

修 士 学 位 論 文

高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた
重複候補除去による
初段エンドキャップミュオントリガーの高精度化

令和 8 年 2 月 6 日

専 攻 名 物理学専攻

学籍番号 249S112S

氏 名 田中 亮祐

神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程

概要

LHC-ATLAS 実験は、欧州原子核研究機構（CERN）において実施されている素粒子物理の国際共同実験であり、高エネルギーの陽子衝突を通じて素粒子標準模型の精密検証や新物理の探索を目的としている。現在、LHC は 2030 年以降の高輝度化に向けたアップグレードの準備が進められており、1 回あたりに衝突する陽子数が増加することで、生成される事象も大幅に増大する。これにより背景事象も大幅に増加することが見込まれるため、限られたデータ取得帯域の中で物理的に重要な事象を選別するトリガーシステムの役割がより重要となる。

ATLAS 実験のトリガーシステムは、初段および後段の二段階で構成されており、本研究が対象とする初段トリガーでは、マイクロ秒スケールでの高速なデータ処理が必要とされる。このため、初段トリガーは、FPGA 上で動作するハードウェアロジックとして実装される。本研究では特に、初段エンドキャップミュオントリガーに着目し、その高精度化を目的とした開発を行った。初段ミュオントリガーに用いられるガス検出器は、不感領域を避けるために一部が重なるように配置されている。その結果、単一のミュオンが複数の検出器チェンバーで独立に再構成され、ミュオン候補が重複して複数生成されてしまう。重複して生成されるミュオン候補は、複数のトリガー判定を引き起こし、トリガーレートの増加やデータ取得帯域の非効率な消費の要因となる。

そこで本研究では、重複したミュオン候補をトリガー段階で高速に判定し、除去するロジックの開発および実装を行った。本ロジックでは、同一ミュオンに由来すると判定された複数のミュオン候補のうち、1 つを残して他を除去する。まず、シミュレーションサンプルを用いた解析により、重複したミュオン候補は位置情報および運動量閾値が互いに近接している特徴を確認した。これらの特徴に基づき、ミュオン候補間の位置および運動量閾値の情報を用いて重複を判定するアルゴリズムを設計した。

開発したアルゴリズムは FPGA 上に実装し、初段トリガーに要求される固定レイテンシおよび限られた回路資源の制約を満たすよう設計を行った。その結果、トリガーロジックとして問題なく動作可能であることを確認した。

さらに、実装したロジックについて、シミュレーションサンプルおよび実データを用いた性能評価を行った。その結果、高輝度環境下においても重複したミュオン候補を有効に除去でき、実データにおいてはトリガーレートを約 23 % 削減可能であることを示した。また、近接して飛来するミュオンを含む物理事象を用いた評価から、物理的に独立なミュオンの誤除去は小さく、物理事象の損失が抑制されていることを確認した。

これらの成果から、本研究で開発した重複したミュオン候補を除去するロジックは、高輝度 LHC-ATLAS 実験における初段エンドキャップミュオントリガーの高精度化に寄与することを示した。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	素粒子標準模型	1
1.2	LHC-ATLAS 実験の目的	1
1.3	本研究の目的	8
第 2 章	高輝度 LHC-ATLAS 実験	10
2.1	LHC	10
2.2	ATLAS 検出器	10
2.3	高輝度 LHC-ATLAS 実験におけるトリガーシステム	21
第 3 章	初段エンドキャップミュオントリガーにおけるトリガーロジック	28
3.1	エンドキャップセクターロジックの役割と構成	28
3.2	トリガーロジックの流れ	29
3.3	トリガーロジックの抱える課題と本研究の目的	37
第 4 章	重複したミュオン候補除去アルゴリズムの開発	39
4.1	重複したミュオン候補の除去アルゴリズムに課される制約と設計方針	39
4.2	重複したミュオン候補の判定基準	40
第 5 章	FPGA 実装と検証	48
5.1	FPGA 実装概観	48
5.2	テストベンチによる設計確認	56
第 6 章	初段エンドキャップミュオントリガーにおける Overlap Removal ロジックの性能評価	60
6.1	本章の目的と評価方針	60
6.2	シングルミュオンサンプルを用いた検証	60
6.3	マルチミュオン事象への影響	62
6.4	実データを用いた性能評価	75
6.5	性能評価のまとめと今後の改善点	77
第 7 章	結論と展望	79
付録 A	重複したミュオン候補の傾向	81
付録 B	TGC BW の幾何構造	82
付録 C	シングルミュオントリガーのトリガー効率	85
	謝辞	86
	参考文献	88

