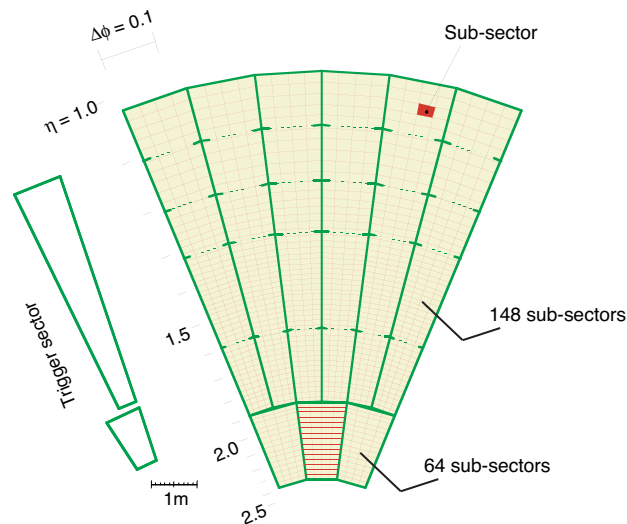


図 3.6 : TGC のトリガーセクターの概要を示す [6]。緑で縁取られた領域が 1 トリガーセクターを表し、赤く塗りつぶされた領域が RoI を表す。

3.2.3 Run-2 におけるトリガー効率と問題点

現行のエンドキャップミュオントリガーは、 $1.0 < |\eta| < 2.4$ を覆っている TGC-BW を用いて 3.2.1 項までで述べた様なトリガーシステムで処理を行っている。Run-2 開始前に閾値 20 GeV のミュオントリガーを発行した RoI の η 分布を予測した結果を図 3.7 に示す。全てのシステムを正しく動かす事が出来れば、黄色で示された分布までトリガーレートを削減することが出来、オフラインでミュオンを再構成した場合の赤色で示された分布とほとんど同じレートまで削減できている領域も確認できる。しかし、そもそも $1.9 < |\eta| < 2.4$ の範囲では Run-2 において磁場の内側にトリガー用検出器が設置されていないためレートの削減が行えず、黄色の分布が大きく残っている事が確認でき、帯域の大部分が後述するフェイクトリガーで占められている事が分かる。

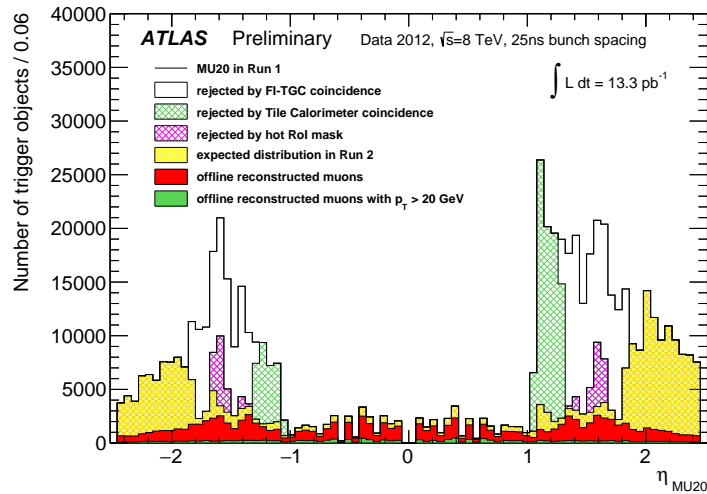


図 3.7 : 閾値 20 GeV のミュオントリガーを発行した RoI の η 分布。

現行のシステムのまま Run-3 の高ルミノシティ環境下で稼働させた場合、cavern バックグラウンドと呼ばれる背景事象が増加し、それによりミュオン検出器の性能が低下してしまう事が分かっている。ミュオン運動量測定の精度はエンドキャップ領域のトロイド磁場の内側に位置している Small Wheel のヒット情報の精度に影響されるため、ATLAS 検出器の性能が低下してしまう。また、現行のトリガーシステムに変更を加えず Run-3 を迎えた場合、 $p_T > 20$ GeV 以上の運動量を持っているミュオンに対するトリガーレートが $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のルミノシティに対して、50 kHz 以上になってしまう事が分かっている。これはトロイド磁場の置かれている場所から低エネルギーの陽子が磁場によって曲げられ TGC にヒットを残してしまうフェイクトリガーとなる事象によってミュオントリガーレートの帯域が支配されてしまうからである。フェイクトリガーの概要を図 3.8 に示す。TGC-BW はトロイド磁場の外側に設置されており、TGC-BW 単体では図 3.8 中のフェイクミュオンも衝突由来の事象と誤認してしまっていた。

そこで高ルミノシティ環境下において、現行の運動量閾値を維持しながらデータ取得の実行を実現するために、2020~2021 年のシャットダウン期間中に、Small Wheel を新しいミュオン検出器である New Small Wheel (NSW) に置き換える予定である。NSW からのデータは GTX 通信で読み出す必要があり、また扱うデータサイズが増加し、現行のトリガー判定用回路では対処できないため、Run-3 では新しいトリガー判定用読み出し回路 (New Sector Logic : NewSL ボード) の導入も行う。また、NSW が覆っていない範囲に対しても、新たにミュオン検出器を導入する。スモールセクターの BIS7, 8 の位置には RPC と sMDT を導入し、TGC-BW とのコイン

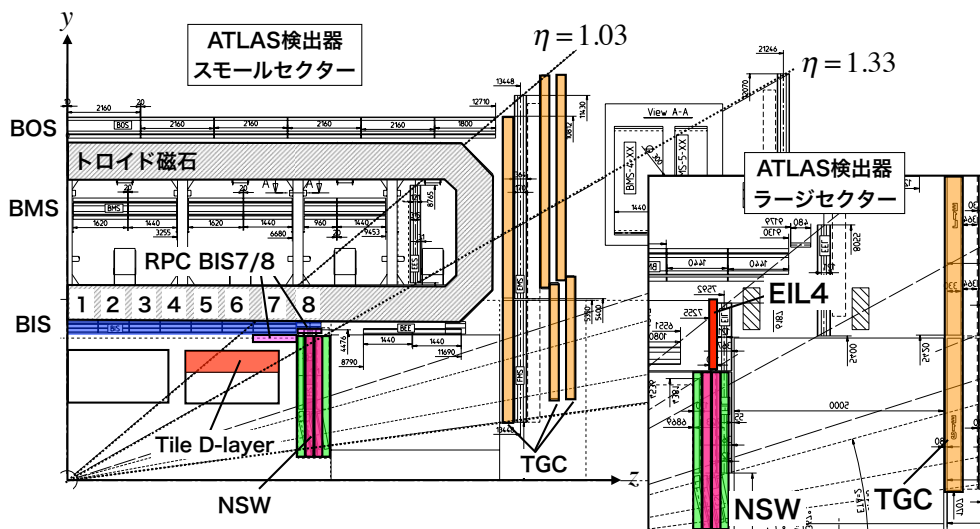


図 3.9 : 横軸に z 軸 (ビーム軸)、縦軸に y 軸を取り ATLAS 検出器の断面図を表している。特に Run-3 において使用される NSW、RPC BIS7/8、EIL4、そして Tile D-layer の設置される場所は強調して示している [9]。

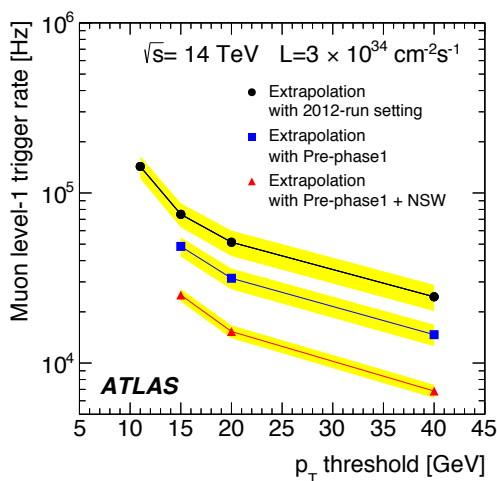


図 3.10 : NSW 導入後の Run-3 におけるレベル 1 ミューオントリガーレート。黒い点が Run-1 時点、青い点が Run-2 時点、赤い点が Run-3 における予想レートである。 [13]

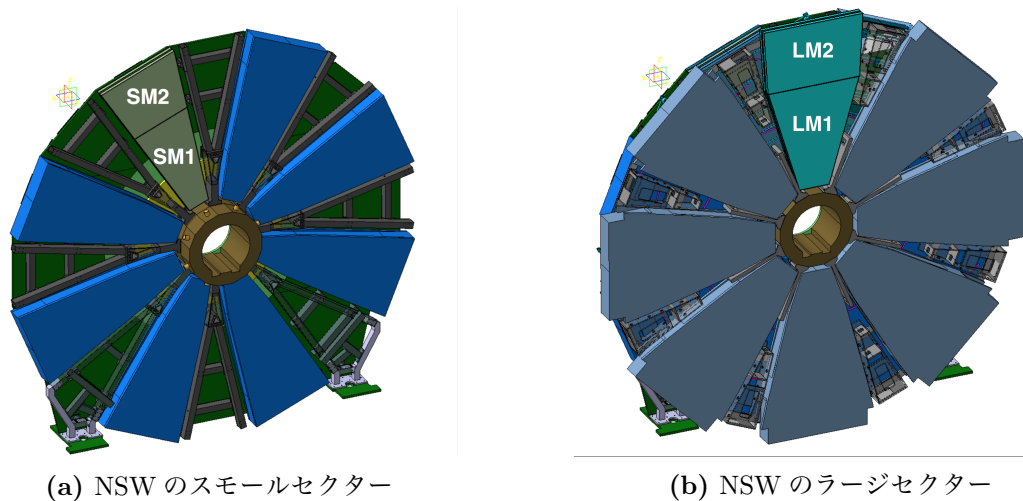


図 3.11 : NSW の持っているスモールセクターとラージセクターの概要図 [15]。

ガー用検出器として使用される Small strip TGC (sTGC) と精密測定用の Micromegas (MM) の 2 種類の検出器が組み合わさって構成されている。図 3.11 に示すように、Large トリガーセクターと Small トリガーセクターの構造を持っており、8 回対称になるように配置されている。また一つのトリガーセクターは sTGC、MM が図 3.12 に示すように合わさって構成されている。

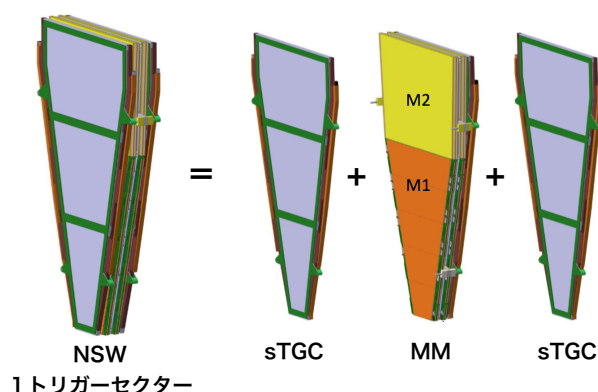


図 3.12 : NSW の 1 トリガーセクターは、2 層の sTGC と 4 層の MM と 2 層の sTGC を組み合わせて構成されている [15]。

Run-3 の高ルミノシティ環境に対応するための戦略の一つとして、トリガー閾値を上げてトリガーレートを抑えデータ取得を行うという事も考えられる。物理探索におけるアクセプタンスをミューオンの運動量を関数として表した分布を図 3.14 に示す。例えばミューオンの運動量閾値を現在用いられている 20 GeV から 40 GeV に引き上げた場合、超対称性粒子探索に対するアクセプタンスを約 10 % まで大きく低下させてしまう事が分かる。つまり、New Small Wheel とそれに伴う新トリガーロジックの開発・導入により閾値に変更を加えることなくデータ取得に臨めるという事は物理探索において非常に重要となる。

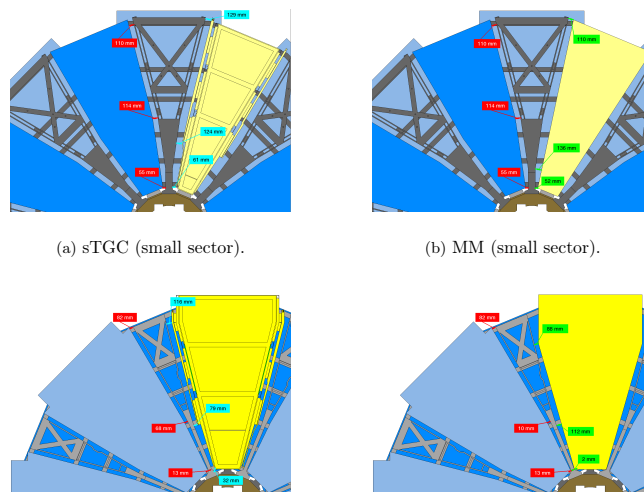


図 3.13 : NSW における sTGC と MM のスモールセクターとラージセクターの概要を示した図 [12]。

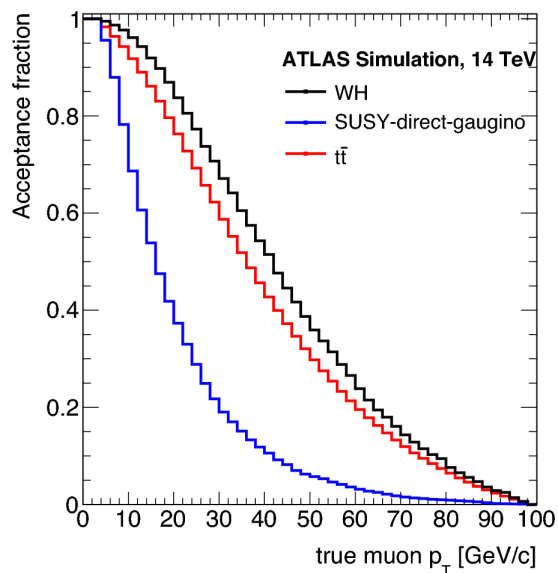
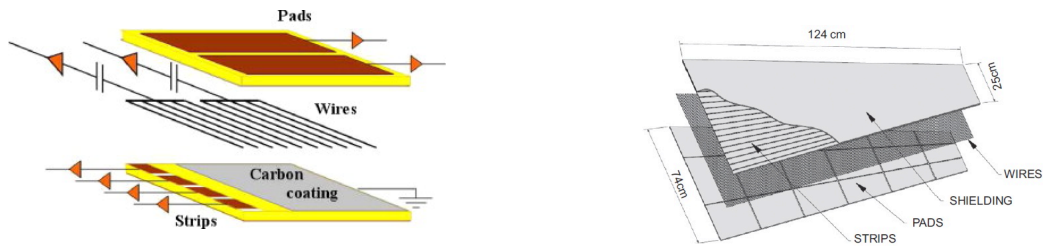


図 3.14 : 横軸にミュオンの運動量、縦軸に各物理チャンネルに対するアクセプタンスを示している [16]。ミュオンの運動量が 20 GeV と 40 GeV の場合でアクセプタンスが大きく低下している事が分かる。

3.3.1 Small strip TGC (sTGC)

基本的な sTGC の構造を図 3.15a に示す。1.8 mm 間隔のアノードワイヤーを、そこから 1.4 mm 離れた位置でカソードで挟んでいる構造を持った MWPC である。カソードストリップ間隔は 3.2 mm であり、現行の TGC のストリップ間隔である 15 mm よりもかなり小さく設計されている。また sTGC はパッドと呼ばれる読み出しカソードを持っている。ガスギャップ 2.8 mm、アノード間隔 1.8 mm の MWPC の構造を採用している。



(a) sTGC の内部構造。上から順にパッド、アノードワイヤー、カソードストリップを示している。

(b) sTGC の構成の概要。

図 3.15 : sTGC の内部構造の概要 [12]

3.3.2 Micromegas (MM)

マイクロメガス検出器は、ドリフト用カソード電極板、5 mm のガスギャップ、金属メッシュ、100 μm の増幅領域、ピラー、読み出し電極で構成されている。マイクロメガスの動作原理を図 3.16 に示す。荷電粒子が通過した際の増幅はメッシュと呼ばれるシートより後の狭い領域で行うため、レートに対する耐久力が高い。また増幅された電子による信号の時間差を用いることでトラックの z 方向の情報を再構成できるため、検出器に垂直に入射しなかった粒子に対する位置分解能を向上する事が出来る。

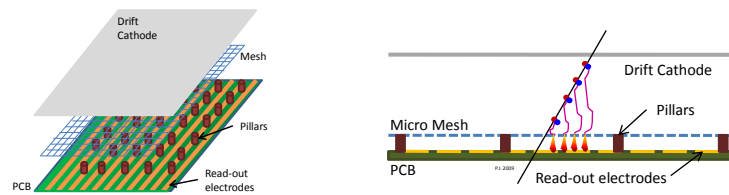


図 3.16 : マイクロメガス検出器のレイアウトと、動作原理の概要図 [12]。

3.3.3 New Sector Logic

Run-3 に向けて開発される New Sector Logic を用いたエンドキャップミュオントリガーの概要を図 3.17 に示す。Run-2 までと同じく TGC-BW のコインシデンス結果、EIL4、Tile D-layer からの情報は New Sector Logic に送信されてくる。Run-3 では新たに NSW、RPC BIS 7/8 の情報も送信されてくるため、これらのコインシデンスを取り、トリガー判定を行うことになる。New Sector Logic は GTX 規格 [18] を用いて NSW、RPC BIS 7/8、Tile D-layer の情報を読み出し、

通信規格	検出器	領域	使用するケーブル数
GTX	NSW	エンドキャップ	6本
		フォワード	8本
	Tile D-layer	-	1本
	RPC BIS 7/8	-	1本
G-Link	TGC-BW	エンドキャップ	6本
		フォワード	3本
	EIL4	-	2本

表 3.1 : Sector Logic 受信用のインターフェース一覧。エンドキャップトリガーセクターとフォワードトリガーセクターにより、扱うデータ量が異なるため使用するファイバーの数に違いがある。

G-Link 規格^[19]を用いて、TGC-BW、EIL4からデータを読み出す。New Sector Logic の受信インターフェースについて表 3.1 にまとめる。

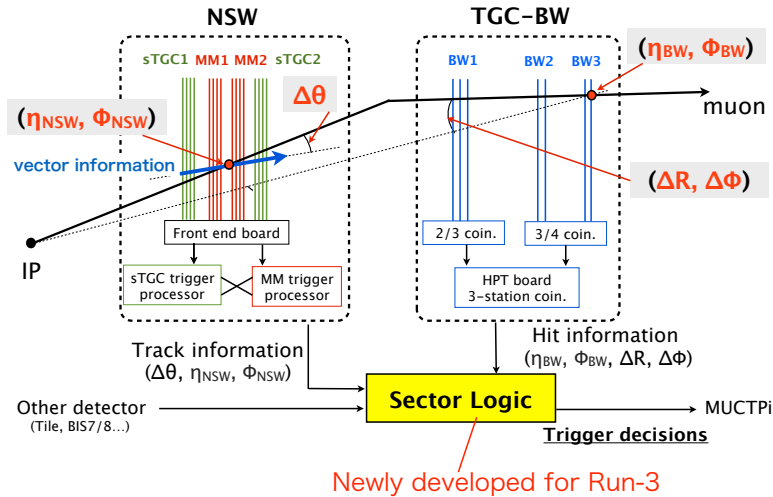


図 3.17 : Phase-1 アップグレード後のエンドキャップミュオントリガーの概要^[2]。New Sector Logic は TGC-BW に加えて NSW と他の検出器から情報を受信しコインシデンス処理を行う。

TGC-BW からの受信データフォーマット

Run-2 と同様に、Run-3 においても TGC-BW のコインシデンス結果は HPT ボードを通じ New Sector Logic へと G-Link 規格を用いて送信される。HPT ボードの出力フォーマットを表 3.2 に示す。

Bit	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Wire	HITID[2:0]			POS	H/L	Sign	R[3:0]			
Strip	not used	HITID[2:0]			POS	H/L	Sign	φ[2:0]		

表 3.2 : HPT ボードが出力するデータフォーマット

各ビット情報を表 3.2 に示す。

$\Delta R (\Delta\phi)$

トラックの $R (\phi)$ 方向の曲がりを表し、Wire (Strip) HPT ボードからの出力にのみ含まれる。4 (3) bit で 0~15 (0~7) の値を取る。

Sign

トラックの曲がった方向を表す情報でミュオンの電荷に由来する。

H/L

High-pt コインシデンスが取れたかどうかを表す。HPT ボードでコインシデンスが取れた場合は 1 が立つ。

POS

Hit ID で示される領域の情報を更に絞る情報

Hit ID

ミュオンのヒット位置に関する情報。

NSW からの受信データフォーマット

NSW と TGC M3 との各セクターの対応関係を図 3.18 に示す。1 枚の Sector Logic は TGC-BW の 2 トリガーセクター分のデータを読み出し、また粒子が通りうる全ての NSW のセクターから情報を読み出す事が出来るため、最大 3 つの NSW のトリガーセクターからのデータを受信することが出来る。

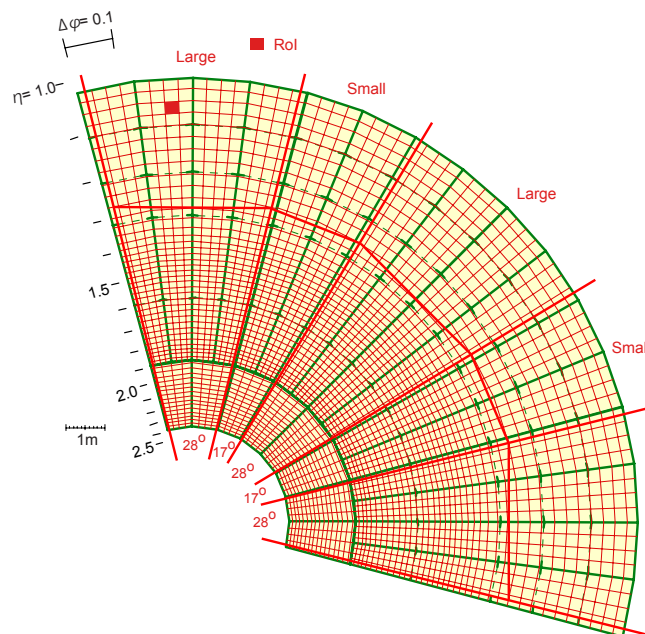


図 3.18 : TGC-BW のピボットプレーンと NSW のセクターを対応させた図。赤線で囲んでいるのが NSW のセクターである [13]。

NSW から受信するデータフォーマットを図 3.19 に示す。受信側の Sector Logic がデータの始まりを識別するためのアイドルコード、最大 4 本のトラック情報、NSW のセクター ID 情報、BCID

情報から構成されている。トラック 1 本のデータフォーマットは図 3.20 に従う。トラックの情報 は合計で 24bit の情報のうち、sTGC、マイクロメガスのヒット情報がそれぞれ 2bit、 $d\theta$ が 5bit、 ϕ が 6bit、 R が 8bit 割り当てられている。sTGChit、MMhit はそれぞれ sTGC と MM における コインシデンス情報であり、sTGC と MM を合わせた 8 層の内、コインシデンスが取れた層が多 いほど質の高いトラックであるとして、2-bit にエンコードされて送信される。また $\Delta\theta$ は図 3.21 の様に定義され、 $\Delta\theta$ を用いることで衝突点由来の粒子かどうかを識別することが出来る。 ϕ 、 R はそれぞれヒット位置の ϕ 座標、 η 座標を表している。NSW の Large セクターは $2\pi/12$ [rad] の 範囲を覆っており、分解能の目標値が 10 mrad であるため $(2\pi/12$ [rad])/0.01 rad = 52.3 分割さ れ、データとしては 6-bit (64 段階) で表現すればよい。 η 方向も $1.3 < |\eta| < 2.4$ の範囲を覆っ ており、分解能の目標値が 0.005 であるため 220 分割され、データとしては 8-bit (256 段階) で表 現される。