第 1 章

序論

1.1 素粒子標準模型

物質を構成する最小単位を素粒子と呼ぶ。素粒子標準模型は、素粒子およびそれらの相互作用を記述する理論体系であり、これまでに行われた加速器実験や精密測定の結果と高い精度で一致している。標準模型によって記述される粒子を図 1.1 に示す。素粒子は、物質を構成するフェルミオンと、相互作用を媒介するボソンに大別される。フェルミオンは、粒子と反粒子を区別しない場合、6 種類のクォークと 6 種類のレプトンからなる計 12 種類が存在し、同じ量子数を持つ 3 世代に分類される。クォークはグルーオンと結合し強い相互作用をするが、レプトンはグルーオンとは結合しない。ボソンについては、自然界には 4 つの基本相互作用が存在することが知られているが、重力相互作用を除く 3 つの相互作用である、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用を媒介する粒子が存在する。また、電弱対称性の自発的破れに関与するヒッグス粒子が存在する。以上、標準模型には計 17 種類の素粒子が含まれる。

しかしながら、標準模型では説明できない事象も数多く存在する。例えば、電弱スケールが重力相互作用に特徴的なプランクスケールと大きく異なることを説明できないという階層性問題や、宇宙の約 3 割を占めると言われている暗黒物質が未発見であることが挙げられる。

これらの問題を背景として、標準模型を拡張する新たな理論体系、すなわち標準模型を超える物理 (Beyond the Standard Model: BSM) が広く研究されている。例えば、標準模型の粒子とスピンの $1/2$ だけ異なるパートナーを対応づける対称性として、超対称性が提案されている。超対称性粒子にも様々な種類が存在するが、ここでは最小超対称標準模型 (Minimal Supersymmetric Standard Model: MSSM) で考えられる粒子を図 1.2 に示す。超対称性粒子は、標準模型のフェルミオンに対応する粒子はボソン、標準模型のボソンに対応する粒子はフェルミオンとなる。

現在までに、標準模型を超える物理の決定的な証拠は得られていない。これらの新物理探索を目的として、より高いエネルギー領域および高精度な測定を可能とする実験が求められており、その代表例が LHC における ATLAS 実験である。

1.2 LHC-ATLAS 実験の目的

LHC-ATLAS 実験の目的は、陽子衝突によって生成される高エネルギー事象を精密に測定することにより、標準模型の精密測定および新物理の探索を行うことである。

LHC (Large Hadron Collider) は、スイスとフランスにまたがって建設された周長 27 km の円形加速器であり、陽子を TeV スケールの世界最高エネルギーまで加速し、加速させた陽子同士を衝突させる。この高エネルギー衝突事象を観測するために設置されているのが ATLAS 検出器である。ATLAS 検出器は複数のサブ検出器システムから構成される汎用検出器であり、衝突事象から生成される粒子