Data Format from NSW trigger electronics to Sector Logic

Words (16-bit)	first byte	second byte
Word-0	comma	comma
Word-1	track-0	
Word-2		
Word-3	track-1	
Word-4	track-2	
Word-5		
Word-6	track-3	
Word-7	ID (4-bit)	BCID (12-bit)

図 3.19 : Sector Logic が受信するデータフォーマット [13]

Field:	sTGC hit	MM hit	$d\theta$ (mrad)	ϕ index	R index	rsv
Num of bits:	2	2	5	6	8	1

図 3.20 : NSW で再構成されるトラック 1 本分の情報 [13]。NSW は合計 24-bit の情報を図 3.19 に従って 送信する。

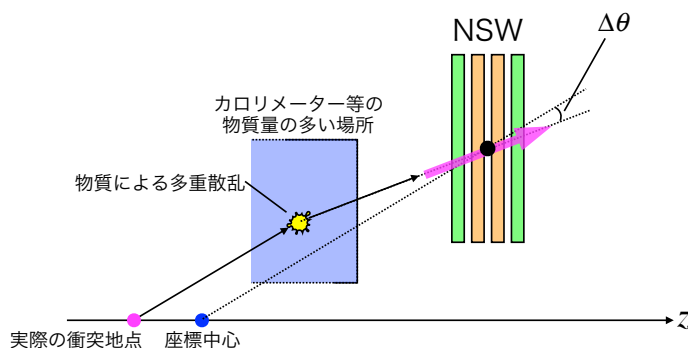


図 3.21 : $\Delta\theta$ の定義。NSW 上で再構成された飛跡の中心と ATLAS 検出器の座標中心を結んだ直線と、 NSW 上で再構成された飛跡の傾きのずれを示す物理量。

Sector Logic は 1 トリガーセクター当たり、トリガー判定候補のトラック情報を 3 本に絞って

MuCTPi へと送信する。1枚の Sector Logic は2トリガーセクターを担当するので、最大6本のトラックを選別する必要がある。NSW から受信する段階では6本よりも多くのトラック情報を受け取る必要があり、現在の開発段階では、NSW の1トリガーセクターから8トラック分の情報が Sector Logic へと送られてくる事になっている。

RPC BIS 7/8 からの受信データフォーマット

図 3.9 に示す BIS 7/8 の位置に、図 3.22 に示す RPC と MDT が新たに Run-3 から配置される。BIS の位置には衝突点に近い側から順に番号が振られており、BIS1 から BIS8 まで存在し Run-2 までは MDT のみ配置されていた。Run-3 からは BIS 7 と BIS 8 の位置に RPC が導入され、また BIS 7 と BIS 8 に配置されている MDT も sMDT に置き換えられる。特に RPC BIS 7/8 は、 $1.03 < |\eta| < 1.33$ の範囲で TGC とのコインシデンスを取ることでレベル1エンドキャップミュオントリガーのトリガーレート削減に貢献することが出来る。そのため、バレル領域に設置されるがエンドキャップミュオントリガー用の検出器として用い、検出器情報を GTX 通信で Sector Logic に送る。データフォーマットを図 3.23 に示す。

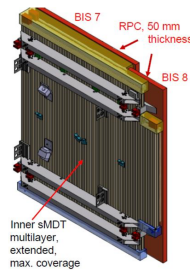


図 3.22 : BIS 7/8 に配置される RPC と sMDT の構成概要。

Data format from RPC BIS7/8 PAD trigger logic board to Endcap Sector Logic		
Words (16 bit)	first byte	second byte
Word-0	comma	comma
Word-1	candidate-0	
Word-2	candidate-1	
Word-3	candidate-2	
Word-4	candidate-3	
Word-5	BCID	
Word-6	CRC	
Word-7		

8b/10b encoding x 16 bytes = 6.4 Gbps

Format of a candidate information in RPC BIS7/8 PAD trigger logic board (24 bit/candidate)						
Field	eta index	phi index	deta	dphi	2/3 flag	reserved
Num. of bits	6	6	3	3	2	4

図 3.23 : RPC BIS 7/8 から Sector Logic へ送られてくるデータフォーマット。

EIL4 からの受信データフォーマット

Run-3 から EIL4 の位置に TGC を導入し、TGC - BW とのコインシデンスを取ることでレベル1エンドキャップミュオントリガーのトリガーレート削減に貢献する。G-Link 通信を用いて Sector Logic にデータを送信する。

タイルカロリメーターからの受信データフォーマット

Sector Logic が Tile D-layer から信号を Tile Module Digitizer Board (TMDB) から受信する際のデータフォーマットを図 3.24 に示す。TMDB はボード番号、Cable は TMDB のファイバーに割り当てられた番号、Mod は 3-bit を用いてどのカロリメーターの層からの情報であるかを表しており、D5 層のみであれば 0、D6 層のみであれば 1、D5 層と D6 層を使用していれば 2 とする。また Comma はコントロールワードと呼ばれ、受信側の Sector Logic がデータの始まりをアライメントするために使用するものである。

Words (16 bit)	Second Byte								First Byte							
	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Word-0	BCID[3:0]				TMDB[3:0]				Comma (K28.5)							
Word-1	0		Mod3[2:0]			Mod2[2:0]			Mod1[2:0]			Mod0[2:0]		Cable[1:0]		

図 3.24 : Sector Logic が TMDB から受信するデータフォーマット [14]。

MuCTPi との通信

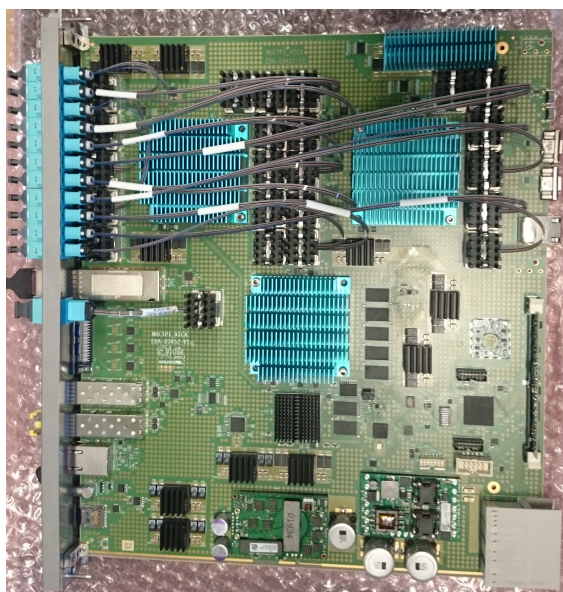


図 3.25 : Run-3 で導入される MuCTPi ボードの写真。

Sector Logic はトリガー判定結果をシリアル化して、MuCTPi へ送信する。図 3.25 にボードの写真を示す。また、送信データフォーマットを図 3.26 を示す。Muon Candidate1 から 4 まで示されているブロックには、トラック 1 本につき 16-bit で、計 4 本のトラック候補の情報が格納される。この様に MuCTPi へは L1 判定結果の RoI の位置 (= RoI 番号) と運動量閾値、そしてフラグが送られ後段の HLT で精密にトリガー判定が行われる。

Muon Trigger Sector Logic - MUCTPI Test Pattern Proposal															
16-bit word	Upper-byte								Lower-byte						
	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
0	Muon Candidate 1														
1	Muon Candidate 2														
2	Muon Candidate 3														
3	Muon Candidate 4														
4	Global flags				BCID										
5	CRC-8								0xFD (K29.7)						
6	0xC5 (D5.6)								0xBC (K28.5)						
7	0xC5 (D5.6)								0xC5 (D5.6)						

図 3.26 : Sector Logic から MuCTPi への送信データフォーマット [17]。

New Sector Logic の実装

前述したようなデータ通信を行うために、図 3.27 に示した様に Sector Logic は 9U 規格の VME ボード上に実装した。GTX 規格と G-Link 規格で各検出器からの情報を読み出し、それらを用いたトリガー判定結果は GTX 規格を用いて MuCTPi へと送信する。FPGA へのトリガーロジックの書き込み、各レジスタへの設置値の書き込みや読み出しは VME バスを経由して行うことができる。16 ピンのフラットケーブル用のポートも持っており、TTC 信号の受信のための用いる。さらに、バーストイベントのモニター用に LEMO 規格のアウトプットポートも実装されており、また Sector Logic のデバッグ用に使用する事が出来る。データ読み出し用に、KEK Open-It が開発したイーサネットと FPGA を接続するための SiTCP 技術を採用しており、VME ボード上に実装されている RJ-45 コネクターを介しイーサネットによってデータを後段のシステムへと送信する。

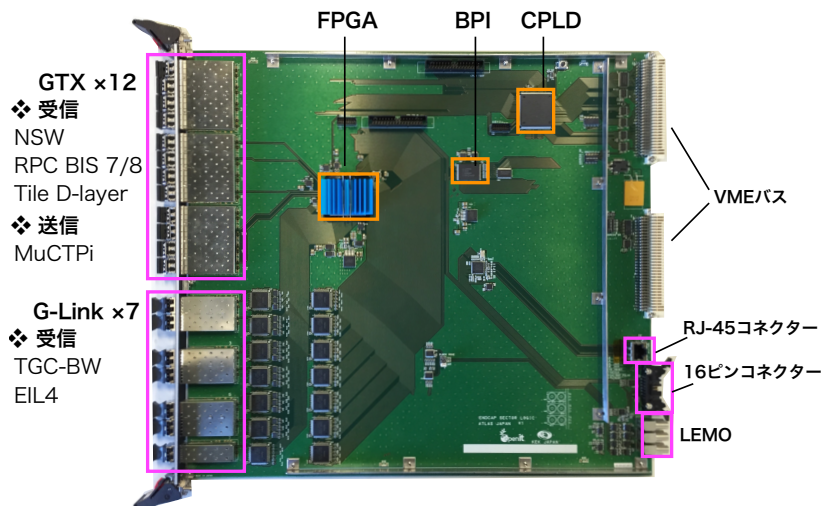


図 3.27 : Sector Logic のデータ通信の概要。

データ通信の制御のための Sector Logic に採用されている集積回路について以下で説明する。

FPGA (Field Programmable Gate Array)

ユーザー自身がアプリケーション用回路を自由に変更することが出来る [20]。Xilinx 社の Kintex-7 Series FPGA、XC7K325T を実装しており、レベル 1 エンドキャップミューオントリガーのトリガーロジックはこの FPGA 上に実装される [2]。XC7K325T は高速シリアル・トランシーバーの GTX を搭載しており、最大 12.5 Gbps の通信速度でのシリアル通信が可

能である。

CPLD (Complex Programmable Logic Device)

不揮発性の性質を持っており、VMEバスを用いた制御のために実装されている。電源投入後のFPGAへの書き込み制御、VMEバスを用いた通信を行う事が出来る。

BPI (Byte-write Peripheral Interface)

不揮発性のメモリであり、FPGAの回路情報を保存しておくことが出来る。CPLDからコントロールする事で、電源投入時にFPGAに情報を高速で書き込む事が出来る。

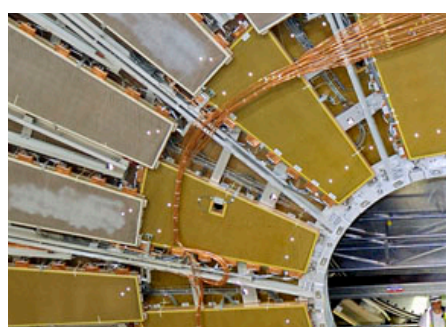
第4章 新検出器を用いたトリガーロジック改良による不感領域削減

3章で述べたように、Run-3からNSWが導入される。今までレベル1エンドキャップミュオントリガーに対して不感領域であった部分を回復するロジックを考える事ができる。本章ではその効果の検証を行い、その結果について述べる。

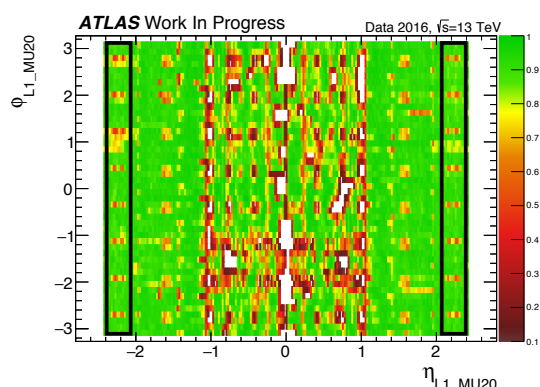
4.1 現行のLevel-1 エンドキャップミュオントリガーの不感領域

運動量が $p_T > 20$ GeV を満たしたミュオンに対して発行されるレベル1ミュオントリガー (L1_MU20) の場所依存性を図 4.1(b) に示す。特に、図 4.1(b) 中に黒の四角で囲っている、TGC が置かれているフォーワードトリガーセクター領域の $1.92 < |\eta| < 2.42$ の範囲に周期的にトリガー効率が悪くなっている場所を確認できる。

TGCのM1、M2、M3には図 4.1(a) で示すように、MDTシステムで使用される位置補正用のレーザーアライメントのための穴 (アライメントホール) が空いている領域が存在する。ミュオンがM2もしくはM3のアライメントホールを通過した場合、low-pt コインシデンスが取れずこの事象によるトリガー発行は行われませんが、M1のアライメントホールを通過し、M2、M3にヒットを残すような軌道をミュオンが取った場合はlow-pt コインシデンスによるトリガー発行が行われる事になる。 $p_T > 20$ GeV の様なミュオンに対しても low-pt コインシデンスしか計算できないので、アライメントホールの存在する領域でトリガー効率が下がってしまい、アライメントホールの位置に対応するように周期的にトリガー不感領域が生じてしまう。



(a) $1.9 < |\eta| < 2.42$ の領域のアライメントホール



(b) L1_MU20 のトリガー効率の場所依存性

図 4.1 : TGC-BW のフォーワード領域 ($1.9 < |\eta| < 2.42$) に存在するアライメントホールの概観 (a)、アライメントホールがトリガー効率にどの様に影響するか (b) を示した。

アライメントホールを通過した事象は運動量閾値 $p_T > 4$ GeV (L1_MU4) しか満たさなかった低エネルギーのミュオンとして判定されてしまい、トリガーレートを抑えるためプリスケール

が掛けられる可能性がある。高エネルギーミュオンに対してのトリガーは、予想されている重い新粒子の崩壊によって生じるような新しい物理事象に感度を持っており、物理事象探索にとって重要なトリガーである。L1_MU4 と判定されると新物理探索に対するアクセプタンスを損なう事になってしまうため、この様なトリガー不感領域は削減される必要がある。TGC フォワード領域の $1.9 < |\eta| < 2.42$ の範囲をトロイド磁場の内側で覆っている検出器は精密測定検出器である CSC であり、前述のような TGC-BW 上のトリガー不感領域を補完する事が出来なかった。しかし Run-3 では NSW が TGC フォワード領域を磁場の内側から覆っており、トリガー用検出器としても用いることができるようになるので、NSW のヒット情報とのコインシデンスを取ればトリガー不感領域の削減が期待できるのではないかと考えた。そこで、本章では TGC M1 にヒットを残さなかった事象に対して、NSW 上に同一粒子に起因すると考えられるヒット情報を要求することで不感領域の削減を試み、トリガー不感領域回復のためのロジックと結果について報告する。

4.2 NSW との位置マッチングを用いたリカバリーロジック

4.2.1 トリガー不感領域削減のためのロジック

本研究で考えている不感領域削減のロジックを適用すべき事象は、運動量 $p_T > 20$ GeV を持っているミュオンのうち TGC M1 のアライメントホールを通過し、low-pt コインシデンスしか処理できなかった事象である。NSW に同一粒子に起因すると考えられるヒット情報があった場合、TGC-BW のコインシデンス結果が low-pt コインシデンスまでしか処理できなかったが、それはアライメントホールを通過したためである、と処理し直し適切なトリガー判定を行うようにする。TGC M1 にヒットを残す低い運動量のミュオンも low-pt コインシデンスしか処理できない事象になるが、NSW と TGC-BW とのコインシデンスウィンドウを定義する事で低い運動量を持っているミュオンを誤って回復せずに、 $p_T > 20$ GeV の事象のみを回復する。以上のロジックの概要を図 4.2 に示す。

NSW はまだ導入されていないため、実際のデータを用いて本ロジックを評価する事はできない。そこで本研究ではまず、モンテカルロシミュレーションによって作られた擬似的なデータを用いてトリガーロジックの開発を行った。

レベル 1 トリガー判定時点で用いられるトリガー情報の最小単位である RoI 毎にコインシデンスウィンドウが定義されている。アライメントホールの影響を受け、low-pt コインシデンスしか処理することのできない RoI が TGC にどの様に分布しているのかを確認した。影響のあるアライメントホールを通過したミュオンは high-pt コインシデンスが取れないので、NSW とのコインシデンスを考えることにより、衝突事象由来のイベントである事を保証する。このようにして、TGC 3 ステーションでコインシデンスを取れなかった事象に対して回復ロジックを設ける領域を限定しておく。まず、現在のデータでアライメントホールを通過したことによりトリガー効率が下がってしまっている RoI を探す。また、アライメントホールを通過した事象に対して、New Small Wheel に残されたヒット情報と位置マッチングが取れる事を要求する。ここで位置マッチングとは、衝突点と該当する RoI を結んだ直線と、衝突点と NSW のヒットを結んだ直線とを比較し、 $|\Delta\eta| = |\eta_{\text{TGC-BW}} - \eta_{\text{NSW}}| < 0.8$ 、 $|\Delta\phi| = |\phi_{\text{TGC-BW}} - \phi_{\text{NSW}}| < 0.8$ を満たすかどうかを判定し、これらの条件を満たした場合に、該当する RoI へのヒットとこの NSW へのヒットは同じ粒子に起因すると考える事である。この位置マッチングが取れたイベントは、L1_MU20 を通過していると考えられる。

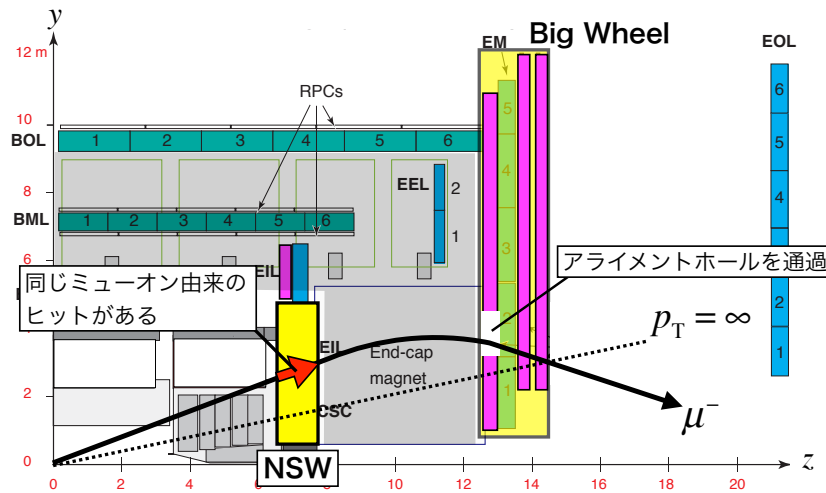


図 4.2 : NSW と TGC-BW のコインシデンス概要。TGC-M1 のアライメントホールを通過したミュオンに由来すると考えられる NSW 上のヒットを探し、該当するヒットが存在すればアライメントホールを通過したミュオンであると処理し直す。

4.2.2 コインシデンスウィンドウの定義

NSW とのコインシデンスロジックのために、 $d\eta : d\phi$ のコインシデンスウィンドウを定義する必要がある。以上のロジックを検証するために、まず TGC-BW と NSW のヒットとの $\Delta\eta, \Delta\phi$ 分布を見る。その後、L1.MU20 に対してリカバリロジックを適応して回復の見込めるトリガー効率を示す。さらに考案した新ロジックによるトリガーレートの増加分を見積もるため、実データを用いた解析を行うが、その際には NSW がまだインストールされていないため、代わりに CSC 検出器を用いたリカバリロジックになることに留意する。

4.3 アライメントホールによる影響をうける RoI

TGC-BW の M1 を図 4.3 に示す様に、トリガーセクターは 1~24 番と番号が割り振られている。まず初めに、どの RoI に対してアライメントホールによる影響が及んでいるかを知るために、モンテカルロシミュレーションを用いて生成したデータを使った解析を行った。用いたシミュレーションデータはイベント中に 1 本のみミュオンが発生し検出器を通過する事象であり、運動量が 20 GeV、40 GeV、100 GeV のサンプルが存在する。この MC サンプルは、2-sation コインシデンスのみで MU4 を発行するトリガーマニューを採用していた期間のものであるため、ここでアライメントホールを通過したと考えられるイベントは SL コインシデンスまで通過するが、Level-1 トリガー発行時点で L1.MU20 にならなかったものとする事ができる。

$p_T=20$ GeV の運動量を持つミュオンを発生させたシミュレーションデータを用いて、どの RoI が影響を受けるかを図 4.4 示す。アライメントホールの影響を受け、L1.MU20 の発行が出来ていない箇所はトリガーセクター 2,5,8,11,14,17,20,23 に位置する RoI24、25、28、29 番であると分かった。以下では該当する RoI にのみリカバリロジックを適用する。また、アライメントホー

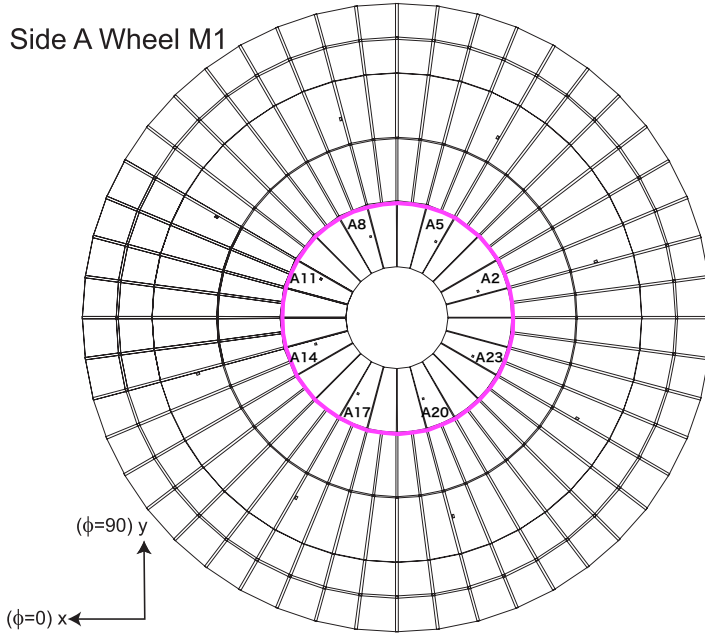


図 4.3 : TGC-BW M1 A サイドの概要図。ピンク色の枠線で囲んだ部分が Forward 領域であり小さく四角で囲まれた部分がアライメントホールを示す。

ル 1 つに対して、4 つの RoI が影響を受ける理由は、M1 のアライメントホールと M3 の距離があるため、アライメントホールが影響を与える領域が M3 上に射影した時に大きく見えてしまうこと、ミューオンの電荷によりアライメントホールを通過する軌道が上下に分散するので 4 つの RoI に影響が出てしまうと考えられる。

4.4 TGC-BW と NSW のヒットの $d\eta, d\phi$ 分布

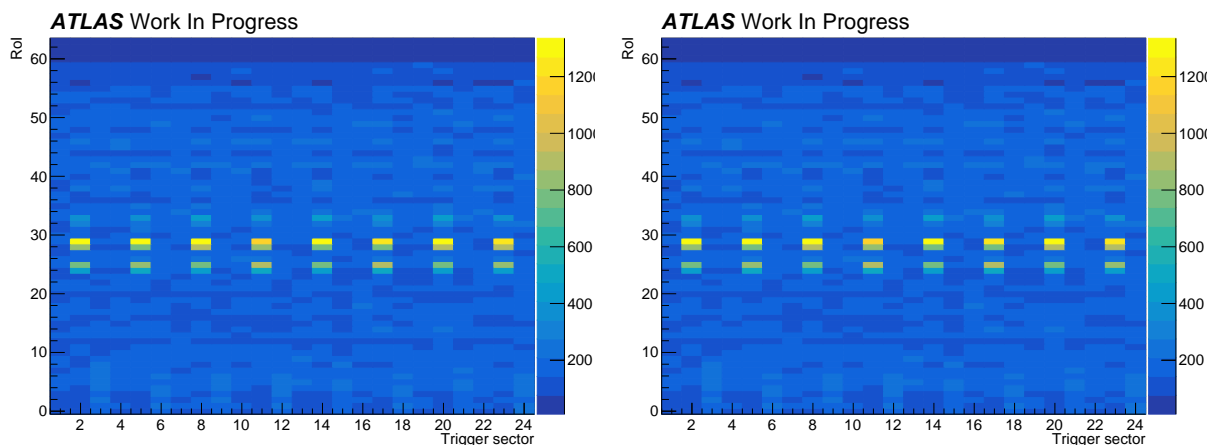
運動量 20 GeV 以上のミューオンに対して本ロジックの考察を行うため、TGC-BW と NSW とのコインシデンスウィンドウを考える。ここで定義するコインシデンスウィンドウは TGC M3 で判定された RoI の中心と ATLAS 検出器原点を結んだ直線の座標である (η_{BW}, ϕ_{BW}) と、NSW 上にミューオンが残したヒットの座標 (η_{NSW}, ϕ_{NSW}) の差 $(d\eta, d\phi)$ の分布であり、次式の様に表される。

$$d\eta = \eta_{BW} - \eta_{NSW} \quad (4.1)$$

$$d\phi = \phi_{BW} - \phi_{NSW} \quad (4.2)$$

エンドキャプトロイド磁場通過の前後でのヒット情報の比較であるので、精密に 0 にはならず $d\eta, d\phi$ はある大きさを持った分布になる。

まず L1_MU20 の閾値を考えるので運動量が 20 GeV 以上のミューオンでは磁場ではほとんど曲げられないため、NSW とのヒット位置との差もそれほど大きくはならないと考えられる。各 RoI に対してこれらのヒット位置の差をプロットした結果を図に示す。20, 40, 100 GeV のシングルミューオンのシミュレーション結果を重ね合わせた分布を図 4.5 に示す。



(a) A サイドにおけるアライメントホールの影響がある RoI (b) C サイドにおけるアライメントホールの影響がある RoI

図 4.4 : 色の濃くなっている部分がアライメントホールの影響を受け、コインシデンスを正確に取ることの出来なかった領域を示している。

運動量 20 GeV、40 GeV、100 GeV を持ったミュオンのモンテカルロシミュレーションサンプルを用いて、各運動量における TGC-BW と NSW の $d\eta : d\phi$ の分布を見る。20 GeV のミュオンによるコインシデンスウィンドウでは上下に分かれた構造を持っており、運動量が高くなるに従って図の中心へとシフトしていくようなプロットになっている。これはトロイド磁場によって曲げられるミュオンの軌道が電荷によって上下に分かれるためであり、運動量が高くなるに従って曲がりにくくなり、コインシデンスウィンドウも中心へと寄っていく分布を取る。

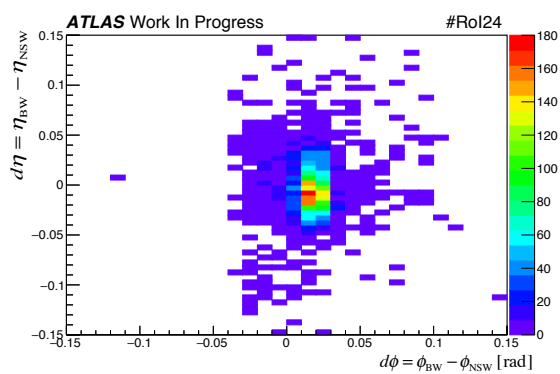
つまり、この範囲にあるイベントは 20 GeV 以上の運動量を持つイベントであると考え事ができる。

NSW からのヒット情報は ϕ 方向には最大 3 セクター分、 η 方向には最大 $\eta = 1.02 \sim 2.42$ の幅の情報を Level-1 トリガー判定に使用することができる。その為、まず条件を決めるために最大の領域を見ている。この領域でなるべく多くのヒット情報を含むための $d\eta - d\phi$ カットの条件を決めた。そして TGC-BW のヒット情報と NSW のヒット情報の位置の差が、この領域内に入っていれば同一粒子に起因する飛跡情報であるとする。

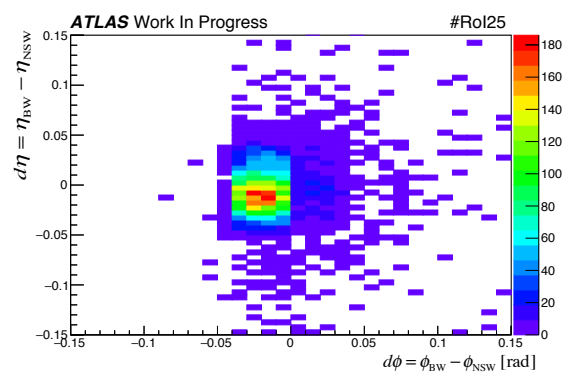
4.5 新ロジックによるトリガー効率の改善

NSW とコインシデンスを行わない場合のトリガー効率の分布を図 4.6a に、定義したコインシデンスウィンドウを用いて TGC-BW と NSW とのコインシデンスを計算した結果を図 4.7 に示す。図 4.6a と図 4.6b を比較すると、不感領域の大きさが小さくなっている事が読み取れるが、未だ不感領域とみられる周期的な構造も読み取れる。これは、本ロジックでトリガー効率を回復した領域は TGC M1 の持っているアライメントホールに対応する領域であり、TGC M2 と M3 が持っているアライメントホールに由来するトリガー不感領域は回復出来ていない。そもそも TGC M2 と M3 上にヒットを残さなかった場合、つまり TGC M2 もしくは M3 のアライメントホールを通過したイベントに対して low-pt コインシデンスを計算する事が不可能であるため、そのような事象は記録する事ができないからである。

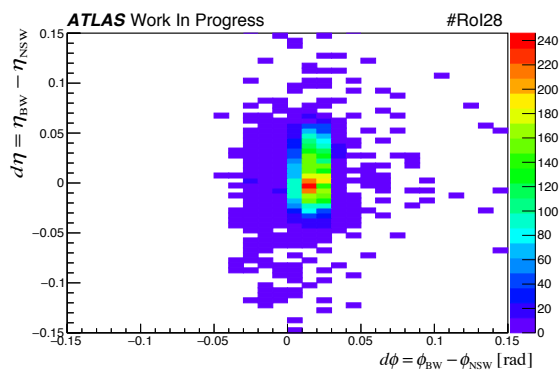
また、コインシデンスを取らなかった場合と、取った場合との比を計算した結果を図 4.7 に示す。図 4.7 中で赤く示されている部分が、TGC-BW と NSW のコインシデンスによって回復でき



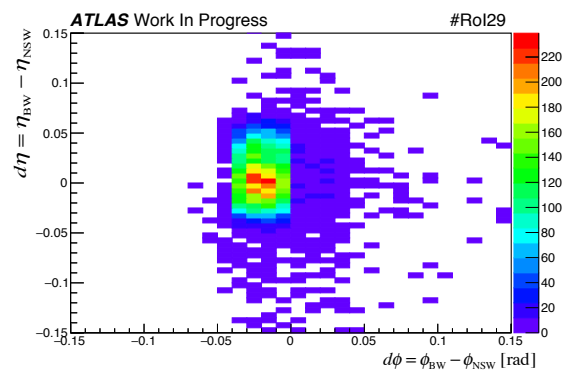
(a) RoI24 番



(b) RoI25 番



(c) RoI28 番



(d) RoI29 番

図 4.5 : TGC-BW と NSW とのヒット位置の差を計算した時のヒットマップ。縦軸は η 方向のヒット位置の差、横軸は ϕ 方向のヒット位置の差を表す。

た部分を示しており、アライメントホールによって不感領域となっていた領域に対して回復を試みることが出来たことを示している。

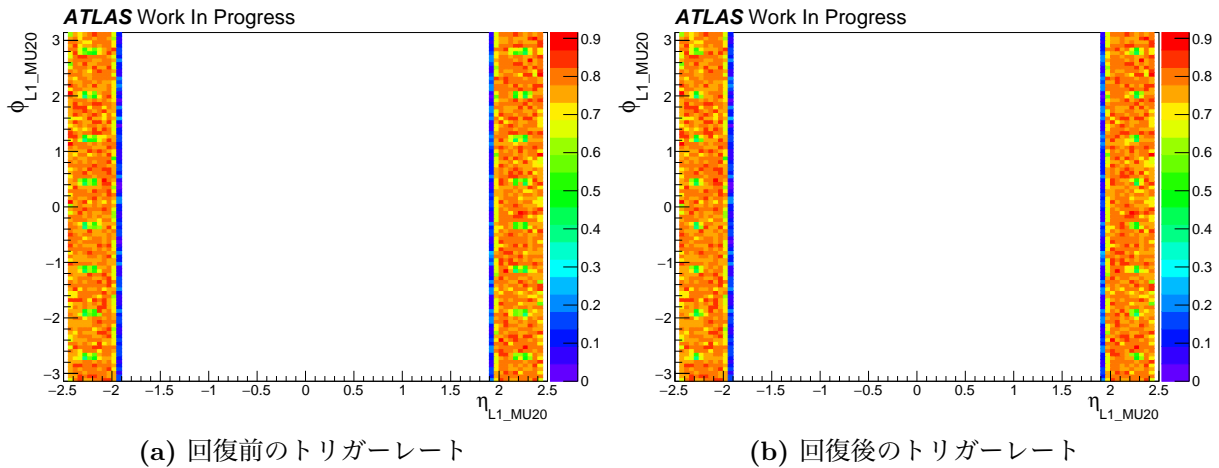


図 4.6 : 回復前後のトリガー効率の分布図

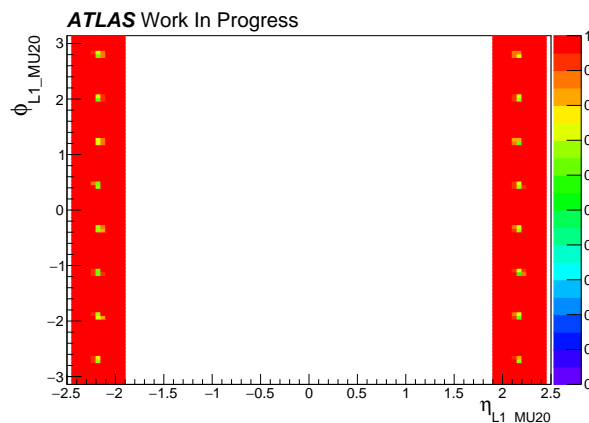


図 4.7 : 回復前のトリガーレート/回復後のトリガーレートを計算した結果

また、本ロジックを導入する前とした後の、TGC フォワード領域のトリガー効率を図 4.8 に示す。ここではトリガー効率は次のように定義される。

$$\frac{\text{注目する運動量閾値を超えているミュオンの数}}{\text{全てのオフラインミュオンの数}}$$

ここでオフラインミュオンとは、全てのトリガー処理が終了した後にオフラインで再構成されたミュオンの事を指す。また、トリガー効率を運動量の関数として計算したグラフを Turn-on Curve と呼び、理想的には、注目している運動量閾値より運動量が低い領域ではトリガー効率は 0 %、高い領域では 100 % となる様な形のグラフになることが望ましい。実際には検出器のアクセプタンス・分解能の限界があるために、閾値以下の運動量を持つミュオンに対して誤ってトリガーを発行したり、閾値以上にも関わらずトリガー発行が行えなかった場合もある。各プロットは上下二段に分かれており、上段のプロットは赤い点が NSW とコインシデンスを取る前、青い点が NSW とコインシデンスを取った後を示している。また下段ではコインシデンスを取る前後の

トリガー効率の比をとっており、1を上回っている場合はコインシデンスを取った後のトリガー効率のほうが大きいことを示している。このことから、NSW とのコインシデンスによりトリガー効率が回復できていることが分かる。

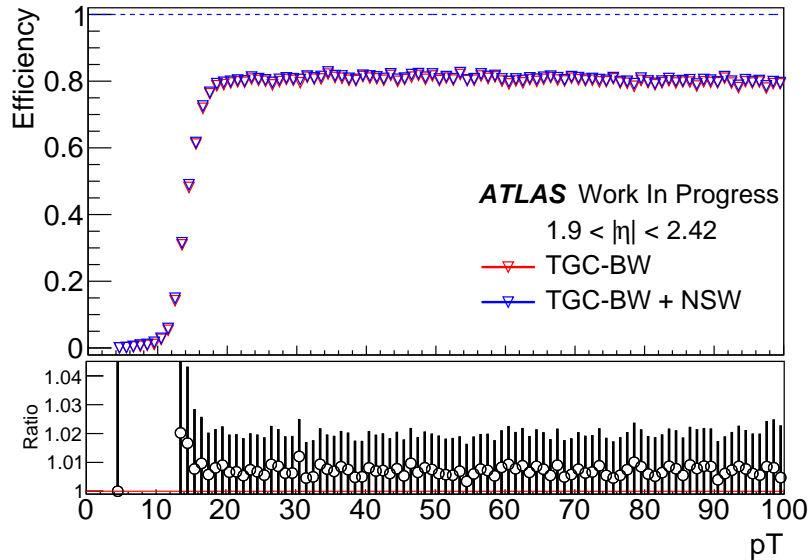


図 4.8 : リカバリーロジックを適用し、TGC の覆っている全領域でトリガー効率を計算した結果。赤色が TGC-BW 単体でのコインシデンス結果、青色が NSW ともコインシデンスを取った結果を表している。また下段は回復前と回復後のトリガー効率を表している。

4.6 新ロジックによるトリガーレートへの影響

本解析方法は、これまで L1_MU20 が発行されなかった事象に対して、コインシデンスを用いることでトリガー効率を回復しようとするロジックであるため、それによりトリガーレートがどれだけ上昇するかを評価する必要がある。モンテカルロ・シミュレーションによるデータでは、背景事象が正確に含まれていないためトリガーレートの見積もりには実データを用いて評価を行う。現在の Run で用いられているトリガーロジックでは、運動量 4 GeV 以上のミュオンに対して発行される L1_MU4 にも M1 ストリップの 1/2 コインシデンスを要求しているため、アライメントホールを通過したイベントはそもそもトリガー発行が行われずイベントの記録がそのミュオン自体では行われない [21]。そこで M2、M3 のみでトリガー処理をしていたランで取得したデータを用いた。

また、実際は Level-1 トリガーと HLT が発行されて初めてデータの記録がなされる。今回のように Level-1 トリガーのみのパフォーマンスを調査する場合には普段使用しているトリガーチェーンでは、HLT のトリガー効率や、オフラインの再構成の効率に影響されてしまい純粋に Level-1 トリガー単体のトリガーレートの評価ができない。そこで、実データを用いたトリガーレートの研究には pass-through トリガーと呼ばれるトリガーチェーンが使用される。このトリガーは Level-1 トリガーの発行のみを要求し、HLT トリガーの判定は行わずイベントの取得を行うため、Level-1 トリガーのパフォーマンス単体の研究の為にトリガーデータである。

今回は HLT_noalg_L1MU4 と呼ばれるトリガーチェーンで取得されたデータを用いた。このデータは L1_MU4 が発行されたことのみを要求しており、L1_MU4 がエンドキャップ部かバレル部で

発行されたかの指定は行っておらず、ATLAS 検出器のどこかで MU4 が発行された場合にデータが記録される。これによりアライメントホールを通過した事象も MU4 と判定され取得される事になる。トリガーレートの評価方法を説明する。

1. まず TGC-BW が L1_MU20 と判定した事象数を記録する。
2. 次に、L1_MU20 と判定されなかった事象のうち、注目しているトリガーセクターと RoI のヒットの事象を探す。
3. 該当する領域のヒットが存在した場合、アライメントホールによって low-pt コインシデンスが取れているが high-pt コインシデンスが取れていない事象であるかを判定する。
4. 以上の条件を通過した事象に対して、CSC 検出器とのマッチングを考える。
5. マッチングが取れた場合、L1_MU20 として数え直す。

NSW は Run-3 から導入されるため、ここでは $1.9 < |\eta| < 2.42$ の範囲を覆っている CSC を NSW に見立ててリカバリーロジックを考察した。TGC-BW と NSW のコインシデンスではなく、TGC-BW と CSC のオフラインで再構成されたセグメントの情報を用いて定義したコインシデンスウィンドウを用いて評価した。

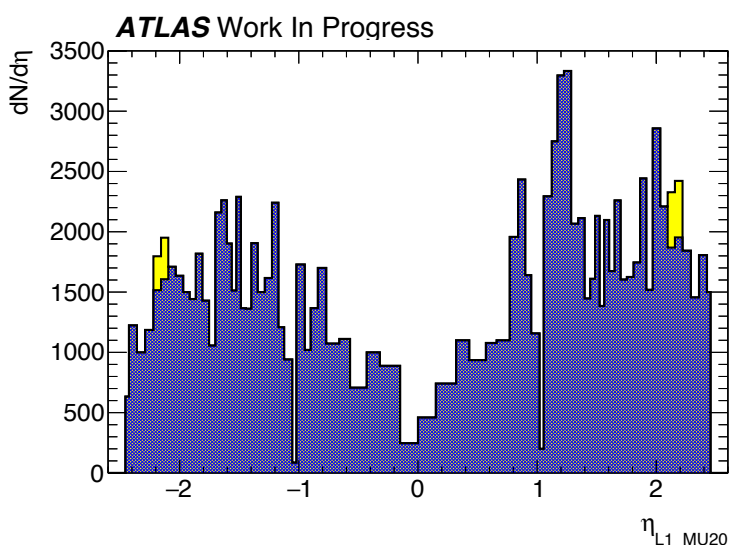


図 4.9 : L1_MU20 のトリガーレート。青が回復前、黄色がリカバリーロジックをかけた後。

以上の条件で解析した結果を図 4.9 示す。青色で示された分布は Run-2 における L1_MU20 を発行した RoI の分布を表している。本ロジックを用いた場合、黄色に示されている分布に相当するトリガーレートが増加する事になり、その量は現在の Run-2 におけるトリガーレートに対して 1.36% の上昇であると分かった。つまり、NSW を用いることによりトリガーレートに大きな影響を加える事なくアライメントホールによる不感領域の削減を行えることが分かった。

また、NSW を用いたコインシデンスロジックを導入すれば、青色の分布の削減が可能になると予想できる。そこで、本ロジック導入がどれだけのトリガーレートの増加に繋がるかを更に正確に見積もるためには、Run-3 で実データを用いた更なるコミッショニングが必要となる。

第5章 レベル1エンドキャップミュオントリガー用データ読み出しシステムの開発

3章で述べたように、レベル1エンドキャップミュオントリガーはRun-3では新しいミュオン検出器であるNew Small Wheel (NSW)を導入し、良い位置分解能、角度分解能の情報を扱う事によってフェイクトリガーの削減を狙う。NSWからのデータは情報量が多いため、Run-2までで読み出していたよりも大きなサイズのデータを扱う必要が生じる。Sector LogicはNSWからの情報をGTXで受信し、レベル1トリガーが発行されたイベントの情報を後段のデータ読み出しシステムであるReadOut Driver (ROD)へと送信する。しかし、Run-2までで用いられているRODではRun-3からの増加する情報量に対処できないため再開発が必要である。Run-2のハードウェアベースのシステムをそのまま開発し直すだけの期間が残されておらず、データ読み出しシステムをデータ取得中に細かなデバッグ・改良できることが望ましいため、Run-3からはレベル1エンドキャップミュオントリガー用に新たにソフトウェアベースのデータ読み出しシステム (Software-based ROD : SROD) の開発に着手した。SRODはATLAS全体のデータ取得の枠組みであるATLAS Trigger/DAQシステム (TDAQシステム) に則って動作するシステムである。ハードウェアベースのシステムと遜色の無い処理性能を実現し、かつソフトウェアベースのシステムである利点を十分に活かしたシステム構築を行う必要がある。本章ではSRODシステムの概要と性能評価の詳細を述べる。

5.1 ATLAS Trigger/DAQシステム

ATLAS実験では、3章で記述したように、トリガー発行のための処理系統と、トリガー発行がなされた検出器情報を記録するためのデータ読み出し系統がある。特にデータ読み出し系統ではオフラインでの物理解析に必要な検出器の情報を記録するためのデータフローを備えており、またトリガーデータも記録している。読み出したトリガーデータを用いてトリガー発行の状況や検出器の状態などをモニタリングすることで、データロスを避け、また不要な事象を極力削減する。極力なくすために非常に重要である。レベル1エンドキャップミュオントリガーに関するデータフローを図5.1に示す。まずセクターロジックは担当する検出器からの情報を全て読み出し、Level-1 Accept (L1A) 信号が分配される (衝突から $2.5\mu\text{sec}$ 以内) まで保存しておく。L1A信号を受信すると、セクターロジックはReadOut Driver (ROD) と呼ばれるデータ読み出しシステムへとデータを送信する。RODはデータを受信すると、定められたデータフォーマットにイベントビルディングを行い、後段のデータ収集システムであるReadOut System (ROS) へとデータを送信する。RODは各検出器グループによってそれぞれ独自に実装されており、ROSはそれらのRODからのデータの一つにまとめハイレベルトリガーの処理に使用できる形式で保持しておく。RODとROSの間の通信規格はATLAS全体で統一されており、CERNが独自開発したS-LINK規格と呼ばれる通信規格を用いる^[22]。ハイレベルトリガーを通過した情報は後段のSub-Farm Output (SFO) へとデータを送信し、最終的にCERNの用意しているストレージへとデータが書き込ま