1.2. LHC-ATLAS 実験の目的

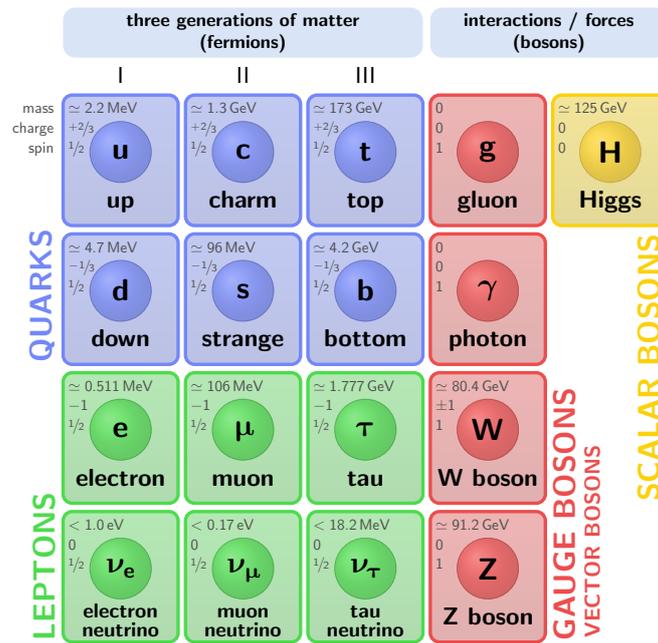


図 1.1: 素粒子標準模型において記述される素粒子の一覧 [1]。粒子と反粒子を区別しない場合、物質を構成するフェルミオンは 6 種類のクォークと 6 種類のレプトンからなる計 12 種類が存在し、相互作用を媒介するボソンはゲージボソン 4 種類とヒッグス粒子を含む計 5 種類が存在する。以上を合わせ、標準模型には計 17 種類の素粒子が含まれる。

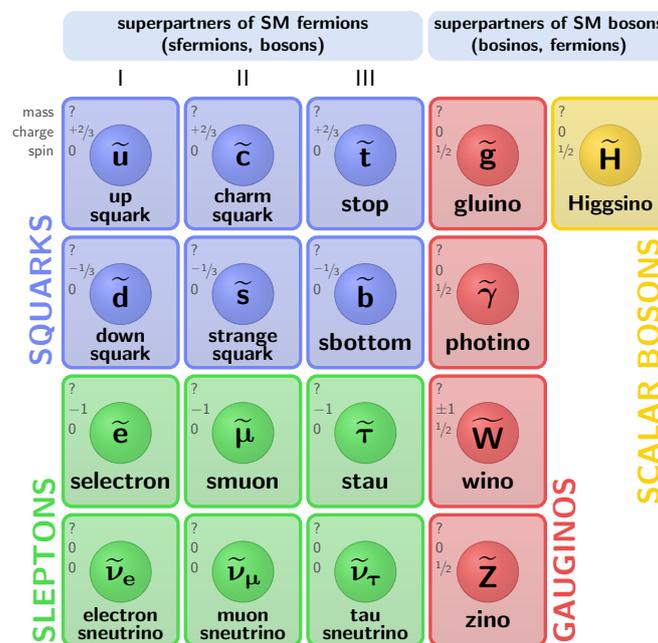


図 1.2: 最小超対称標準模型 (MSSM) において導入される超対称性粒子の一覧 [1]。超対称性は、標準模型の粒子とスピンの異なる超対称パートナーを対応づける対称性であり、標準模型のフェルミオンに対応する粒子はボソン、標準模型のボソンに対応する粒子はフェルミオンとなる。

1.2. LHC-ATLAS 実験の目的

の運動量やエネルギーを詳細に測定することが可能である。ATLAS 検出器の構成および各サブ検出器の役割については、第 2 章で説明する。

1.2.1 LHC-ATLAS 実験で目指す物理

LHC-ATLAS 実験では多岐にわたる物理事象を測定しているが、本小節では本研究と密接に関係するミューオンを含む事象に着目する。具体例として、ヒッグス粒子のミューオンへの崩壊、 B 中間子および τ レプトンのミューオンへの崩壊過程を取り上げる。

$H \rightarrow \mu\mu$ の測定

ヒッグス機構により、フェルミオンおよび W/Z ボソンは質量を獲得すると考えられている。ヒッグス粒子はこの質量生成機構に関与する粒子として位置づけられており、標準模型の枠組みでは、ヒッグス粒子と各フェルミオンとの結合の強さはフェルミオンの質量に比例する構造を持つ [2]。

LHC はヒッグス粒子を高統計で生成できる唯一の加速器であり、ATLAS 実験ではヒッグス粒子の生成および崩壊過程に関する精密測定が進められている。現在までに、第 3 世代フェルミオンとの結合については観測されている一方で、第 2 世代フェルミオンとの結合については、兆候は報告されているものの確立した観測には至っていない。

第 2 世代フェルミオンであるミューオンとの結合である $H \rightarrow \mu\mu$ の崩壊過程は、ヒッグス粒子とフェルミオンの結合が比例するとする標準模型の予言を検証可能な重要なチャンネルである。一方で、フェルミオンの質量が小さいほどヒッグス粒子との結合は弱くなるため、ミューオンのような軽いフェルミオンとの結合は特に測定が困難となる。この関係を示したものが図 1.3 である。

2025 年には、ATLAS 実験において $H \rightarrow \mu\mu$ 崩壊過程に対して 3.4σ の統計的有意性が報告された [3]。その不変質量分布を図 1.4 に示す。この結果は、 $H \rightarrow \mu\mu$ 過程の存在を示唆する有意な証拠 (evidence) であり、ヒッグス粒子と第 2 世代フェルミオンとの結合を直接検証した重要な成果である。一方で、統計的有意性は発見基準 (discovery) には達しておらず、本過程の確立した観測のためにはさらなる統計量の蓄積が不可欠である。

$B_s^0 \rightarrow \mu\mu$ の測定

B_s^0 中間子は、 $\bar{b}s$ からなる中性メソンである。 $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 崩壊は、フレーバーが変化する中性カレント (Flavor Changing Neutral Current: FCNC) 過程 [5] であり、標準模型においてはツリーレベルでは起こらない。そのため、この崩壊はループレベルのみで生じ、GIM 機構およびヘリシティ抑制により強く抑制されている。

標準模型における $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 崩壊の分岐比は $(2.7_{-0.5}^{+0.6}) \times 10^{-9}$ と予言されており [6]、理論的不確かさが小さいことから、新物理の影響を高感度に検証できる希少崩壊過程として知られている。特に、超対称性模型などの標準模型を拡張した理論では、スカラーあるいは擬スカラー相互作用の寄与により、分岐比が大きく変化する可能性がある。

以上の理由から、 $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 崩壊の分岐比を精密に測定することは、標準模型の精密検証のみならず、新物理探索においても重要な役割を果たす。2020 年には ATLAS 実験、CMS 実験、LHCb 実験による測定結果を組み合わせた分岐比の評価が報告されている [7, 8, 9]。その探索結果を図 1.5 に示

1.2. LHC-ATLAS 実験の目的

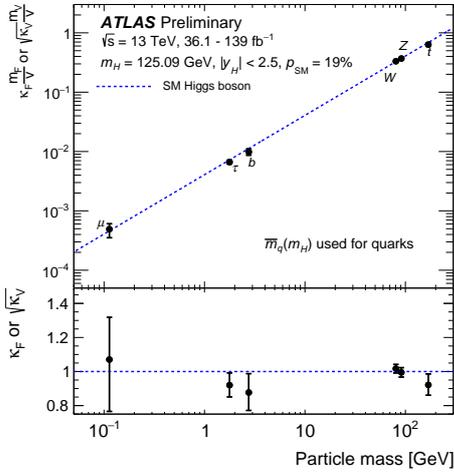


図 1.3: ATLAS 実験におけるヒッグス粒子とフェルミオンとの結合強度の測定結果 [4]。ヒッグス粒子とフェルミオンの結合強度はフェルミオンの質量に比例すると予想されており、ミューオンのような軽いフェルミオンとの結合は特に測定が困難となる。

す。各実験の結果を結合した測定値は $(2.69^{+0.37}_{-0.35}) \times 10^{-9}$ であり、標準模型から有意なずれは観測されていない [10]。理論的不確かさが小さいことから将来的な測定精度の向上により、微小な新物理効果に対しても高い感度を持つ検証が可能となる。なお、2020 年以降に CMS 実験および LHCb 実験による単独の更新結果も報告されているが、現時点で $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 崩壊分岐比は標準模型の予測から有意なずれは報告されていない [11, 12]。