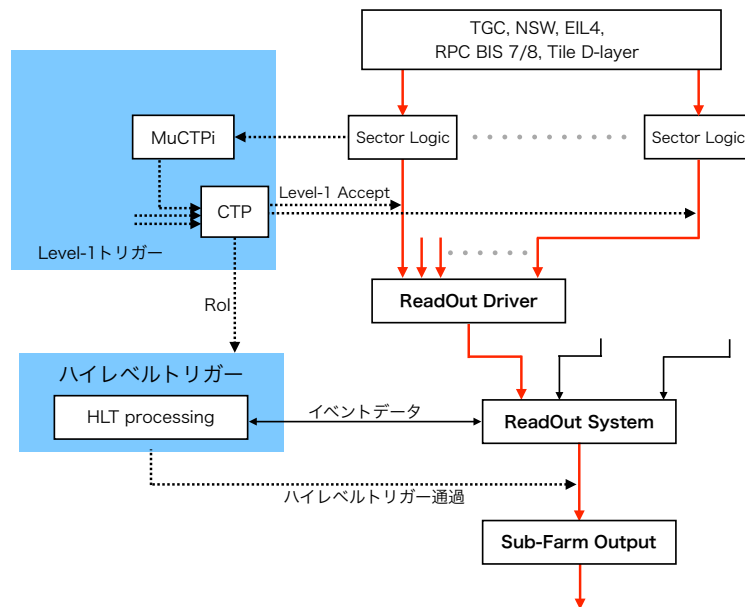


図 5.1 : レベル1 エンドキャップミュオントリガーに関するデータ読み出し系統の流れ。点線矢印で示しているデータフローは、3章で述べたトリガー処理に関する流れであり、赤色の矢印で示したデータフローは、レベル1 エンドキャップミュオントリガー用のデータ読み出しの流れである。

れる [23]。

5.1.1 トリガーデータ読み出しシステム

ReadOut System (ROS)

ラックマウントサーバー PC 上で実装されているソフトウェアシステムであり、ROD からのデータをハイレベルトリガーの処理のために一時的にデータを保持する [23]。ハイレベルトリガーはレベル1トリガーを通過したイベントに該当するデータを ROS から読み出し、それらを用いて詳細に運動量の判定を行いトリガー処理を行う。

Run-1 では、4U のサイズのラックマウントサーバー PC 上で ROS を作動させており、各 PC には最大 4 枚の 64-bit の PCI カードである ROBIN カードが実装されていた。また各 PC にはデュアルポートの 1Gbps のネットワークカードを実装しており、TDAQ のデータ収集用のネットワークと接続していた。Run-2 では、各検出器の読み出しチャンネル数の増加に伴い、また計算機室のラックの数には限界があるため、単に ROS を増やすのではなく、新たに性能を向上させたシステムへとアップグレードした。Run-2 からの ROS はこれまでの ROBIN カードではなく、新たに PCI-Express に対応した RobinNP と呼ばれるカードを使用しており、1 枚の RobinNP カードで 12 チャンネルの読み出しが可能となっている [24]。この RobinNP カードは 1 台の ROS に最大 3 枚実装している。図 5.2 に RobinNP のプロトタイプを示す。

受信用ポート	QSFP × 3
PCI-Express 8 レーン	200 MB/link

表 5.1 : RobinNP に実装されているインターフェース [24]

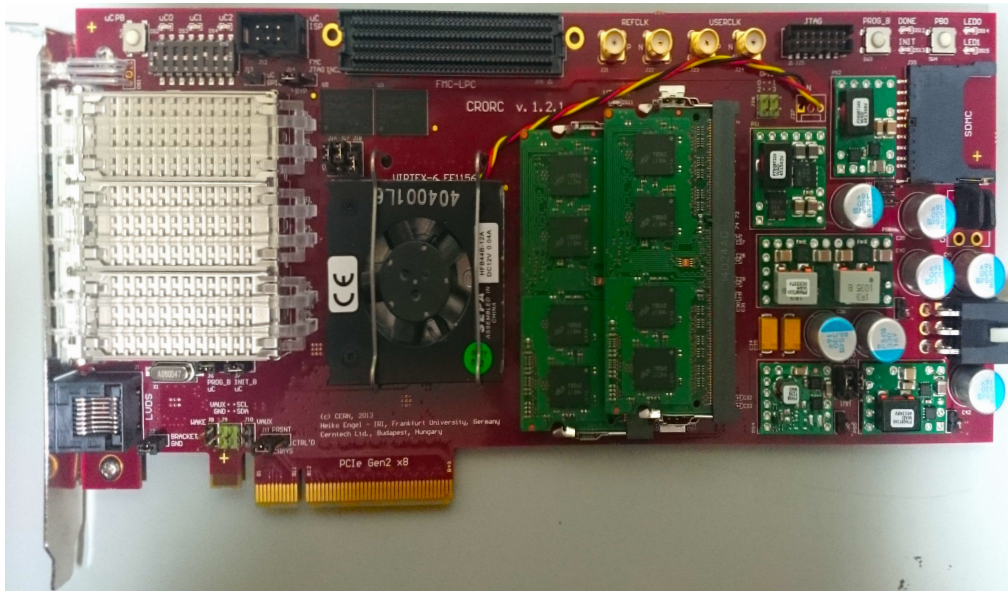


図 5.2 : PCIExpress カードに対応した RobinNP カード

Sub-Farm Output (SFO)

ハイレベルトリガーを通過したイベントを受信し、CERN の記録用のストレージへとデータを送るシステムである。CERN のストレージへと繋がるネットワークに不具合が生じ、イベントをロスする事を防ぐために SFO 自体にも大容量のディスクが存在し、自身のディスクに書き込んだ上で記録用ストレージへの送信を行う。ROS から SFO を介しデータを記録するまでのネットワークの概要を図 5.4 に示す。

5.1.2 ハイレベルトリガー発行に関するデータ処理

レベル 1 トリガーが発行されてから、イベント保存に至るまでの流れを図 5.3 に示す。まず、レベル 1 トリガー判定結果 (RoI 番号と運動量閾値) を RoI Builder (RoIB) が受け取る。現行の RoIB はソフトウェアベースで実装されており専用のサーバー PC 上で動作させている。CTP からレベル 1 トリガー判定結果を受け取り、イベントフラグメントをまとめて HLT Supervisor (HLTSV) へと送信する。HLTSV はレベル 1 トリガーの判定結果を基に処理すべきイベントを読み出し、ギガビットイーサネットを用いたネットワークで接続されている HLT 処理用の PC へとイベントを送信する。HLTSV は、その際に処理を割り当てた HLT ノードでの動作が正常に終了するかどうかを監視しつづける。HLTSV からレベル 1 トリガー判定結果を受け取るプロセスは Data Collection Manager (DCM) と呼ばれるプロセスである [13]。DCM は処理すべきイベントフラグメントを ROS から読み出して保持する。実際に HLT のアルゴリズムを読み込んで実行するための HLT Processing Unit (HLTPU) へと処理を割り当て、処理の終了を監視する。処理が終わると、HLT アルゴリズムの処理が終了したことを示すメッセージを HLTSV へ送り、HLTSV は該当するイベントを ROS 上から削除する為のメッセージを ROS へ送る。また、HLT を通過したイベントを成型して後段の Sub-Farm Output (SFO) へとデータを送信する。

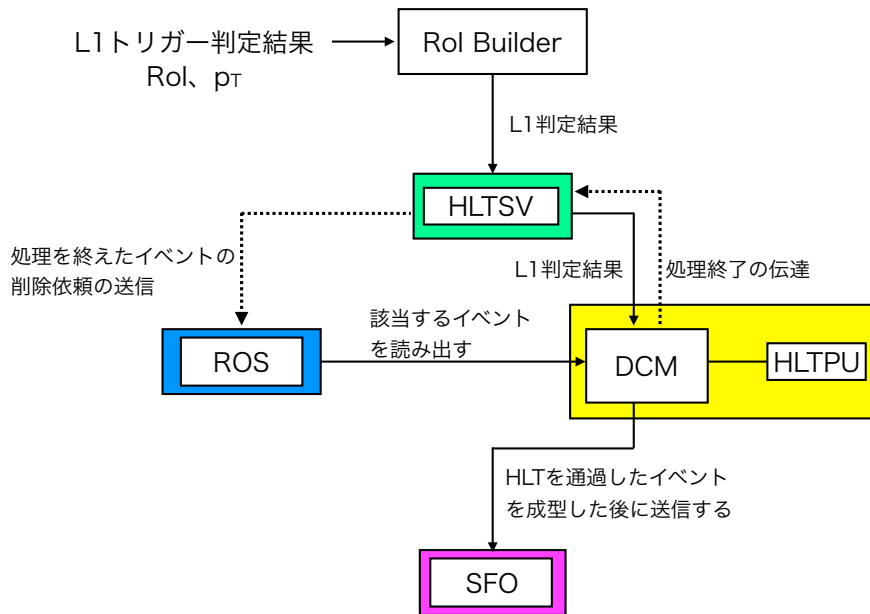


図 5.3 : レベル 1 トリガー判定後に SFO にデータをアウトプットするまでの概要図。

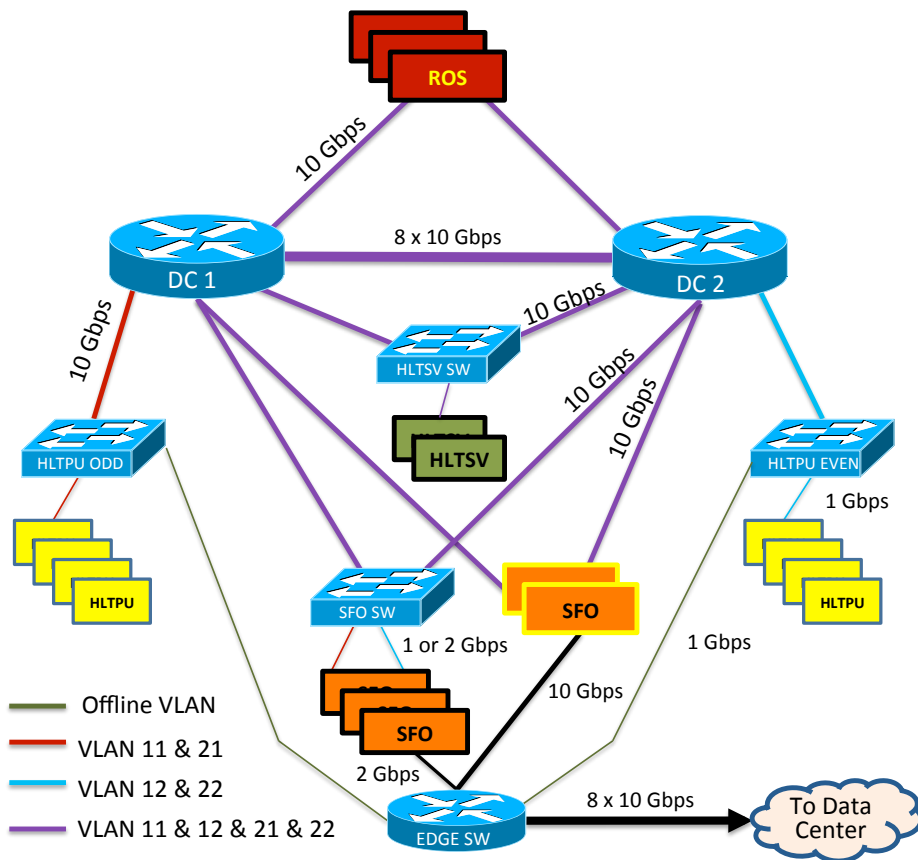


図 5.4 : ROS から後段のデータ収集用ネットワークの概念図

5.1.3 TDAQ ステートマシン

データロス無くデータを読み出すために、図 5.1 で示したような流れを維持しながら、各処理システムが互いに同期を取りながら動作しなければならない。TDAQ システムは非常に多くの要素から構成されているため、これらのアプリケーション間の同期を取るために Finite State Machine (FSM) と呼ばれるシステムを採用している。TDAQ システムのステートマシンを図 5.5 に示す。FSM はステートとコマンドから構成され、ステートとは状態を表し、コマンドとは別のステート

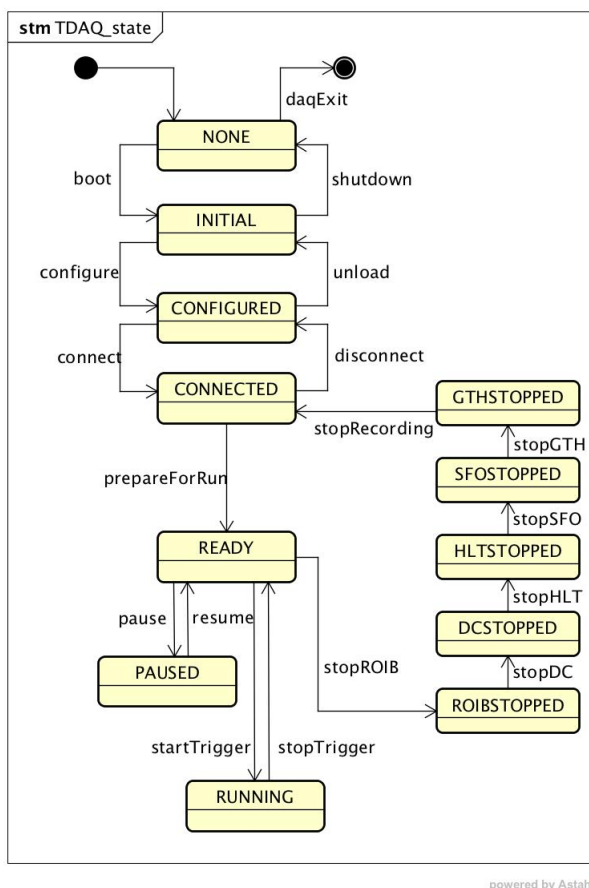


図 5.5 : TDAQ システムの採用しているステートマシン図 [4]。

に遷移させる命令である。TDAQ システムはステート遷移が引き起こされるタイミングで、各アプリケーションへ TDAQ コマンドを配分する。四角で囲まれている文字がステートを表しており、ステート間の遷移は矢印で示されたコマンドが分配された時に引き起こされる。例えば、NONE ステートから INITIAL ステートへ遷移するには boot コマンドを分配する。また各ステートの説明を表 5.2 にまとめる。

パーティション

TDAQ システムはパーティションと呼ばれる単位を持っており、パーティションには配下に様々なシステムを内包しており、単体で動作する事ができる最小単位を意味している。通常の物理データ取得のランで使用するパーティションは一つであるが、各検出器毎にキャリブレーションやコミッショニングを行う場合は、それぞれのグループのパーティションを使用してデータ取得を行

TDAQ コマンド	遷移元のステート	遷移後のステート	コマンドの概要
boot	ABSENT	INITIAL	RunController を起動させ、アイドル状態にする。
shutdown	任意のステート	ABSENT	TDAQ システムを終了する時に最後に用いられるコマンド。
configure	INITIAL	CONFIGURED	アプリケーションに OKS へのアクセスを実行させ、初期化を行う。
unconfigure	CONFIGURED	INITIAL	
connect	CONFIGURED	CONNECTED	他システムとの接続を確立する。
disconnect	CONNECTED	CONFIGURED	
prepareForRun	CONFIGURED	READY	ラン番号の取得等の最終的なデータ取得のための設定を行う。
startTrigger	READY	RUNNING	トリガーの発行を開始する。
stopTrigger	RUNNING	READY	トリガーを止める。
stopROIB	READY	ROIBSTOPPED	RoI ビルダーの動作を停止する。
stopDC	ROIBSTOPPED	DCSTOPPED	データ取得を停止する。
stopHLT	DCSTOPPED	HLTSTOPPED	ハイレベルトリガーの発行を停止する。
stopSFO	HLTSTOPPED	SFOSTOPPED	SFO を停止する。
stopGTH	SFOSTOPPED	GTHSTOPPED	

表 5.2 : TDAQ コマンドと、用いられているステートの概要 [25]。

うことができる様にするためである。この様に、TDAQ システムはパーティションで区切られ指定したパーティション内のシステムのみ動かせるようにする事で、他のシステムに影響せず試験を行うことができる様に設計されている。さらにパーティションの中にはセグメントと呼ばれる単位があり、同じ目的のために動作するアプリケーションをまとめた単位である。セグメントはデータ取得に影響を及ぼさず、動的に機能を停止させたり、新たにセグメントを増やすことが出来なければならない。セグメントの中に他のセグメントを含むことが出来、またその下には実際に動作するリソースが含まれている。TGC を例に取ったパーティションの概要を図 5.6 に示す。RootController とは検出器毎に設置されているパーティションをまとめる、最上位層の TDAQ アプリケーションである。TGC パーティションの下には TGC の A サイドや C サイドに設置されている読み出し回路や、その他モニタリングに関する機能がまとめられたセグメントと呼ばれる単位が存在する。セグメントの下にも、目的に応じてセグメントを含ませたりしている。また、セグメントの中で動作するリソースには様々な種類のものがある。一つはリソースアプリケーションと呼ばれるもので、基本的に TDAQ のコマンドに影響せずに動作するソフトウェアである。どのステートで起動し停止するかというタイミングは設定ファイルで指定することができる。各パーティションの最上位、もしくは各セグメントの最上位には RunController と呼ばれるアプリケーションが常駐しており、TDAQ システムの最上位層の RootController から配分される TDAQ コマン

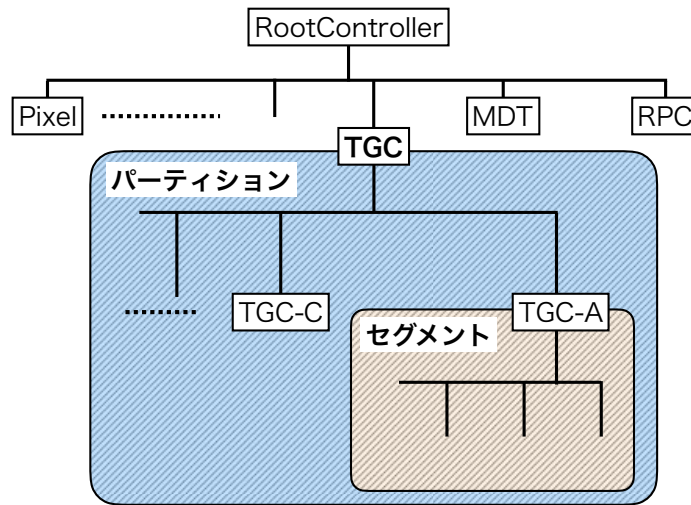


図 5.6 : TGC を例に取ったパーティションの概念図 [23]。

ドを、配下のアプリケーション群へ伝達するためのアプリケーションへである。また、セグメントには Run Control Driver (RCD) と呼ばれるアプリケーションが含まれており、RunController から分配される TDAQ コマンドを、その他のリソースアプリケーションへ分配する役割を担っており、セグメントのステータはこの RCD のステータを示している。

5.1.4 Object Kernel Support

Object Kernel Support (OKS) はライブラリとして働き、ユーザーアプリケーションが簡単にアクセスができる様なデータベースの役割を担っている [26]。OKS はパーティションやセグメント、DAQ に関する様々なパラメータが格納されている。OKS はオブジェクト指向に基いた構成を取っており、クラスの定義とそのインスタンスを XML で記述する。OKS を扱うための C++ で実装された API が用意されており、ユーザーアプリケーションへの実装は容易である。

OKS を構成するデータベース用のファイルは、クラスの定義を記述するスキーマファイルとクラスが使用するパラメータを記述したデータファイルに分かれている。複数のスキーマファイルとデータファイルを同時にロードする事が出来、OKS が各ファイルをロードしクラスとオブジェクトを結びつけメモリユーザーアプリケーションのメモリ内に格納する。一度ロードすると、データベースへアクセスする必要がなく、ユーザーアプリケーションはメモリから読み出せば良いため、データベースとしては簡単な構造を持っているが、高速に動作する事が可能である。図 5.7 に示すように、OKS データファイル内ではオブジェクトの名前を示す id タグ、属性を示す attr タグと rel タグがあり、各パラメータを与えることができる。

5.2 データ読み出しシステム

Sector Logic の導入に伴い、レベル 1 エンドキャップミューオントリガー用のデータ読み出しシステムを再開発する必要がある。現行の TGC ROD は図 5.8 に示す様な、ハードウェアベースのシステムであり、Run-2 の終わりまで用いられる。Run-3 ではソフトウェアベースのデータ読み出しシステム Software-based ROD (SROD) へと移行し、レベル 1 エンドキャップミューオントリガー用トリガーデータ読み出しシステムは Sector Logic と SROD で構成される事になる。

```

<obj class="RunControlApplication" id="TGC">
  <attr name="InterfaceName" type="string">"rc/commander"</attr>
  <attr name="IPCName" type="string">""</attr>
  <attr name="ActionTimeout" type="s32">10</attr>
  <attr name="ProbeInterval" type="s32">3</attr>
  <attr name="FullStatisticsInterval" type="s32">3</attr>
  <attr name="IfError" type="enum">"Error"</attr>
  <attr name="ControlsTTCPartitions" type="bool">1</attr>
  <attr name="Parameters" type="string">""</attr>
  <attr name="RestartParameters" type="string">""</attr>
  <attr name="Logging" type="bool">1</attr>
  <attr name="InputDevice" type="string">""</attr>
  <attr name="InitTimeout" type="u32">60</attr>
  <attr name="ExitTimeout" type="u32">5</attr>
  <attr name="StartIn" type="string">""</attr>
  <attr name="RestartableDuringRun" type="bool">0</attr>
  <attr name="IfExitsUnexpectedly" type="enum">"Error"</attr>
  <attr name="IfFailsToStart" type="enum">"Error"</attr>
  <rel name="InitializationDependsFrom" num="0"></rel>
  <rel name="ShutdownDependsFrom" num="0"></rel>
  <rel name="Program">"Binary" "rc_controller"</rel>
  <rel name="ExplicitTag">"" ""</rel>
  <rel name="Uses" num="0"></rel>
  <rel name="ProcessEnvironment" num="0"></rel>
  <rel name="RunsOn">"Computer" "pc-tdq-onl-32.cern.ch"</rel>
</obj>

```

図 5.7 : TGC パーティションで使用されている OKS データファイルの記述例。

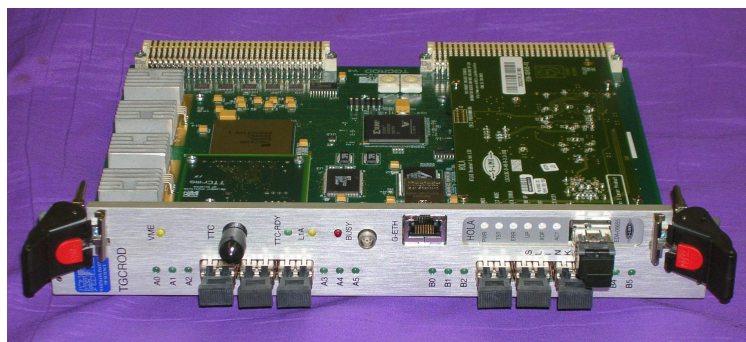


図 5.8 : Run-2 まで用いられるハードウェアベースの TGC ROD

TGCのエンドキャプトリガーセクターは合計48個あり、トリガーセクター2個をSector Logic1台が担当するので、エンドキャプトリガーセクターに対してSector Logicは24台必要である。Sector Logicは9U規格のVMEクレート上に実装され、VMEクレートのスロット数の制限により1つのVMEクレートに12台のSector Logicが実装される事になっている。SRODがVMEクレートを跨いでデータを受信することは好ましくなく、Sector Logicのステート管理の観点からもVMEクレート単位で動作したほうが良い。そこでSROD1台は1クレートを担当する事が望ましいので、エンドキャプトリガーセクターに対してSRODは2台担当する。フォワードトリガーセクターに関しても同様の議論が出来、フォワードトリガーセクターが合計24個あるため、必要なSector Logicの数は12台、必要なSRODの数は1台となる。ゆえにTGC片サイドにつきSROD3台でデータの読み出しを担当し、Aサイド・Cサイドを合わせて計6台のSRODが設置されることになる。