$\tau \rightarrow 3\mu$ の探索

標準模型ではレプトンフレーバー保存則が成り立つとされているが、ニュートリノ振動の観測 [13] により、レプトンフレーバーが厳密な対称性ではないことが明らかとなった。しかし、荷電レプトンフレーバー保存則の破れ (Charged Lepton Flavour Violation: CLFV) はニュートリノ質量と混合角を導入した場合でも、その分岐比は極めて小さいと予測されている。

このため、CLFV を伴う崩壊過程は現在の実験感度で観測されれば新物理の存在を強く示唆する過程として位置づけられる。LHC における CLFV 探索では、 τ レプトンを含む崩壊過程が重要な探索対象の一つとなっており、代表的なチャンネルとしては、 $\tau \rightarrow 3\mu$ 崩壊が挙げられる。LHC では陽子陽子衝突により、 W/Z ボソン、 $t\bar{t}$ 事象などを通じて τ レプトンが大量に生成されることから高統計で探索が可能であり、終状態が 3 本のミューオンから構成されることから、背景事象を効果的に抑制した解析が可能である。

$\tau \rightarrow 3\mu$ 崩壊は標準模型にニュートリノ質量と混合を導入した拡張においても、その分岐比は $O(10^{-55})$ と極めて小さく、実験的に観測不可能な水準にあることが示されている [14]。したがって、 $\tau \rightarrow 3\mu$ が観測された場合、それは標準模型を超える新物理過程の存在を示す証拠となる。

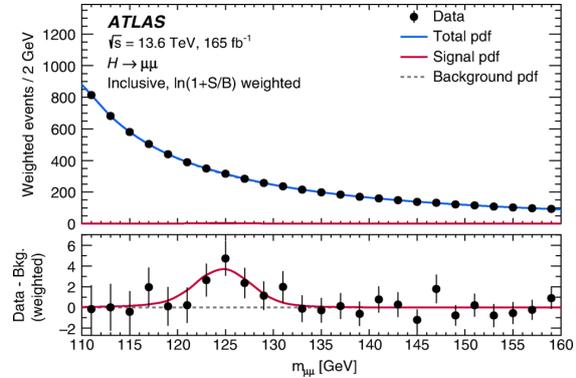


図 1.4: ATLAS 実験における $H \rightarrow \mu\mu$ 崩壊の不変質量分布 [3]。120–130GeV のヒッグス粒子の質量付近において信号が確認されており、その統計的有意性は 3.4σ であると報告されている。

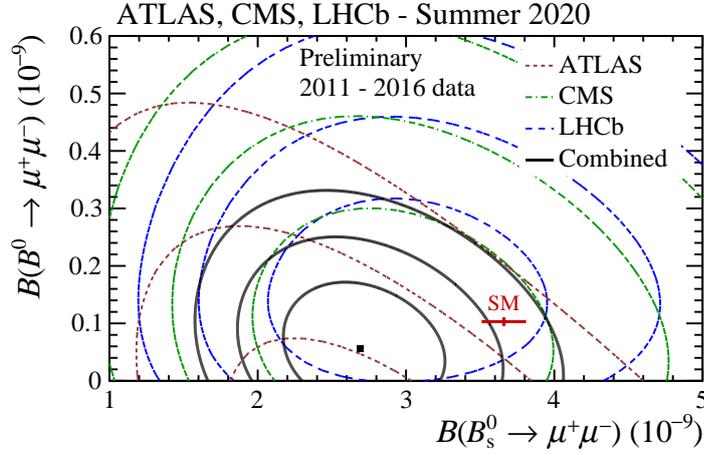


図 1.5: ATLAS 実験、CMS 実験、LHCb 実験による $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu\mu$ 崩壊分岐比の測定結果の組み合わせ [10]。楕円はそれぞれの測定および合成結果の信頼領域に対応している。標準模型の予測値（赤点）に対する適合度は、 $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 単独で 2.4σ 、 $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ 単独で 0.64σ 、両崩壊モードを同時に考慮した場合で 2.1σ であり、標準模型からの有意なずれは観測されていない。

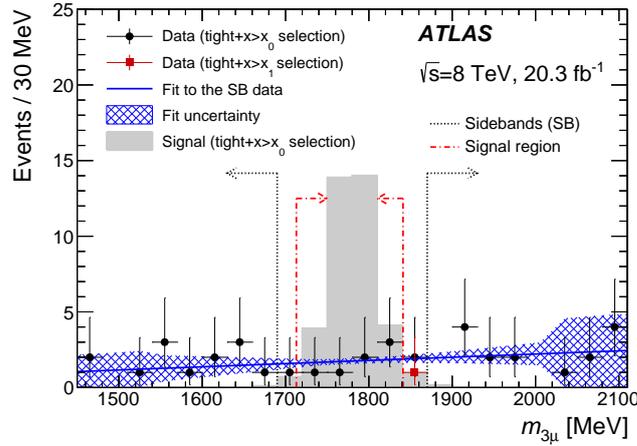


図 1.6: ATLAS 実験における $\tau \rightarrow 3\mu$ の探索結果 [15]。8 TeV データを用いた探索においてシグナルは観測されず、分岐比について $B(\tau \rightarrow 3\mu) < 3.76 \times 10^{-7}$ (90 % CL) の上限が設定された。

ATLAS 実験では、図 1.6 に示すように、重心系エネルギー 8 TeV で取得されたデータを用いて $\tau \rightarrow 3\mu$ 探索が行われた。その結果、候補事象は観測されず、分岐比に対して $B(\tau \rightarrow 3\mu) < 3.76 \times 10^{-7}$ (90 % CL) の上限が設定された [15]。その後、より高エネルギーかつ高統計のデータを用いた CMS 実験においても探索が行われ、 $B(\tau \rightarrow 3\mu) < 3.6 \times 10^{-8}$ (95 % CL) の上限が報告されている [16]。また、Belle II 実験をはじめとする他の実験においても $\tau \rightarrow 3\mu$ 崩壊の探索が進められているが、現時点では有意なシグナルは観測されていない [17]。

1.2.2 トリガー設計とミューオンの物理

LHC-ATLAS 実験では、陽子の塊である陽子バンチが 40 MHz のレートで交差し、陽子同士の衝突が生じる。これらの衝突によって生成される事象の大部分は背景事象であり、物理的に重要な事象は全体のごく一部に限られる。さらに、検出器の読み出し帯域やデータ保存容量には制限があるため、生成されるすべての事象を保存することは不可能である。このような理由から、保存する事象を選別するためにトリガーシステムが導入されている。

陽子-陽子衝突では強い相互作用によるハドロン生成が支配的である。一方、ミューオンは高い透過性を持つことから、ATLAS 検出器外側に位置するミューオンスペクトロメータにおいて比較的低い背景事象のもとで検出可能である。この特性を活用すると、電弱相互作用を伴う過程や新物理過程において終状態にミューオンが含まれる場合、ミューオンを事象選別のプローブとして用いることが可能である。このため、ミューオンは重要な物理オブジェクトの一つであり、ATLAS 実験ではミューオンを捉えることを目的としたミューオントリガーが設計されている。ミューオントリガーでは、ミューオンスペクトロメータの情報を用いてミューオンの横方向運動量 p_T を評価し、所定の閾値を超えた事象を取得する。

一方で、低い p_T を持つミューオンも多くの物理過程において重要であることが知られている [18]。特に低質量の新粒子探索や希少崩壊過程では、終状態に含まれるミューオンの p_T が小さくなる場合がある。例えば、 $\tau \rightarrow 3\mu$ 崩壊では τ レプトンの質量が 1.777 GeV と小さいことから、崩壊生成されるミューオンの p_T も低くなりやすい。

しかし、低 p_T のミューオンは生成量が多く、単純に p_T 閾値を下げるとトリガーレートが急増してしまう。トリガーの出力レートは有限であり、トリガー段階で除外された事象はその後のデータ解析がどう改良されようと、取り戻すことができない。したがって、トリガーの性能は、保存可能な事象数のみならず、最終的に到達可能な物理感度を直接的に制限する要因となる。このため、低 p_T ミューオンを含む物理事象を効率的に取得するためにはトリガー設計上の工夫が必要となる。