5.2.1 Sector Logic のデザイン

Sector LogicのFPGAにはSiTCPと呼ばれるFPGAとイーサネットを接続する技術が用いられており、読み出したデータをイーサネット経由で専用のソフトウェアを構築せずに最大1 Gbpsの通信速度でSRODへ送信する事ができる。Sector LogicはSiTCPによりイーサネット経由でSRODにデータを送信する。これによりFPGA側ではデータをFIFOに格納していく要領で動作すれば良く、また受信側であるSRODはPCサーバーからデータを受け取ると想定して実装すればよい。L1A信号を受信すると、該当するデータと1 BC前、1 BC後、2 BC後のデータをバッファから読み出して、デランダムマイザと呼ばれるFIFOへと格納する。デランダムマイザは2048-bit幅のデータをLHCクロックに同期した40 MHzで読み出し、読み出し用の160 MHzのクロックに同期した16-bit幅のデータをアウトプットし、データ圧縮のためのゼロサプレスと呼ばれる処理ブロックへデータを渡す。データを圧縮した後SiTCPモジュールへとデータを渡し、イーサネット経由でデータをSRODへと送信する。

ゼロサプレス

0が多く含まれるデータに対して効果的にデータサイズを圧縮できるロジックであり、Sector Logicはゼロサプレスを用いてデータサイズを可能な限り削減する。L1Aを受信し該当するデータをデランダムマイザに格納した後、ゼロサプレスではデータをセルと呼ばれる16-bit単位で読み出して行く。ゼロサプレスの概要を図5.9に示す。セルの中に0でないビットが含まれているかど

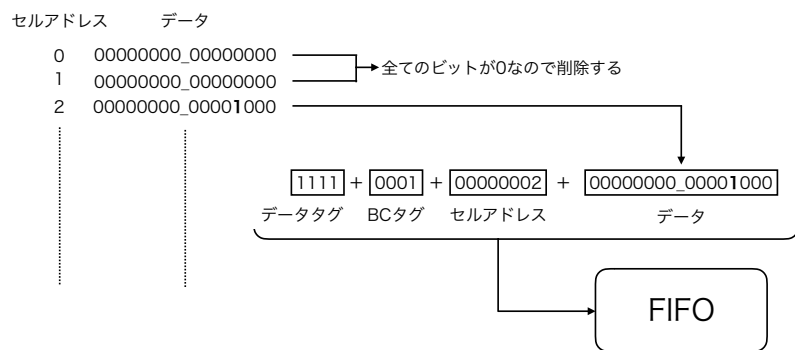


図 5.9 : ゼロサプレスの概念図

うかを判定し、セル内のビットが全て0であればそのセルを削除する。セル内に1のビットが一つでも含まれていた場合は、データを読み出して何セル目であるかを識別する16-bitのパターンを付加して32-bitで送信する。デランダムマイザのアウトプットのデータフォーマットは予め決められており、セル番号で何のデータが圧縮されたか一意に決めることができる。データに0が多く含まれる場合はゼロサプレスロジックは有効であり、圧縮率は約 10^{-3} と見積もられている[27]。またデータに付加する識別パターンの内訳を表5.3にまとめる。

	ビット幅	概要
データタグ	4-bit	SRODがデータと識別するためのタグであり、0xfの固定値を設定する。
バンチタグ	4-bit	読み出したデータがどのバンチに属しているかを表す。1BC前なら0x0、現在のBCなら0x01、1BC後なら0x02、2BC後なら0x03を付加する。
セルアドレス	4-bit	ゼロサプレスロジックに渡されたデータの何セル目に属していたかを表す。

表 5.3 : データに付加する16-bitの識別パターンの内訳。

5.2.2 TTC-Fanout Board のデザイン

Timing Trigger and Control (TTC) 信号

ATLAS 検出器の各フロンドエレクトロニクス間の同期を取るために、Timing Trigger and Control (TTC) システムと呼ばれる機構を用いて、各検出器にTTC信号を分配しLHCクロックとの同期等を行う。TTCシステムがフロンドエンドエレクトロニクスに分配する信号は、LHCのビーム衝突頻度に同期したLHCクロック、レベル1トリガーの発行を示す信号(L1A信号)、LHC1周分のバンチ衝突回数を示すOrbit ID、バンチ衝突の回数を表すリセット信号のBunch Counter Reset (BCR)、L1Aの発行によってカウントアップしていくL1IDが0に戻るタイミングで発行されるリセット信号のEvent Counter Reset (ECR)、レベル1トリガーがどのような条件で発行されたかを示すトリガータイプである。TTC信号の内訳を表5.4に示す。ATLASトリガーシステム

LHC クロック	LHC が分配する 40 MHz のクロック。
Level-1 Accept	レベル1トリガーの発行を示す信号。
Bunch Counter Reset (BCR)	Orbit 信号を受信すると TTCvi 内で生成される信号。
Event Counter Reset (ECR)	ルミブロックと呼ばれるデータ取得の境目で発行される信号。
テストパルストリガー	TTCvi 内で生成する事が出来、この信号をフロントエンド回路に送る事で様々な試験を行うことができる。

表 5.4 : TTCシステムで分配される信号の内訳。

はCentral Trigger Processor (CTP) とTTCパーティションから構成されており、TTCパーティションはLocal Trigger Processor Interface (LTPi)、Local Trigger Processor (LTP)、TTCvi、TTCex、TTCrx、ROD-BUSYモジュールから構成される。パーティションの数とLTPiモジュールの数は対応する。トリガーシステムの全体像図5.10に示し、主要なモジュールを図5.11に示す。

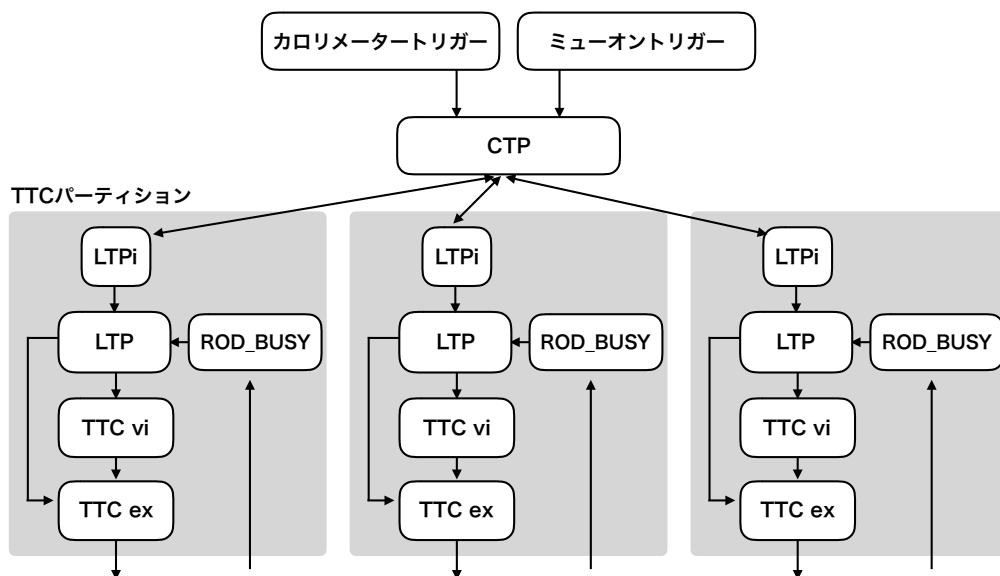


図 5.10 : ATLAS トリガーシステムの全体像 [28]。灰色で囲まれた単位が TTC パーティションを表しており、CTP はトリガー結果と同期信号を約 40 個の TTC パーティションへと分配する。



(a) Local Trigger Processor の写真。



(b) TTCvi モジュール



(c) TTCex モジュール

図 5.11 : TTC システムの主要なモジュール

CTP は各検出器から情報を受け取り、トリガメニューとして実装されているトリガー発行条件に照らし合わせて 25 nsec 毎にレベル 1 トリガーの判定処理を行う。レベル 1 トリガー発行に伴い、CTP は L1A 信号を LTP へ分配する。LTP は各検出器毎に設置されていて、CTP から L1A の他に LHC クロック信号、TTC 信号を受け取る。L1A と Orbit ID は TTCvi に、LHC クロックは TTCex に分配する。TTCvi は LTP から受け取った信号を A チャンネルと、B チャンネルに分けて TTCex へと送信する。A チャンネルには L1ID、BCID、ECRID が含まれ、B チャンネルには Orbit ID やトリガータイプを含める。また TTC パーティションで ROD からの BUSY 信号を受けると、LTP を通じて CTP へ BUSY 信号が送られてトリガー発行を止めることができる。

TTC-Fanout ボード

Run-2 まで用いられていた TTC 信号分配のためのモジュールである Service Patch Panel (SPP) はフラットケーブルのピン幅の制限から、各モジュールに分配していない TTC 信号があった。Sector Logic の導入に伴う SROD の導入により、イーサネット経由で TTC 信号を TCP/IP パケットに整形するためのモジュールが必要となった。そこで SPP を刷新し、TTC 信号をエンドキャップミューオントリガーシステムに分配するための TTC-Fanout ボードの開発も行った。TTC-Fanout ボードの写真を図 5.12 に示す。TTC-Fanout ボードは受け取った TTC 信号を Sector Logic にフラットケーブルを用いて配分し、SROD には TTC 情報を SiTCP を用いて送信する。A チャンネル、B チャンネルから受け取った情報をそれぞれに用意されている FIFO に格納して、1 イベント分の情報が揃ったタイミングで別の FIFO にデータを移し、最終的に SiTCP を用いて SROD へと送信する。

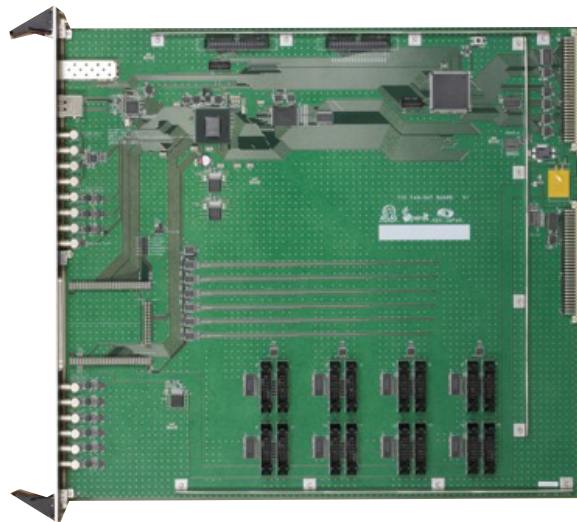


図 5.12 : TTC-Fanout ボードの写真 [29]。

5.3 Software-based ROD

5.3.1 要求される処理能力

SROD は 12 台の Sector Logic と 1 台の TTC-Fanout ボードと、10 GbE に対応したネットワークスイッチを介して通信しデータを受信する。トリガーデータは L1A の発行頻度である 100 kHz

で読み出す必要があり、高速で複数台のボードと通信を行いながら、さらにイベントビルディングを行い ROS へと送信しなければならない。各ボードと SROD の通信の概要を図 5.13 に示す。TTC-Fanout ボードからのデータは ID 情報であり、1 イベントのデータサイズは固定でその大き

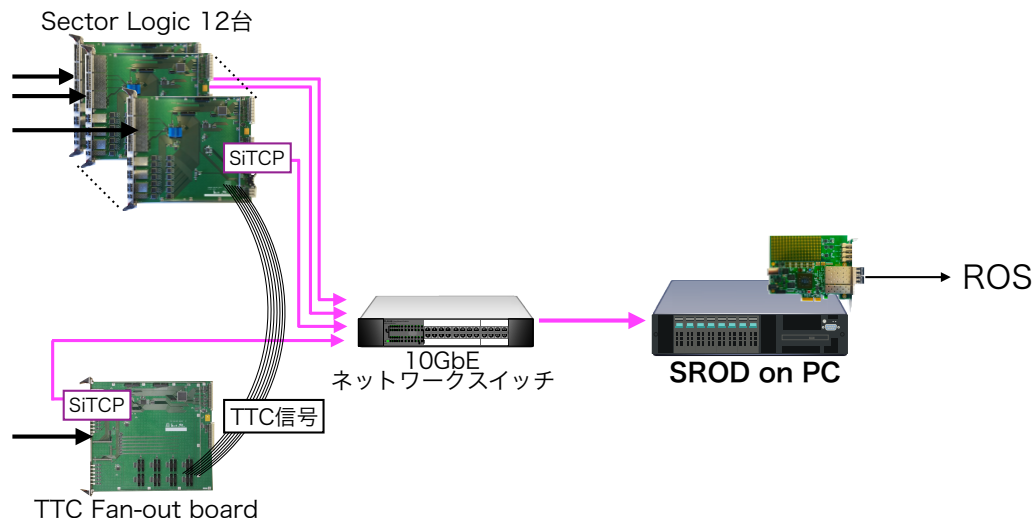


図 5.13 : ネットワークスイッチを介して各ボードとの通信の概要。SROD は後段の ROS へと S-LINK 規格でデータを送信する。色を付けた矢印はイーサネットを用いた通信を示す。TTC-Fanout ボードから Sector Logic の TTC 信号分配は 16 ピンのフラットケーブルを用いて行われる。

さは 160 bit である。セクターロジックは検出器のヒット情報に基いたデータを送信するため、1 イベントのデータサイズは可変長でその平均の大きさは 100 bit と見積もられている。

セクターロジックへの入力、TGC-BW、EI/FI、Tile-D layer、RPC BIS 7/8、NSW からのデータを扱う。1 BC あたり、エンドキャップ部では 922 bit、フォワード部では 868 bit のデータが送られてくる。ゼロサプレスロジックに入力するときには 16 bit 単位で入力するので、 $922 (= 16 \times 57 + 10)$ bit を $928 (= 16 \times 58)$ bit に $868 (= 16 \times 54 + 4)$ bit を $880 (= 16 \times 55)$ bit に直す。また MuCTPi へ送信するセクターロジックのトリガー判定結果は 1BC あたり、160 bit 出力する。ゼロサプレスロジックにかけられる直前の ROD へ送られてくるデータサイズは、エンドキャップ部では $(928 + 160) \times 4BC = 4352$ bit、フォワード部では $(880 + 160) \times 4BC = 4160$ bit である。ゼロサプレス以降にヘッダー、トレーラー情報 96 bit を付加し、ゼロサプレスによる圧縮率は 10^{-3} と見積もられているので、実際に SROD はへ送るデータはエンドキャップ部では 104.448 bit、フォワード部では 104.064 bit になる。

以上から SROD へ送られてくる平均的なデータ通信量は

$$\{160 \text{ bit/TTC - Fanout ボード} + (104 \text{ bit/セクターロジック}) \times 12\} \times 100 \text{ kHz} = 134 \text{ Mbps}$$

である。データを受信した後に同じイベント ID の情報を集めイベントビルディングし、ヘッダーとトレーラーを付加して ROS へ送信する。その時のデータ通信量は SROD が付加すべきヘッダー、トレーラー情報のサイズが 1 イベント当たり 480 bit であることを踏まえると、

$$134 \text{ Mbps} + (480 \text{ bit/イベント}) \times 100 \text{ kHz} = 179 \text{ Mbps}$$

と計算できる。

5.3.2 マルチプロセスアーキテクチャ

SROD のシステム構成に関して、マルチスレッドもしくはマルチプロセスでの実装が考えられる。マルチスレッドでは1つのスレッドのクラッシュが全てのスレッドに波及してしまう可能性がある事があり、継続的に DAQ を続ける事が出来なくなる事が予想できたため、図 5.14 に示すようにマルチプロセスアーキテクチャを採用し実装する事にした。また、要求されている処理を実現するためにシステム内部に様々な役割を担っているプロセスが存在する。現在 SROD を実装している PC は物理 CPU1 個、論理プロセッサ 12 個のマルチコアの CPU である。以下ではこれらの概要を説明する。

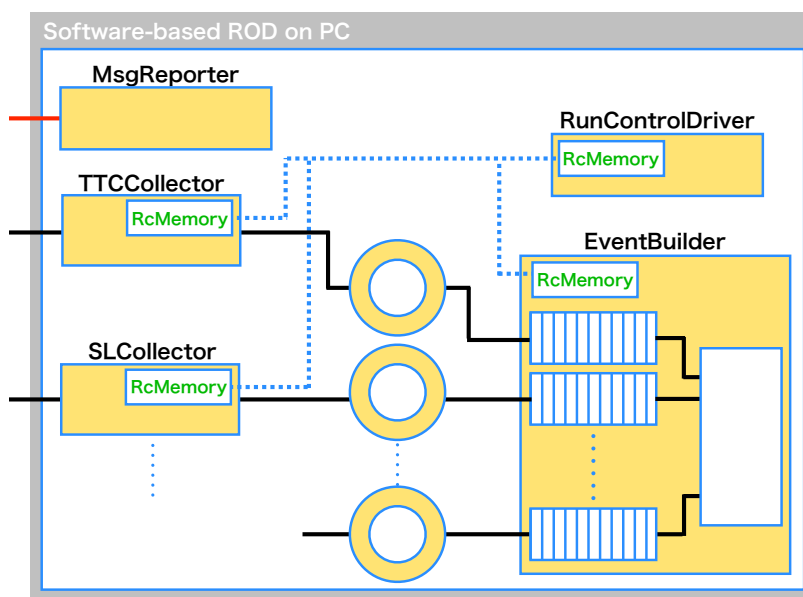


図 5.14 : SROD のマルチプロセスの概要図。黒の矢印でメインデータフローを示しており、破線がスタート・プロセス管理、赤線が ERS との通信を示す。

RunControl Driver (RCD)

SROD 全体のプロセスの同期を取るために、各プロセスに対して TDAQ コマンドを共有メモリを用いて配分する。また各プロセスのバッファやリングバッファの充填具合や、動作状況をモニタリングし SROD 全体の動作状況を管理するためのプロセスである。

TTC/SL Collector

TTC-Fanout ボード (Sector Logic) からイーサネット経由でデータを読み出すプロセスである。読み出しの概要を図 5.16 に示す。コレクタープロセスは内部に読み出し用のバッファを持っており、TCP ソケットバッファから read() システムコールを用いてデータを読み出す。read() システムコールの戻り値は読み出したバイト数であり、アプリケーション層から TCP ソケットバッファの内容量は分からない。そこでデータロスを防ぐために、リングバッファに直接書き込むのではなく、一度コレクタープロセス内部のバッファに保存してからリングバッファへ移す。また

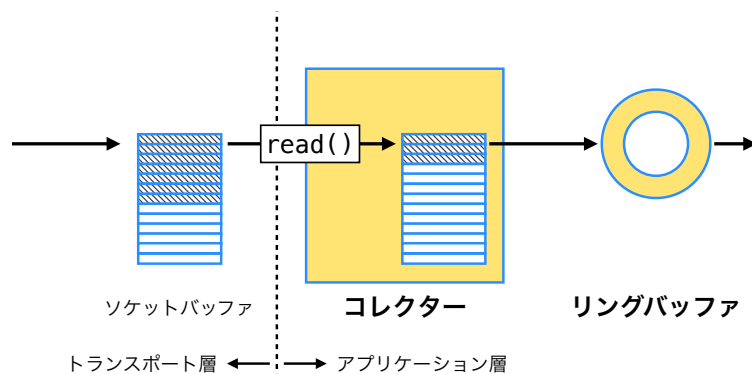


図 5.15 : コレクタープロセスが各ボードからデータを受信する概要。また破線で示したように、コレクターは OSI 参照モデルにおけるアプリケーション層とトランスポート層の境界になる。

TCP ソケットバッファはカーネルパラメータにより管理されており、現在開発に用いている PC のバッファサイズは次のようである。

```
cat /proc/sys/net/ipv4/tcp_rmem
4096      87380  4194304
```

EventBuilder

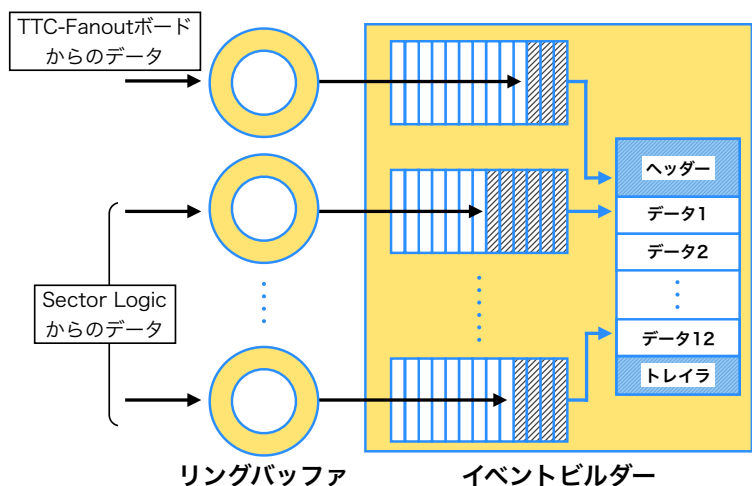


図 5.16 : イベントビルダーが同期の取れたデータを読み出しデータを成形する流れを示している。

図 5.16 にイベントビルディングの概要を示す。イベントビルダーは内部にバッファを 2 種類を持っており、リングバッファからデータを一時的に読み出すための FIFO 構造を持ったバッファと、FIFO から同期の取れたデータを読み出し、ROD フォーマットに成型するために使用するためのバッファが存在する。FIFO はリングバッファの個数に対応した数持っており、基本的に SROD は 1 台の TTC-Fanout ボードと 12 台の Sector Logic と通信するため FIFO は合計 13 個持っている。まずリングバッファからデータを読み出し対応する FIFO へとデータを格納する。そして、TTC-Fanout ボードからのデータを読み出して ID 情報を取得し、次に Sector Logic からのデータを格納している FIFO へアクセスし、同じ ID 情報を持っているかどうかを確認する。パケット

ロスなどの不具合が生じていなければ、読み出した Sector Logic からのデータの ID 情報と一致するはずであり、12 台の Sector Logic からのデータ全てに対して ID 情報の整合性を確認した後、同期が取れていれば後段のデータ成型用のバッファの所定の位置に格納する。そして決められたフォーマットに成型し S-LINK カードを利用して ROS へデータを送信する。

また、状況に応じ S-LINK カードを用いて BUSY 信号を出力する。データの送信のために EventBuilder プロセスが S-LINK カードのデバイスドライバを掴んでいるため、EventBuilder のみが S-LINK カードを使用できる用にシステムを構築するのが安全である。例えばコレクタープロセスが BUSY 信号を出しトリガー発行を止めなければならない状況に陥った場合、コレクタープロセスは EventBuilder に対してソフトウェア割り込みを利用して EventBuilder に対して BUSY 信号出力の要請を行うこともできる。

MsgReporter

各プロセスの動作状況をモニタリングするためのプロセスである。各プロセスは不具合が生じた場合 MsgReporter プロセスに対して、TCP/IP 通信を用いてエラー等を知らせるためのメッセージを送信する。現在の開発では同じ PC 上で動作しているプロセス間通信であるが、今後 MsgReporter が別 PC で一括で全ての SROD からのデータを受信する様なシステムへの変更が容易になるように、汎用性を持たせるために TCP/IP 通信での実装を行っている。MsgReporter はサーバープロセスとして動作し、SROD の起動と共にサーバーソケットの作成を行う。現在開発している MsgReporter は同じ PC 上で動作しているため、IP アドレスにはループバックアドレス (127.0.0.1) を、ポート番号には 620000 を指定している。ソケットの情報は OKS で管理されており、各プロセスは接続要求のタイミングで情報を読み出しソケット接続の確立を試みる。RUNNING ステート中には MsgReporter とその他のプロセスの通信は常に確立され続けており、各プロセスは事前に定義されたメッセージ通信用のパケットを MsgReporter へと送信する。MsgReporter は接続が確立しているポートをポーリングで監視しており、読み出し可能になったソケットを見つけメッセージを読み出す。読み出したパケットは MsgReporter 内でデシリアライズされ、TDAQ アプリケーションの機能を用いて IS 上へ表示させる。

MsgReporter はプロセスからのメッセージを受信すると、TDAQ システムの提供している ERS (Error Reporting Service) へとメッセージを送信し、IGUI 上に SROD からのメッセージを表示する。

Ring buffer

TTC-Fanout ボード、Sector Logic からのデータ同士は非同期で SROD へと送信されてくるため、これらのデータの到着タイミングのばらつきを吸収するためのバッファである。RingBuffer はコレクタープロセスとイベントビルダー間のデータのやり取りを実現するために、共有メモリを用いて実装されており、論理的にバッファの先頭と最後尾が繋がれた循環バッファとなっている。

5.3.3 プロセス間通信

各プロセス間が正しくデータ、メッセージの送受信を行うためには、状況に沿ったプロセス間通信を採用する必要がある。特に SROD が使用しているプロセス間通信はソケット通信・共有メモリ・割り込みの 3 種類である。

ソケット通信

Collector プロセスと Sector Logic、TTC-Fnaout board との異なるホスト同士の通信に使用しており、また全てのプロセスと MsgReporter とのエラーメッセージのやり取りである同一ホストでの通信にも使用している。Sector Logic、TTC-Fanout board 上には SiTCP と呼ばれる FPGA と Ethernet を結ぶ為の技術が用いられており、この技術を使うことで、SROD 側では特別に特殊な実装を要される訳ではなく、TCP/IP 通信のクライアント・サーバーの関係として単に通信を行えば良いだけとなる。

SL、TTC-Fanout 側がサーバー、SROD 側がクライアントとして接続を行う。TCP/IP の接続の概要図を図 5.17 に示す。

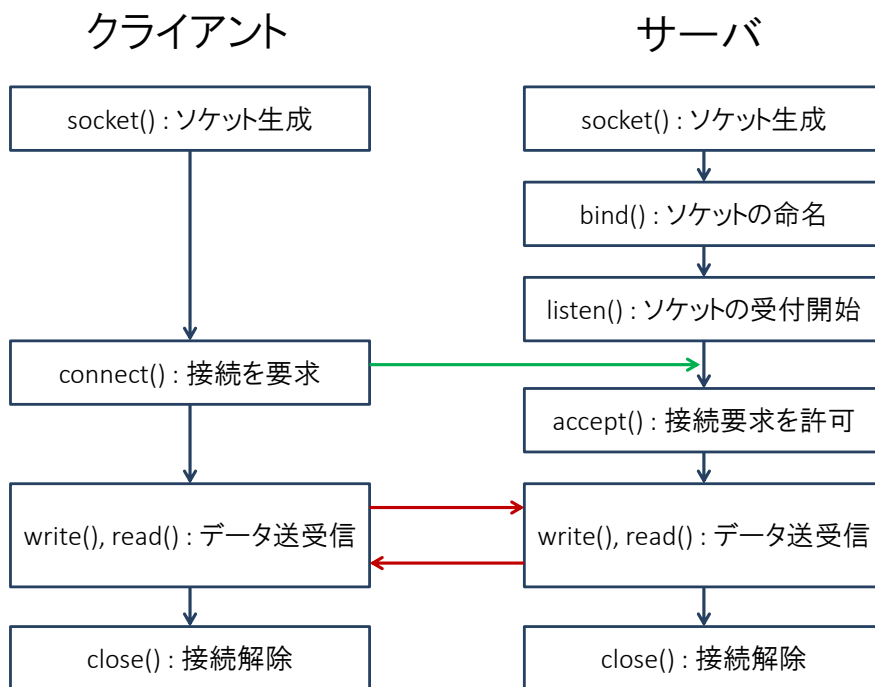


図 5.17 : TCP/IP コネクションの手順の概要図 [4]

共有メモリ

コレクタープロセスが読み出したデータを一時的に書き込むリングバッファも共有メモリを用いて実装されているが、ここでは特に各プロセス間同士でステートの同期、動作状況の管理を行うための RCMemory と呼ばれる共有メモリの実装方法について説明する。RCMemory のデータ構造を図 5.18 に示す。SROD 起動時に各プロセスは共有メモリを作成する。先頭から 4 Byte の領域が 2 個定義されており、それぞれコマンドを格納する部分と、現在のステートを格納する部分になっている。書き込んだり読み込んだりする場合は RCMemory クラスで管理されているそれぞれの部分へのポインターを介して処理を行うことにしている。主要なプロセスが共有メモリを通じてデータのやり取りを行う概要図を図 5.19 に示す。例えば、ステート遷移を行うためにはユーザーは TDAQ システムの枠組みを用いて RunControl Driver (RCD) へ TDAQ コマンドを送信する。RCD は TDAQ コマンドを受信すると、該当するステートを共有メモリに書き込む。各プロセスは一定間隔で RCD の共有メモリを読み込んでおり、現在のステートが変化していればそれ

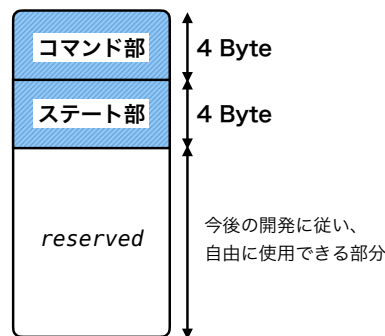


図 5.18 : 共有メモリの内部構造。

に従ってステート遷移を行う。ステート遷移が成功したタイミングで自身の共有メモリに現在のステートを書き込む。RCD も一定間隔で各プロセスの共有メモリを読み込んでおり、管理下にある全てのプロセスのステートが正しくステート遷移できているかどうかを確認し、定義されている次の処理へ移る。

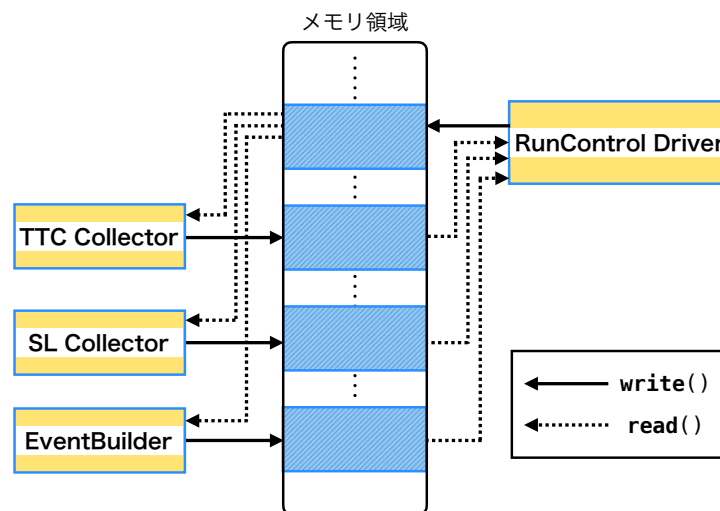


図 5.19 : 共有メモリを用いたプロセス間通信の概要を示す。SROD 内部の主要なプロセスはメモリ領域に自身の共有メモリを確保する。RunControl Driver のみ各プロセスの共有メモリを読み込み専用で open() することにより、プロセスの管理を行う。

割り込み

Collector プロセスと EventBuilder プロセスの非同期通信にソフトウェア割り込みを使用している。ソケット、共有メモリを用いた通信では、基本的にはデータが到着した事をポーリングして待ち受けなければならない、その間他の作業が止まってしまう、もしくはデータが到着したリアルタイムでの対処ができなくなる。そこで、各プロセスから EventBuilder プロセスへ即座の対応を要求するタイミング (BUSY 信号の出力等) で、ソフトウェア割り込みを用いて通信を行っている。

5.4 通信用の新開発の PCI-Express カード

5.4.1 S-LINK 規格

各検出器の情報はそれぞれ独自のハードウェアを用いて読み出しているため、それらのデータを一括で集める際に通信規格を揃えていないと実装が非常に煩雑になる。そこで、フロントエンド回路とデータ読み出しシステムとの通信を画一なものにするために CERN は、エラー検知、フローコントロール用の通信が可能な S-LINK (Simple Link Interface) と呼ばれる通信規格を開発した [22]。S-LINK 規格では図 5.20 に S-LINK 規格を用いた通信の概要を示す。ATLAS 実験において、図 5.20 の左側に示されている FEMB は ROD を表し、右側に示されている ROMB は ROS を表している。S-LINK 規格は各検出器グループのデータ読み出しシステムである ROD と、ATLAS

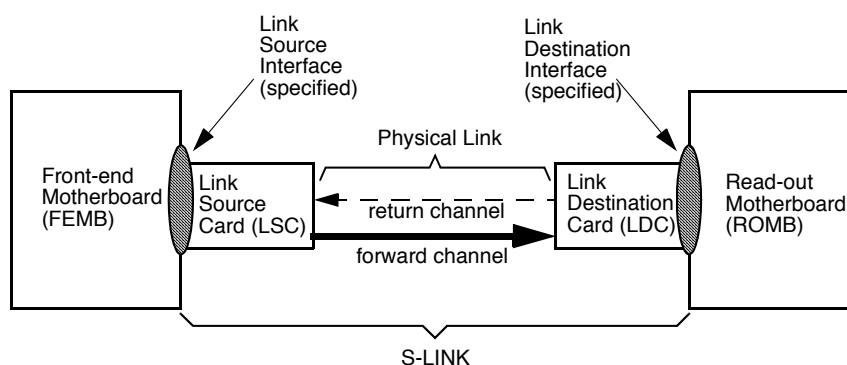


図 5.20 : S-LINK 規格の概要図 [22]

全体のデータ収集システムである ROS とを接続する。S-LINK 規格では一方向のみのデータ通信が許されており、それは ROD から ROS へのデータ通信に使用される。また ROS は ROD に対して S-LINK 規格を用いることで、ROS 上のメモリが不足しこれ以上データの受信が困難になった場合に送信側である ROD に対して、処理が追いついていない事を示すためのフローコントロール信号 (XOFF と呼ばれている) を送ることができる。またデータの受信が可能になったときにもフローコントロール信号 (XON) を出力するため、無駄な通信を省き効率の良いデータ通信を行うことができる。どの様な原因で ROS が XOFF 信号を ROD に出力しているかの情報は IS 上に表示されるため、実験データ取得中のオンラインでのモニタリングが可能になっている。

SROD が ROS へ送信する際の通信規格も S-LINK 規格を用いる必要があるが、図 5.20 中の LSC に対応する S-LINK 規格でデータ送信を行うための商用 PC に実装可能な周辺機器が開発されていなかったため、特殊電子回路株式会社と共同で新たに S-LINK 通信に対応した PCI-Express カードの開発を行った。図 5.21 に開発した S-LINK カードの写真を示し、また性能を表 5.5 にまとめる。

PCI-Express	Gen-2 ×4 (8.0 Gbps)
使用している FPGA	Xilinx Kintex-7 FPGA XC7K160T
SFP×2	データ送信用
Open-drain×1	BUSY 信号出力

表 5.5 : 開発した PCIe カードに実装されている主要な部品

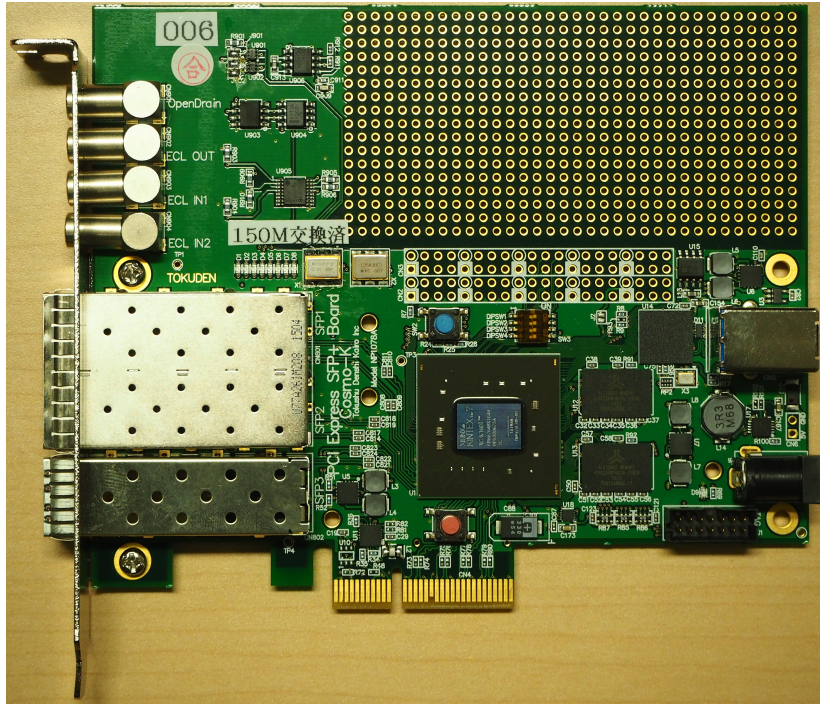


図 5.21 : 新開発した S-LINK 規格に対応した PCI-Express カード

5.5 入出力データフォーマット

SROD が送受信するデータのフォーマットと、ROS がイベントビルディングし SFO へ送信する際のデータフォーマットを示す。TTC-Fanout ボードからは TTC 信号を TCP/IP パケットの形式で受け取り、そこから各種 TTC 信号を読み出す。Sector Logic からの検出器検出器情報を読み出すが、SROD はどの検出器からのデータであるかは特に意識する必要はなく、事前に定められたデータフォーマットに従って成型し直せばよいだけである。ROS に送信する際には ATLAS 実験全体で決められているヘッダー、トレーラーを付加する。

また、TTC-Fanout ボードと Sector Logic は SiTCP を用いて SROD へデータを送信するが、SiTCP へのデータのインプットは 16-bit 幅で行われ、SROD は ROS へ送信するデータフォーマットで定義されている 32-bit 幅で読み出すため、SROD がデータを扱う際には TTC-Fanout ボード、Sector Logic の 1 word の定義と SROD の 1 word の定義はビット幅が異なることに注意しなければならない。

5.5.1 TTC-Fanout ボードからのデータフォーマット

TTC-Fanout ボードは CTP から各 TTC パーティションへ LTPi を通じ配分される TTC 信号を、SROD へ送信できる形式に成型し直し、イーサネットを用いて送信する。TTC-Fanout ボードからの情報は検出器のデータ間の同期を取るために用いられる ID 情報である。

Level-1 ID (L1ID)

L1ID は L1A の発行に同期してカウントアップしていく ID 情報である。L1ID は TTC システムから ECR 信号を受け取るとリセットが掛けられる。TTC-Fanout からの L1ID は 24bit で、SL との比較には下位 12bit のみが用いられる。

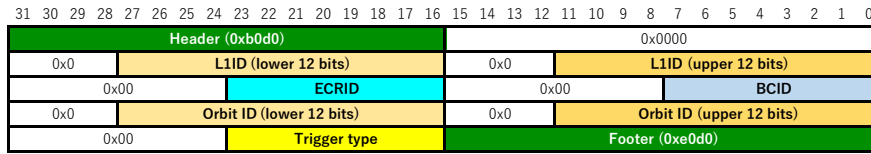


図 5.22 : TTC-Fanout から SROD へ送られてくるデータフォーマット

ECRID

L1ID のリセットを何回行ったかを示す ID 情報である。

Bunch Crossing ID (BCID)

BC クロックに同期してカウントアップする ID 情報で、BCR を受け取る度にリセットされる

Orbit ID

LHC 一周分のバンチ衝突の回数をカウントしたイベント ID である。

Trigger Type

L1A が発行されたときに、どのような条件で発行されたかを示すパラメータである。

5.5.2 セクターロジックからのデータフォーマット

SL はヒット情報を含んだ情報を送信するので、ヒットの有無に左右されるためデータサイズは可変である。

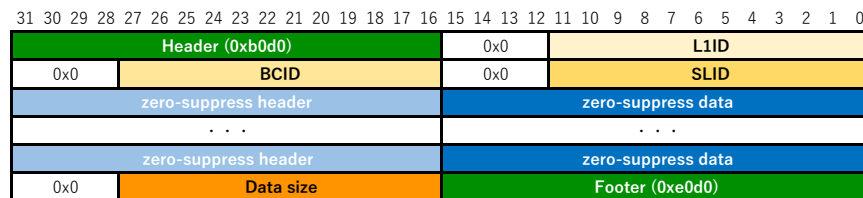


図 5.23 : SL から SROD へ送られてくるデータフォーマット

L1ID、BCID

L1ID と BCID は SL 毎にカウントアップされるため、これらの情報が同一であるかどうかを判定することで SL 間のデータの同期を取り、イベントビルディングを行う。

SLID

どの SL ボードからのデータであることを識別するための ID 情報。

データ部

ゼロサプレスの処理が終わった情報が格納されている。ゼロサプレスヘッダー部分の情報を読み取ることで SROD はゼロサプレス前の情報に復元することができる。

データサイズ

SL の 1 イベントが何バイトであるかの情報が格納されている。SROD の読み取った情報と、このデータサイズを照らし合わせることでデータの欠損を確認することができる。

5.5.3 ROD データフォーマット

ATLAS 検出器の各検出器からのデータは ROD が読み出して、ROS へ送信される。データを受信した ROS の内部では ReadOut Buffer (ROB) と呼ばれるバッファが存在しており、ハイレベルトリガーの処理を待って ROB フォーマットの作成を行い、さらに後段の SFO システムへと送信される。最終的に記録されるデータが収集されていく概念図を図 5.24 に示す。

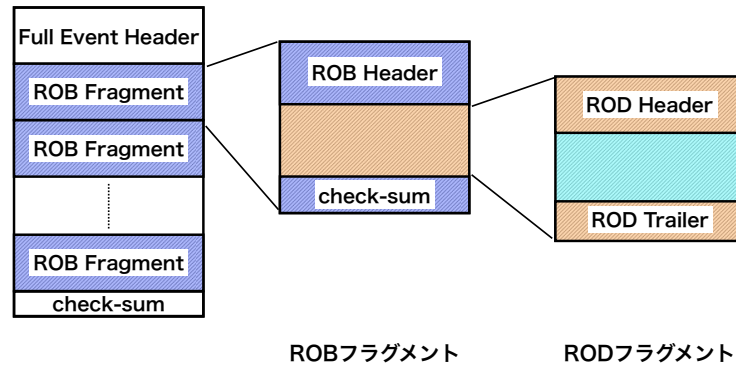


図 5.24 : ATLAS 実験が最終的に保存するデータフォーマットの概要図 [30]。

ROD から ROS のデータ転送に用いられるデータフォーマットも ATLAS 実験全体で定められており、図 5.25 に概要を示す。SROD もこのデータフォーマットに則ってデータを作成する必要があり、SROD が実際に作成するデータフォーマットを図 5.26 に示す。

以下では図 5.25 に示したヘッダー部分、トライラー部分を SROD が実際にどの様に実装しなければならないのかを簡単にまとめる。

ヘッダー部

ROD フォーマットのヘッダーは 32-bit をひとくくりにした word と呼ばれる単位が合計 9 word 集まって構成されるため、全ての情報量は 288-bit で表現される。ヘッダー部分に属す各フィールドの詳細を以下で簡単にまとめる。

Start of Header Marker

各フラグメントのヘッダーは表 5.6 に示すような決められたヘッダーマーカーで始まる様に定められている。左右非対称にヘッダーマーカーの値が定められているのは、フラグメント送信元のバイトオーダーを識別する為である。

Fragment Type	Header Marker
ROD	0xee1234ee
ROB	0xdd1234dd
Full Event	0xaa1234aa

表 5.6 : 各フラグメントのヘッダーマーカー一覧。これらのヘッダーマーカーで始まるようにしなければならない。

Header size

ヘッダー部分のブロック数を示す。

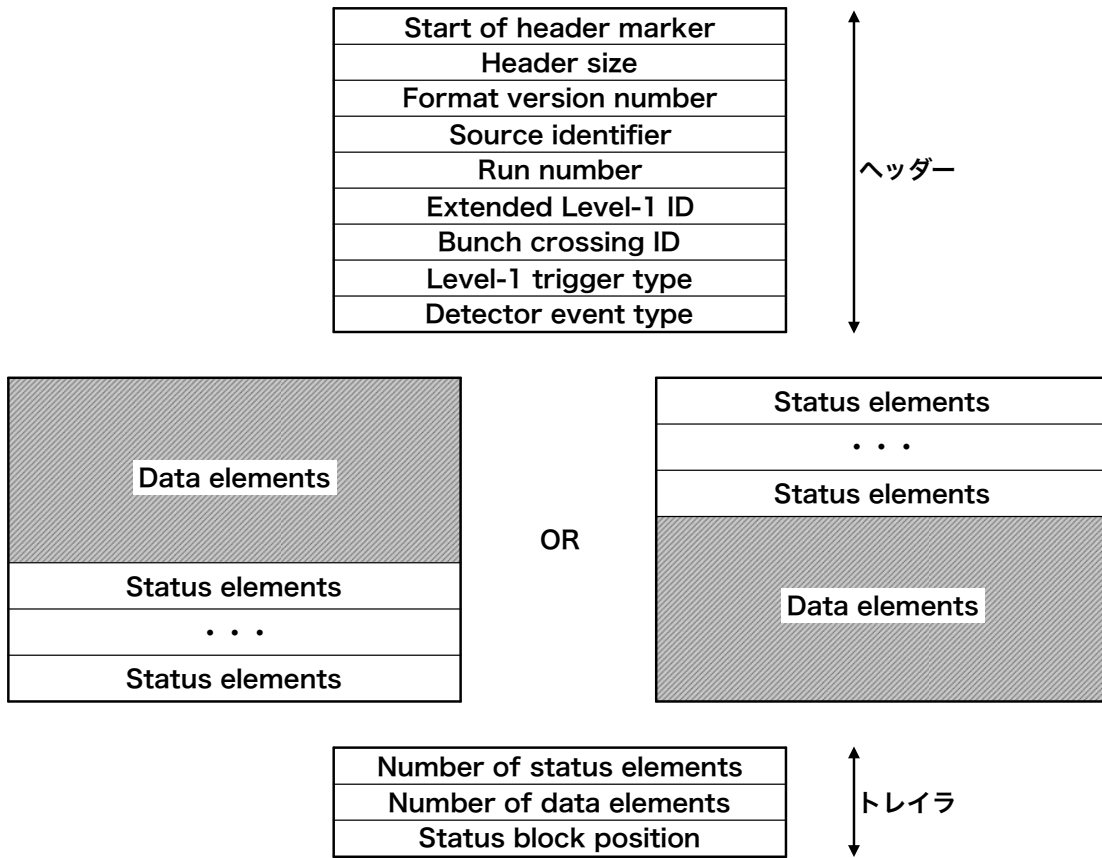


図 5.25 : ATLAS で定められている ROD から ROS ヘデータを送信する時のデータフォーマット [30]。灰色で示されているデータ部は各検出器からのヒット情報が格納され、データ部が先かステータス部が先に来るかは各検出器グループで独自に決めることが出来、順序はトレイラにビットを立てるかどうかで表現する事ができる。

Words (32-bit)	31-24	23-16	15-8	7-0
Header-0	Header (0xee1234ee)			
Header-1	(0x0000)		header size = 9	
Header-2	ATLAS format version = 3.1		TGC format version = 4.0	
Header-3	(0x00)	0x67 or 0x68 (A/C side)	(0x00)	application ID (1-3)
Header-4	Run Type	Run number		
Header-5	Extended Level-1 ID (8-bit ECRID + 24-bit L1ID)			
Header-6	(0x0000)		Bunch Crossing ID	
Header-7	(0x000000)			Trigger Type
Header-8	Detector event Type			
Data	(0x0000)		SLID	
	...			
	...			
Status	first status word : specific/generic			
Status	SL socket disable bits		SL socket timeout or dropped status	
Status	orbit count			
Trail-0	number of status elements = 3			
Trail-1	number of data elements			
Trail-2	status block position = 1			

図 5.26 : SROD が ROS へ送信するデータフォーマット。

Format version number

16-bit ずつ 2 つに分けられ、上位 16-bit が Major version number、下位 16-bit が Minor version number が割り当てられている。ROD フラグメントに対して、メジャー番号は 3.1 が当てられ、マイナー番号は各 sub-detector グループ固有の値となっている。

Source identifier

フラグメントがどの検出器の、どの経路を伝わって送信されてきたかを識別するためのものであり、図 5.27 に示すように、Optional、Sub-Detector ID、Module ID の 3 つのフィールドに分けられる。Sub-Detector ID はどの検出器からの情報であるかを識別するためのものであり、検出器毎に割り当てられている。また、Module ID は ReadOut Link(ROL) の番号であり、どの S-LINK に繋がっているかを識別する事ができる。

Byte	3	2	1	0
	Optional (= 0x0)	Sub-Detector ID	Module ID	

図 5.27 : Source Identifier の詳細 [30]。

Run number

データ取得を開始する際に割り振られる番号であり、Run Number を指定するとどの期間のデータ取得によるものであるかを識別することができる。32-bit で表され、上位 1-bit には必ず 0 を詰め、下位 31-bit を用いる。

Extended Level-1 ID

TTCrx で生成される 24 bit の L1ID と、8 bit の ECRID を合わせた ID 情報。

Bunch Crossing ID

TTCrx から送られてくる 12, bit のバンチ識別用の ID 情報である。

Level-1 Trigger Type

TTC システムによって送信される CTP もしくは LTP 上で生成される 8 bit の ID 情報。

Detector event type

このフィールドを用いることでイベントに対して情報を付け加える事ができる。キャリブレーションの識別を実現させる。

ステータス情報

32-bit 整数である。1 番目のステータスは、16-bit ずつの Specific と Generic と呼ばれる 2 つのフィールドに分けられる。Generic フィールドを使って、全てのフラグメントで同じでありエラー情報を付け加える事ができる。Specific フィールドでは、各フラグメント毎のエラー情報を伝達する事ができる。

フッター

Number of status elements

ステータス情報は各 ROD 独自構成されているものであり、そのフィールドの word 数を表す。

Number of data elements

データ部分の word 数を表す。

Status block position

ステータス部分がデータの後ろか前かを示すためのフィールド。

5.6 SFO が出力するデータフォーマット

ハイレベルトリガーの処理が終わり、最終的に記録すべきデータが ROS から Sub Farm Output (SFO) へと送られる。データを受信した SFO はイベントをバイトストリームの形式である RAW データファイルと呼ばれるフォーマットで保存される。保存されたデータはオフライン物理解析に用いることができる。また、TDAQ アプリケーションが正しく動作しているか、と言ったコミットメントを行うために、ROS が RAW データファイルを作成し出力することも可能である。RAW データは 32-bit 幅を単位としてフォーマットする。

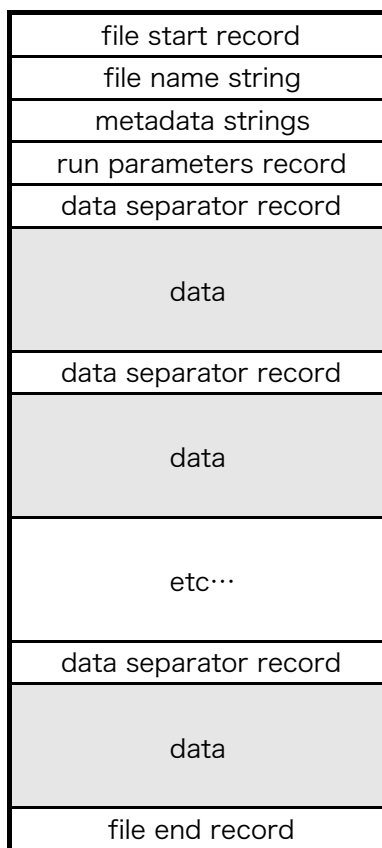


図 5.28 : RAW データファイルのフォーマット。

図 5.28 に実際の RAW データフォーマットを示す。灰色に塗られている部分が検出器からの実際のデータであり、それらを挟むように様々なメタデータを付加させている。メタデータの各部分は、ヘッダマーカと呼ばれる 4 Byte の識別子で始まる決まりになっており、メタデータの詳細を表 5.7 に示す。

メタデータ	ヘッダーマーカー	概要
file start record	0x1234aaaa	RAW データのサイズ、フォーマットのバージョン等の情報を示す。
file name strings	0x1234aabb	RAW データの名前に関する情報が示されている。
metadata strings	0x1234aabc	
run parameters record	0x1234bbbb	ラン番号やトリガータイプ等、データ取得の方法に関する情報が示されている。
data separator record	0x1234cccc	続くデータ部分のサイズに関する情報が示されている。
file end record	0x1234dddd	含まれるイベント数、データ等の情報を示し、最後には end_marker (0x1234eeee) が来る。

表 5.7 : SFO がアウトプットする RAW データフォーマットの概要 [31]。

5.7 統合試験による SROD の性能評価

5.3 節で述べた様なデザインの SROD が、実際に要求されている処理性能を満たし動作することができるかどうかを確認するために、CERN のテストベンチを用いて TTC-Fanout ボード、Sector Logic の実機を用いた試験を行った。さらにテストベンチ上において、ATLAS 実験の実際のデータフローを再現しており SROD が実際の ATLAS 実験の TDAQ システムの枠組みの中で動作できるだけの性能を持っているかどうかを検証する事ができる。検出器からデータを読み出し、また TTC 信号を配分し実際にデータを取得できるかどうかといった基本的な I/O 試験は、2016 年に行ったビームテストにて検証した。このビームテストでは実際に使用されているものと同じ型の TGC を用いてデータの読み出しを行い、Sector Logic、TTC-Fanout ボード、SROD のデザインの方向性の正しさの検証を行った。また、読み出し回路から SROD を介し SFO までの通信試験は CERN のテストベンチを用いて行い、SROD の処理性能の検証を行った。統合試験としての性能評価を行い、その結果を報告する。

5.7.1 ビームテストによる性能評価

2016 年 10 月に CERN の Super Proton Synchrotron (SPS) の H8 ビームラインにおいてミュオンビーム (50~100 Hz) を使用し、また実際にレベル 1 エンドキャップミュオントリガーに使用している TGC を用いて、動作試験を行った。TGC の検出器情報の処理は、ATLAS Phase-2 アップグレード計画を担当しているグループの試作機を用いて読み出した。Phase-1 グループはトリガーシステム、データ読み出しシステムを担当し、データ読み出しを行った。本試験では検出器からの情報を正しく読み出すことができるか、正しくイベントビルディングが行えるかといった、基本的な動作試験に主眼を置いた。という様に、システムの設計・開発が正しく行えているかどうかの確認に主眼を置いた。本ビームテストのセットアップの概要を図 5.29 に、実際の概観を図 5.30 に示す。

実際に使用されている型と同じ TGC を用いておりダブレット構造の TGC を 2 枚用いた試験を行ったため、Sector Logic は 2 台用いた。トリガー発行はビーム下流に設置したプラスチックシンチレータを用いており、実際と同じ TTC システムを用い、TTC-Fanout ボードを介して L1A 信号の分配を行った。本試験では読み出しのファームウェアの設計、SROD のソフトウェアの設計

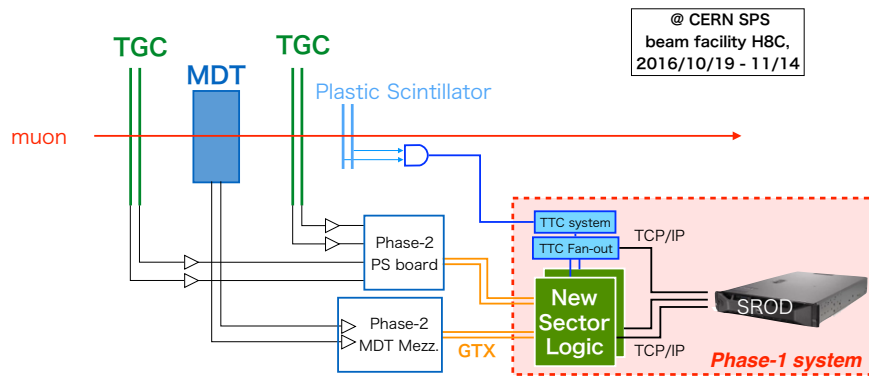


図 5.29 : ビームテストにおける読み出しシステムのセットアップ。赤く四角で囲った部分の構築を担当した [2]。

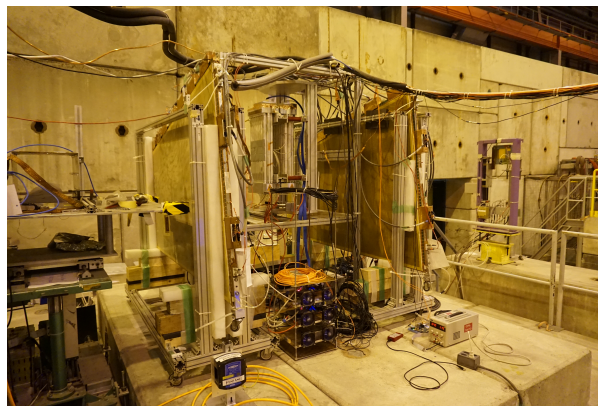


図 5.30 : ビームテストのセットアップの写真

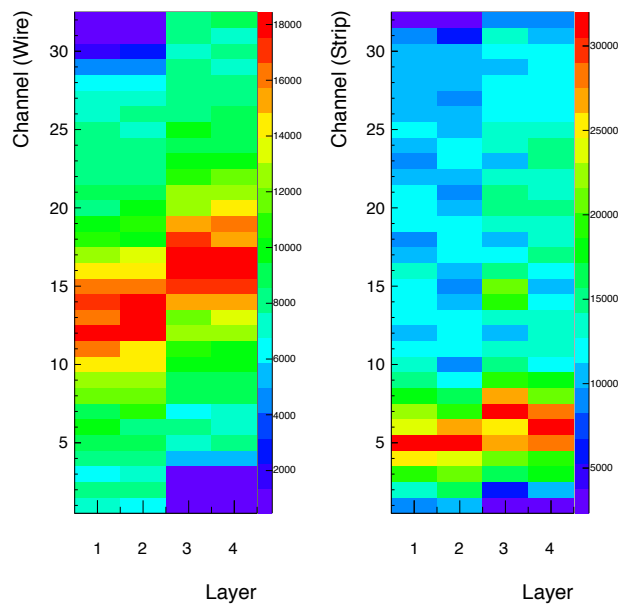


図 5.31 : TGC のヒットマップ図 [2]

が正しく行えているかを検証する事に主眼を置いたため、SROD より後段のシステムは本試験では使用せず、読み出して成型したデータは HDD に出力した。

図 5.31 に取得したデータを用いた解析の結果を示す。読み出しシステム全体が正しくデータを動作し、実際の TGC 検出器を用いたデータ取得が行えた結果、ビームの位置情報を取得する事が出来た事を示している。しかし、本試験の段階ではビームの到来頻度がかなり低かったためデータ読み出しが行えたが、実際に満たすべき性能を本段階では SROD は満たしていなかった。試験終了後、SROD の性能向上、ボトルネック精査のためにテストベンチ上で各種エミュレーターを用いた試験を行い、処理速度が制限されていた原因は各プロセスの持つバッファのサイズに起因する事を突き止めた [4]。本試験により、TTC-Fanout ボード、Sector Logic の読み出しファームウェアが正しく動作し TGC との通信に問題が無かったことを確認し、SROD のソフトウェアも正しく動作出来た事を確認した。

5.7.2 統合試験に用いたテストベンチのセットアップ

SROD の性能評価を行うために構築したテストベンチの写真を図 5.32 に示す。Sector Logic 実機 12 台、TTC-Fanout ボード実機 1 台、SROD 用 PC1 台、ROS 用 PC1 台、SFO 用 PC1 台を用いることで、実際のデータフローと同様の環境を構築した。Sector Logic はテスト用のデータを TTC 信号の受信に同期して作成し SiTCP を用いて SROD へと送信する。また、SROD、ROS、SFO はソフトウェアベースのアプリケーションで構成されるシステムであり、同じ PC 上で動作させる事もできるが、PC リソースの上限によるボトルネックを排除するためにそれぞれのシステムが動作するための PC を用意している。ROS 用の PC には、Run-2 で使われているものと同じ型の RobinNP を実装し実際に SROD から S-LINK 規格を用いてデータを受信する事が可能である。SFO 用の PC には 2 TB のハードディスクを実装しており、Sector Logic が作成し SROD が読み出し ROS から流れてきたデータから実際に RAW データを作成したのち最終的にディスクに保存する。ROS と SFO は CERN のテストベンチのネットワークを介しデータの送信を行う。

各モジュールがどの様に接続されているか図 5.33 に示す。トリガーには、LTP システムの Periodic と呼ばれる周期的にあらかじめ設定しておいたパラメーターに従って L1A 信号を発行するモードを用いている。全ての Sector Logic と TTC-Fanout ボードからのデータを一つに集約するために必要なポート数を持つネットワークスイッチがなかったため、10 GbE に対応しているネットワークスイッチ 1 台、1 GbE に対応しているネットワークスイッチ 1 台の計 2 台を使用し、必要な数のポート数を確保した。2 台のネットワークスイッチのうち 1 台が 1 Gbps にしか対応していない影響をなるべく排除するため、10 GbE ネットワークスイッチに 9 台の Sector Logic と TTC-Fanout ボード、SROD のネットワークカードに繋がる LAN ケーブルを挿し、1 GbE ネットワークスイッチには 3 台のセクターロジックを接続し、ネットワークスイッチ同士を接続した。黒色で示した矢印が、TDAQ システム環境下のステートをコントロールするためのデータのやり取りを表しており、黄色で示した矢印は、TTC システムから擬似的に発行している L1A を配分する様子、赤色で示した矢印は、トリガーデータの流れを表している。テストベンチは大きく分けて TTC システム、トリガー判定モジュールを管理するための VME クレートと SROD、ROS、SFO を管理するラックマウント PC サーバー群の 2 つの要素からなる。

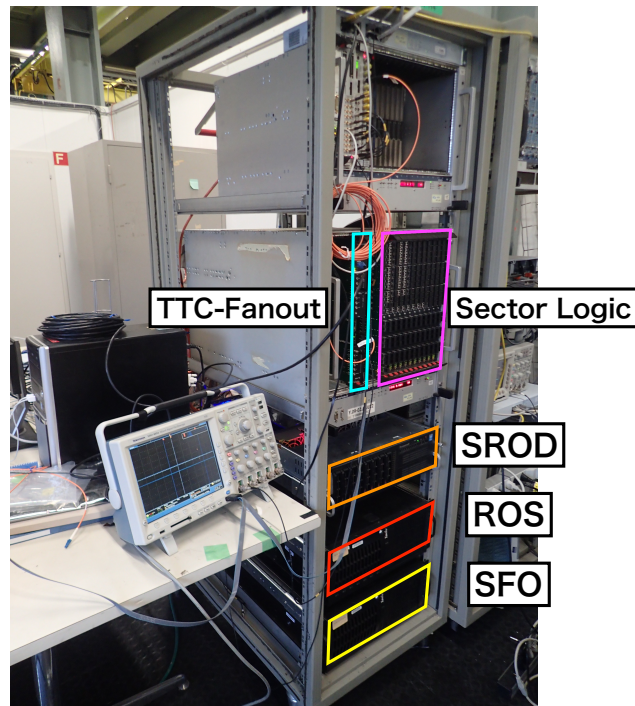


図 5.32 : CERN の実験部屋に構築した読み出しシステムの為のテストベンチ。上段の VME クレートには LTP モジュールが挿さっており、二段目の VME クレートには TTC-Fanout ボードとセクターロジックが挿さっている。ROS 用の PC には実際の RobinNP カードを、SFO 用の PC には 2 TB の HDD を実装している。

5.7.3 VME クレート

テストベンチで使用している VME クレートは 6U と 9U のものがあり、6U クレートには TTC システムのためのモジュールとシングルボードコンピュータ (SBC) を実装している。また 9U クレートには、SBC と 1 台の TTC - Fanout ボードと 12 台のセクターロジックが実装されている。各モジュールはそれぞれの VME クレートに実装されている SBC を通じて管理され、SBC はネットワークを通じて TDAQ 環境の下で管理する事ができる。

5.7.4 ラックマウント PC

合計 3 台のサーバー PC はそれぞれネットワークに接続されており、TDAQ 環境下のコマンドもネットワークを通じて伝達される。また、SROD に実装されている 10 GbE ネットワークカードは TTC-Fanout ボードとセクターロジックのデータが集約される 10 GbE ネットワークスイッチに接続されていて、ローカルなネットワークを形成している。ROS と SFO は CERN のテストベンチ用のネットワーク上で接続されており、1 GbE ケーブルでの通信を行う。

5.7.5 TTC2LAN

LTP は光ケーブルを通じて TTC-Fanout ボードにトリガー情報を送り、フラットケーブルを通じて Sector Logic へ信号が送られ、また該当するデータを SROD が読み出す。後段のソフトウェアベースのシステムである ROS は直接 TTC 信号を光ケーブルで受け取れないため、LTP モジュール

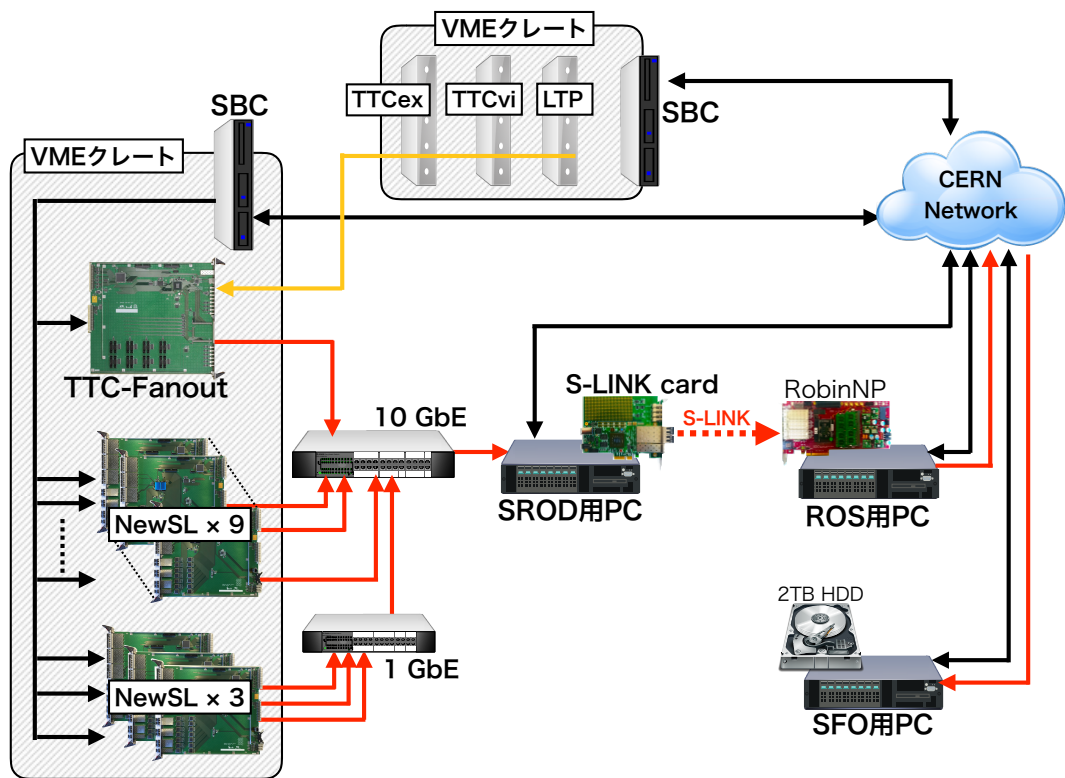


図 5.33 : テストベンチの接続の概要。データフローは赤色の矢印で表しており、特に点線で表現している部分は S-LINK 規格の通信である事を示している。黒の矢印で表している部分は、ステートコントロールを表している。黄色の矢印は TTC 信号の流れを表している。簡潔のため、TTC-Fanout ボードから Sector Logic へのフラットケーブルを用いた分配は省略している。

ルは TTC2LAN と呼ばれる機構を用いて、TTC 信号を LAN を用いて ROS 用の PC や後段のシステムへと分配している。これにより、レベル1トリガーの判定結果を ROS が受け取る事が可能になり、ハイレベルトリガーの処理に使用する事ができる。

5.7.6 新たに生産された Sector Logic 実機 12 台を用いた性能評価

ビーム試験時に使用した Sector Logic 2 台に加え、新たに 10 台の追加生産を行い合計 12 台の Sector Logic をテストベンチに導入した。新たに生産した Sector Logic の I/O 試験は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行い、全てのボードが正しく動作できる事を確認した後、CERN へと輸送した。これにより、実際のデータ取得と同じ台数の Sector Logic を用いた通信試験を行う事ができる様になった。

まず、実機を用いた性能評価を行うために、SROD が 12 台の Sector Logic と 1 台の TTC-Fanout ボードからデータを読み出し 1 イベントを ROD フォーマットに成形するまでの処理速度を測定した。Sector Logic はデータをボード内でエミュレートして擬似的なデータを生成し SROD へと送信する。ここでは、平均的なデータサイズとして見積もられているデータ数に固定して評価を行った。SROD は各ボードからデータを受信し定められたイベントフォーマットでイベントビルディングを行い、また新しいデータを読み出してそのイベントで上書きするという事を繰り返し、12 台のセクターロジックと通信を行いながら SROD がどれだけの速度でイベントビルディングを行う性能があるかを評価した。

まず、各セクターロジックが送信するデータサイズを同じ大きさに揃え、通信試験を行った結果を図 5.34 に示す。TTC システムの Periodic モードを使用しており、予め指定しておいた発行レートで L1A 信号を発行する事が可能であり、L1A 発行頻度を上げていった時に SROD の処理速度がどうなるかを示している。

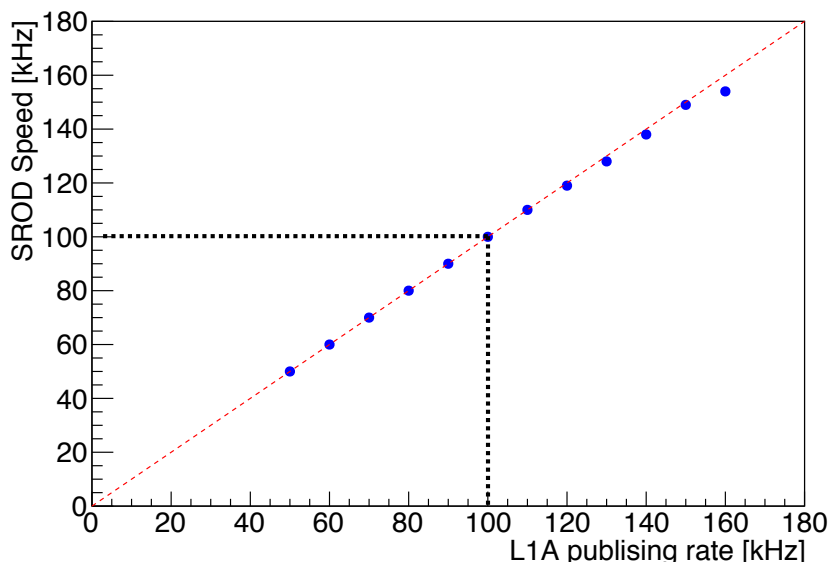


図 5.34 : 横軸は TTC システムからの L1A 発行レート、縦軸は実際に SROD がどれだけの処理速度が出たかを示している。

図 5.35 において、SROD に送信するデータ量を増加させた時の処理性能を示す。L1A は 100 kHz で固定である。以上の結果から平均的なデータサイズで通信を行う場合、SROD のイベントビルディング性能には問題が無く実機との通信試験は成功している。イベントビルディングに関する

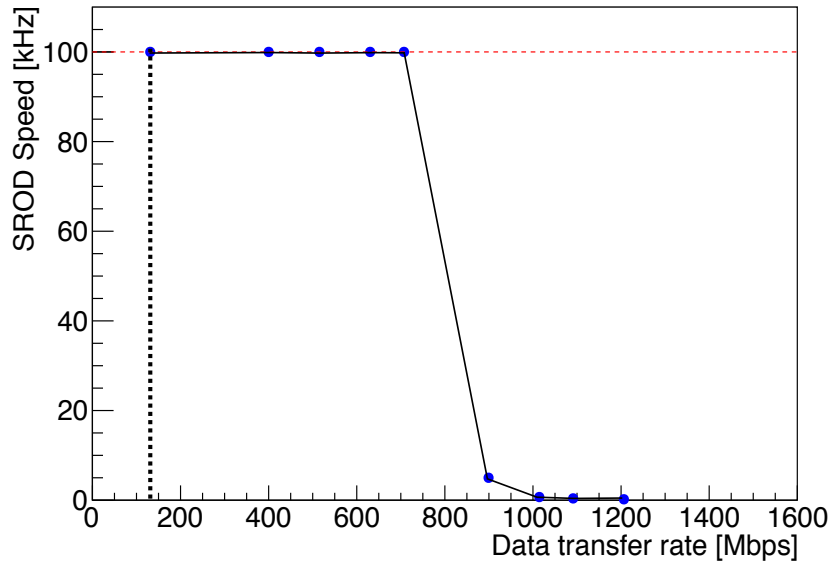


図 5.35 : 横軸は SROD に送信されてくるデータ転送速度、縦軸は実際に SROD がどれだけの処理速度が出たかを示している。

処理能力は、通常のデータ読み出しでは余裕があると考えられるが、今後さらに機能を追加して安定的なデータ読み出しを行えるシステムにしなければならないことや、2つに分けていたネットワークスイッチを、10 GbE スイッチ 1つに集約した時にでも同様のパフォーマンスを出すことができるかどうかには注意しながら開発を行う必要がある。

5.8 DAQ システムの性能評価と課題

5.8.1 FILAR カードを用いた S-LINK カードの性能評価

まず、開発した PCI-Express 規格に対応した S-LINK カードが、実際にどのような通信性能を持っているかを検証した。その際に現在 Run-2 で用いられている RobinNP カードではなく、図 5.36 に示すような初期の ROS に実装されていた PCI 規格の FILAR カードを用いた。FILAR カード

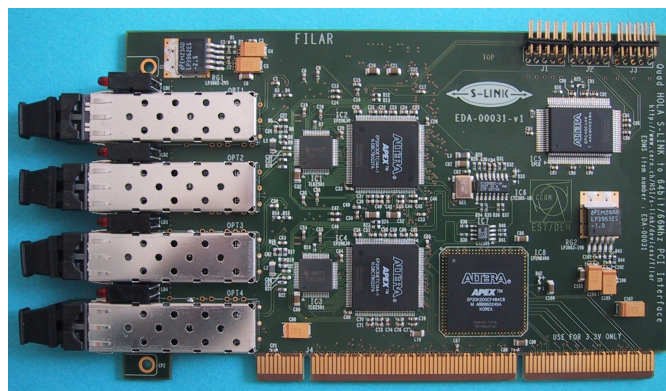


図 5.36 : 初期の ROS に実装されていた、S-LINK 規格でデータを受信するための PCI カード。

は、受信したデータをコマンドラインからの操作だけで容易にデバッグするためのツールが用意されており、S-LINK カードの開発に非常に有用であった。反面 PCI 規格のカードであるためそれ

による通信性能の制限は存在するが、S-LINK カードが正しくデータを送信できているかといった簡単な I/O 試験に用いることはできる。現在 ROS に用いられている RobinNP では FILAR カードに比べ非常に高性能であり様々な機能が備わっているが、ROS システムを組み TDAQ システムの環境下で動作させなければ正しく動作することができず、デバッグには不向きである。Linux を搭載したデスクトップ PC を 2 台用意し、S-LINK カードと FILAR カードを実装し、S-LINK カードから擬似的なデータを繰り返し送信するテスト用プログラムを起動させ、FILAR 側の PC で、用意されているコマンドを使用してどれだけの転送速度でデータを受信できているかを検証した。1 イベント 300 Byte のデータを転送したところ、約 120 kHz での転送を行うことが出来た。SROD は ROS に対して L1A 信号の発行頻度である 100 kHz で平均 108 Byte 程の転送を行うので、S-LINK カードは SROD に実装できうるのに十分な性能を備えていると考えることができる。

5.8.2 テストベンチを用いた性能評価

実際に Run-3 において ROS に実装される RobinNP に対して、SROD が S-LINK カードを用いて要求を満たした通信を行えるかどうかを検証するために、テストベンチを用いて Sector Logic からのデータ読み出し、イベントビルディング、ROS への転送、ROS から SFO へのデータ転送、SFO から HDD へのデータ保存までを行った。指定している L1A 発行レートが 100 kHz である事に反し、実際の L1A 発行レートが約 40 kHz 前後になった。これはとあるシステムが BUSY 信号を出力し、L1A 信号発行を瞬間的に停止させている時に起きる現象であるが、TTC-Fanout ボードに実装されている、各ボードが出力している BUSY 信号をカウントアップする機能を確認した所、TTC-Fanout ボード、Sector Logic、SROD からの BUSY 信号は確認することは出来なかった。Data Collector Manager (DCM) が TTC2LAN システムに対して BUSY 信号 (XOFF 信号) を送っている事に由来していると考えられる。ROS と SFO は、実際の ATLAS 実験では専用のネットワークを形成しており、高速に通信する事ができるが、テストベンチで上では他の検出器グループと共同で使用しているネットワークを介して通信を行っているため、ROS と SFO 間の通信に制限が掛かっているためと考えられる。

しかし、平均 40 kHz ながら SFO システムから HDD へ、ATLAS 実験の RAW データフォーマットに従って出力する事を確認し、処理速度が 100 kHz に達していない事はテストベンチに固有の問題であると考えられ、Sector Logic、TTC-Fanout ボード、SROD を含めた読み出しシステムに関する問題は見受けられなかったと考えられる。

第6章 結論

欧州原子核研究機構 CERN の LHC では、現在 Run-2 として重心系エネルギー 13 TeV、瞬間最大ルミノシティ $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で稼働しており、2019 年まで稼働する。その後、加速機能性能を向上させ 2021 年から Run-3 として重心系 14 TeV、瞬間最大ルミノシティ $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で運転を再開させる。LHC に設けられた衝突点の一つに設置されている ATLAS 実験では順調に衝突事象を観測しており、また Run-3 における高レート環境に対応するためのアップグレード計画も順調に進んでいる。Run-3 では新しいミュオン検出器である New Small Wheel (NSW) を導入するため、それに伴いトリガー判定用モジュールである Sector Logic のハードウェア開発を行い、またデータ読み出しシステムの SROD の開発、TTC 信号を分配するための TTC-Fanout ボードを開発した。

本研究ではレベル 1 エンドキャップトリガー用検出器である Thin Gap Chamber (TGC) に存在するトリガーに対する不感領域の削減を試みるために、NSW を補完的に用いる新しいトリガーロジックを開発した。TGC には、精密測定用検出器である Monitored Drift Tube (MDT) の位置を補正するためのレーザーアライメント用の穴が空いており、アライメントホールを通過したミュオンに対してトリガーを発行する事が出来なかった。Run-2 までは、TGC の不感領域をトリガー用検出器が覆っていなかったため、トリガーを発行することが出来なかったが、Run-3 では NSW が導入され、TGC の不感領域に該当する領域をミュオントリガー用検出器が覆うことになり、トロイド磁場の内外でコインシデンスを行う事が可能となる。そこで TGC のアライメントホールを通過した事象に対して NSW 上にヒットを残している事を要求することで、TGC の不感領域を削減出来る事が分かった。また、Run-2 におけるミュオントリガーの発行レートに対し、本研究で開発したロジックを導入した場合どの程度トリガーレートが上昇するかを見積もった結果、1.36% 上昇することが分かった。

さらに、レベル 1 エンドキャップミュオントリガー用のデータ読み出しシステムである SROD の開発も行った。実際の ATLAS 実験のデータフローを CERN のテストベンチ上で再現した事で、テストベンチを用いて SROD と後段のシステムまで含めた環境での統合試験を行い、処理性能の評価を行った。SROD と通信する Sector Logic は実際の台数と同じだけの実機を統合試験用に生産し、それらをテストベンチ上に組み込むことでより本番に近い環境下での性能評価を行った。また SROD と後段のシステムとの通信用に PCI-Express カードの生産も行い、それらを用いた性能評価も行った。CERN のテストベンチを使用している事による処理性能の制限と考えられる結果を得たが、SROD の基本的な設計の正しさ、後段のシステムとの通信を行えたことを確認し、今後の Run-3 に向けた開発の大きな成果となった。

今後は Sector Logic の量産体制に入り、Run-3 に向けての本格的な準備が始まり、また SROD を動作させる PC、データ読み出しに使用するネットワークスイッチの性能を決定を行う。SROD が読み出すデータ量は、Run-3 の高レート環境において飛躍的に増加するが、取得したデータを確実に記録するために必要な処理能力は備わっていると考えることが出来、今後はデータロスの可能性を最大限排除できるシステムとなるよう安定的に動作するシステムとするため、また、汎用性の高いソフトウェアベースである利点を活かしたシステムの運用を実現できるように、さら

に開発を進めていく。

謝辞

本研究を進めるにあたり様々な方にお世話になりました。まず、指導教員である藏重久弥教授に感謝いたします。修士課程進学後に本格的なソフトウェア開発をはじめるとともに、必要な数々の知識や考え方をご教授頂きました。学会や各ミーティングにおける発表資料を準備する際には何度も添削をして頂き、そこから様々な事柄を学ばせて頂きました。CERN への初めての海外出張の際には必要な手続きなどを丁寧に教えて頂き、自らの研究に集中できる環境を与えてくださったことに感謝申し上げます。

前田順平氏にも大変お世話になりました。何度も居室を尋ね、その度に僕の質問に丁寧に答えて頂きました。そのおかげで理解が深まり、さらに研究を前へ進めることができたと思います。また、ご結婚心よりご祝福申し上げます。笑顔の溢れる温かいご家庭をお築きになられますようお祈りいたします。

Phase-1 アップグレードチームの皆様にもお世話になりました。特に、佐々木修氏、岸本巴氏にはミーティング時に僕の拙い発表に対しても丁寧なコメントを頂いたこと大変うれしく思います。また、石野雅也氏、青木雅人氏、堀井泰之氏、奥村恭幸氏、隅田土詞氏には様々な場面でご指導頂きました。さらに同じチームに参加している赤塚さん、水上さんには大変お世話になりました。仕事を親身に教えて頂いたり、日々車で送迎して頂いたりと親身に接して頂いたおかげで、CERN 滞在も楽しく過ごせています。また、同期の岡崎くんには色々とお助けを頂きました。時には初歩的な質問に答えてくれたり、岡崎くんのふところの深さにかまけて色々とお迷惑をかけてしまっていると思いますが、かなり助けられています。これからまだ Phase-1 アップグレードに関する作業は続き、皆様の助けを借りることになると思いますが、成功できるように精一杯頑張りたいと思います。今後ともよろしく申し上げます。

神戸大学における毎週の ATLAS ミーティングで、僕の報告に対して様々な角度から助言をして頂いた山崎祐司氏、越智敦彦氏、清水志真氏、川出健太郎氏にも感謝申し上げます。ミーティングだけでなく、日々のコーヒブレイクの時にも様々な相談に乗って頂いたこと大変ありがたいと思います。また先輩である陳さん、木戸さんには親切に接して頂きました。特に木戸さんには同じ TGC グループという事もあり、CERN 滞在時の食事の際の車による送迎であったり生活面で大変お世話になりました。

また、今は就職されていらっしゃる谷岡さんとは僕が修士一回生の頃の1年間だけでしたが、ソフトウェアを共同で開発する機会を持ちました。些細なことでも相談にのって頂き、同じ目線で親切に接して頂いた谷岡さんには感謝してもしきれません。ご指導の元、ポケモン GO でバリエーションを捕獲できました。人見知りな僕ですが、また最後にはピザの食べ放題を二人で行ける仲間になったことは僕の思い出です。本当にお世話になりました。僕は元気でやっていますので、またどこかで飲みましょう！機会があれば是非よろしく申し上げます。

また、同期として共に ATLAS 実験で2年間頑張った若宮くん（研究室ではピカタロウと呼ばれていましたね、僕も呼んでいました）には感謝してもしきれないです。同じ実験グループに所属し同じ大学の同じ学年という事もあり、ピカタロウ（修士二年の秋頃からミツウロコ）からは色々とお世話というものは何かについて教えて頂きました。僕とミツウロコ（たまにカピ様）とは

学部の時にはお互い面識がなく全く喋らなかつたのですが、振り返ってみると同じ実験に所属して唯一無二の友人になれたことは何かの運命な様な気がします。CERN 滞在中にはホステルのキッチンに集まり 500 mL のビール 6 本、ワインフルボトル 2 本を開け、人生について語り合いましたね。あと、修士論文の締切が近づくと僕がおかしくなつて、カビ様（締切間近ではチンタロウ師匠、今もたまにチンタロウ師匠）に変なニックネームをいろいろつけてしまったこと、大変良い思い出です。この紙面には載せれないような名前を肴にして、また飲みましょう。師匠がいたからこそ、苦しい時でも挫けず楽しみながらこの 2 年間の研究生生活を全うできたのだと思います。就職してしまうのは寂しいですが、また会おう！良いワイン買って来るよ、折半ね。

また、研究室全体に向けての僕の経過発表や論文講究では、竹内康雄氏、身内賢太郎氏、鈴木州氏、矢野孝臣氏から様々なご指摘を頂けたこと、大変ありがたく思っております。時には優しく、時には厳しく指導して頂き、物理学に対する考え方をご教授頂きました。今後も、ご指導のほどよろしくお願ひします。秘書の横山さん、吉田さんには CERN への出張手続きや、事務手続きで支えて頂きました。ありがとうございます。横山さんが CERN へ来ていただいた際に、差し入れとして下さったマカロンは非常に美味しかったです。多分人生で初めての高級マカロンでした。ありがとうございます。

そして、神戸大の同期の皆にもたくさん助けて貰いました。まず、学部一回生の頃から互いに訳の分からない事を言い合つて楽しんでた小川くん（学部 1 回の頃は圭将と呼ばれていましたね、僕も呼んでいました）は、僕の大学生活における語りきれない思い出を作ってくれました。圭将（あるカラオケをきっかけにオガワインティライミ）とは、学部生の頃には名古屋旅行にも行きました。同期の家でティッシュと空き箱を使って延々と野球をしたこと、ラーメン替え玉無料キャンペーンに参加してお腹を壊したこと等など、たくさんの思い出があります。特に修士一年の秋頃の宮城県への出張中に、「おれ、財布無くした、、、一緒に探して」と言つて、一緒に出張していた僕と若宮くんを 2 時間も仙台市国分町を連れ回り、交番にも遺失届を提出したあげく、結局カバンの中から財布が出てきたこと、僕は一生忘れません。また、学生生活が最後に近づくとつれてオガワインティライミのニックネームが増えていきましたね。最終的にはオガワンバンバンビガロに落ち着きました、これについては賛否両論ありますが。

研究室に入ってから仲が良くなった、又吉くん（いつからかマタキチと呼ばれてましたね、僕も呼んでました）には様々に楽しませてもらってました。マタキチ（最終的にはマタチチ）のそのクールな振る舞いから発せられる琉球の言動には、ずいぶん憧れを抱きました。沖縄に行くことがあれば挨拶に行きます。そして中澤さん（ミキティと呼ばれてましたね、僕は直接呼んだことない気がする）の不思議な言動には常に驚かされてました。修論締切間近に 1 週間泊まり込みで追い込んでいた時、お互いに言葉を交わさなかつたですが無言のうちの絆が生まれていったのを感じました。最後には何でか個人的に LINE のメッセージをやり取りしました、スタンプも来ました。時間の流れが人をここまで変えるのか、と感じました。最後に阿部さん（阿部ちゃん）。修士一回の頃はあまり喋らなかつたのですが、修士二回の頃もあまり喋らなかつたのですが、追いコンでは喋れているのでしょうか。

気づけば僕の同期は訳のわからない人間しかいなかった様に思います。だからこそ、僕は自分らしくのびのびと学生生活を、個性豊かなこれらのデコボコフレンズと共に楽しめたのだと思いました。今まで本当にありがとう。

そして最後に、僕に教育を受ける機会を与えてくれた家族に感謝します。家族の理解と協力が無ければ、僕は本当に自分のやりたいことを突き詰める自分の人生を選択出来なかつたと思います。まだ少し迷惑をかけるかもしれないけれど、よろしくお願ひします。

参考文献

- [1] ATLAS Collaboration, Measurements of Higgs boson production and couplings in diboson final states with the ATLAS detector at the LHC, Phys. Lett. **B726** (2013) 88.
- [2] 赤塚駿一, LHC-ATLAS 実験 Run-3 に向けたミュオントリガーの改良, 京都大学 修士論文, 2017.
- [3] 浦野祐作, LHC-ATLAS 実験レベル 1 ミュオントリガーのためのデータ収集システムのアップグレード, 東京大学 修士論文, 2015.
- [4] 谷岡凌, LHC-ATLAS 実験 Run-3 におけるレベル 1 ミュオントリガーのためのデータ収集システムの開発, 神戸大学 修士論文, 2017.
- [5] ATLAS Collaboration, LHC Design Report Volume I : The LHC Main Ring, CERN-2004-003, 2004.
- [6] ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, JINST **3** S08003, 2008.
- [7] ATLAS Collaboration, The upgraded Pixel detector and the commissioning of the Inner Detector tracking of the ATLAS experiment for Run-2 at the Large Hadron Collider, PoS(EPS-HEP2015) 261, 2016.
- [8] ATLAS Collaboration, Search for new high-mass phenomena in the dilepton final state using 36 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ with the ATLAS detector, JHEP **10** (2017) 182.
- [9] ATLAS Collaboration, ATLAS Muon Spectrometer Technical Design Report, CERN-LHCC-97-22, 1997.
- [10] 田代拓也, ATLAS 実験における新しいミュオントリガー回路の開発と実装, 京都大学 修士論文, 2013.
- [11] 木戸将吾, ATLAS 実験 Run2 におけるレベル 1 ミュオントリガーの性能評価及び最適化の研究, 神戸大学 修士論文, 2016.
- [12] ATLAS Collaboration, New Small Wheel Technical Design Report. Technical Report CERN-LHCC-2013-006, CERN, 2013.
- [13] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the Phase-I Upgrade of the ATLAS TDAQ System. Technical Report CERN-LHCC-2013-018, 2013.

- [14] Junpei Maeda, Interface definition from Tile Module Digitizer Board (TMDB) to the Phase-1 Endcap muon Sector logic, 6 Feb 2018.
- [15] Fabien Jeanneau (ATLAS Collaboration), Design and Construction of Large Size Micromegas Chambers for the ATLAS Upgrade of the Muon Spectrometer, ATL-MUON-PROC-2016-004, 2016.
- [16] ATLAS Collaboration, Letter Of Interests for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Experiment, CERN-LHCC-2012-022, 2012.
- [17] Stefan Haas *et al.*, Final Design Review of the MUCTPI, CERN, Jan 2018.
- [18] XILINX Co., 7 Series FPGAs GTX/GTH Transceivers User Guide, 2014.
- [19] <http://hsi.web.cern.ch/HSI/s-link/devices/g-link/>
- [20] <https://japan.xilinx.com/japan/fpga-koza/chapter01.html#history>
- [21] ATLAS Collaboration, Trigger Menu in 2016, 5 November 2017.
- [22] ATLAS Collaboration, The S-LINK 64 bit extension specification: S-LINK64, 4 August 2003.
- [23] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for High Level Trigger, Data Acquisition and Controls, CERN-LHCC-2003-022, Jul 2003.
- [24] ATLAS Collaboration, The ATLAS Data Acquisition System in LHC Run 2, ATLAS-DAQ-PROC-2017-007, 02 May 2017.
- [25] ATLAS Collaboration, Controller Requirements, ATL-DQ-ES-0054, 06, October, 2004.
- [26] Igor Soloviev, User's Guide Tools Manual Reference Manual, 5 December, 2002.
- [27] 徳永孝之, LHC-ATLAS 実験 RUN3 に向けた新しいミュオントリガー装置の FPGA 読み出し開発とその性能評価, 東京大学 修士論文, 2015.
- [28] Per Gallno, ATLAS LOCAL TRIGGER PROCESSOR - LTP Technical description and users manual, IEEE Trans. Nucl. Sci. 52 (2005) 1202-1206.
- [29] 水上淳, LHC-ATLAS 実験 Run-3 に向けた TTC FAN-OUT BOARD の開発とその性能評価及び TTC readout module の開発, 総合研究大学院大学 修士論文, 2016.
- [30] ATLAS Collaboration, The raw event format in the ATLAS Trigger & DAQ, ATL-D-ES-0019, 2008.
- [31] ATLAS Collaboration, Format of the data files written by EventStorage library of ATLAS TDAQ, ATL-DAQ-CONF-2008-003, 01 April 2011.