そこで ATLAS 実験では、複数のミューオンを同時に要求するマルチミューオントリガーが導入されている。例えば、2つのミューオンを同時に要求するダイミューオントリガーや、3つのミューオンを同時に要求するトリミューオントリガーが用いられる。複数のミューオンを要求することで生成断面積が相対的に小さくなり、トリガーレートを抑えたまま低 p_T ミューオン事象を取得することが可能となる。このようなマルチミューオントリガーは、トリガーレートの制約下において物理感度を確保する上で重要な役割を果たしている。

このように、ATLAS 実験のトリガーは有限な出力レートという制約のもとで、対象とする物理過程に応じて設計されている。

1.2.3 LHC 高輝度化のためのアップグレード

今後、LHC では高輝度化を目的としたアップグレードが計画されている。その計画の全体像を図 1.7 に示す。高輝度化では、陽子-陽子衝突の発生環境が大きく変化する。

LHC では陽子ビームをバンチとして衝突させるため、単一のバンチ交差で複数の陽子-陽子衝突が

1.2. LHC-ATLAS 実験の目的

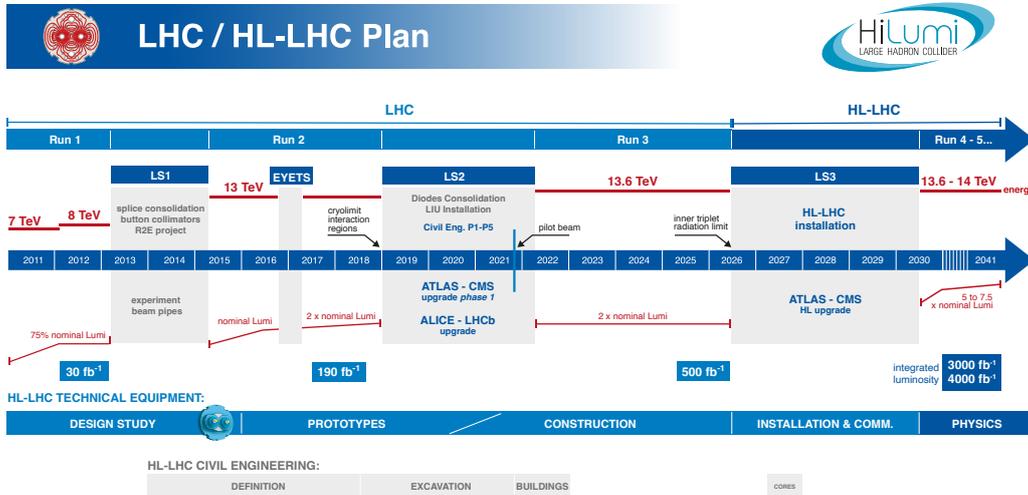


図 1.7: LHC および高輝度 LHC の計画 [19]。

表 1.1: 第三期運転 (Run 3) および第四期運転 (Run 4) での LHC の陽子ビームのステータス [20]。

	Run 3	Run 4
重心系エネルギー [TeV]	13.6	14
瞬間ルミノシティ [$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	2	5–7.5
平均衝突数 $\langle\mu\rangle$	64	140–200
積分ルミノシティ [fb^{-1}]	500	3000–4000

同時に発生する。一つのバンチ交差内で複数の衝突が重なることをパイルアップと呼び、その大きさは 1 バンチあたりの平均衝突数 $\langle\mu\rangle$ で表される。

高輝度 LHC では、瞬間ルミノシティを Run 3 における $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ から $5\text{--}7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度まで増加させ、約 10 年間の運転を通じて $3000\text{--}4000 \text{ fb}^{-1}$ の積分ルミノシティを達成することが目標とされている。これによって、陽子の平均衝突数 $\langle\mu\rangle$ は Run 3 での平均 64 から 140–200 へ増加する見込みである。Run 3 および Run 4 における陽子ビーム条件の比較を表 1.1 に示す。

積分ルミノシティの増大を通じて希少過程の探索感度が向上する一方で、平均衝突数 $\langle\mu\rangle$ の増加に伴う新たな課題が生じる。その一つに、衝突事象全体の発生率が増加することで、検出器およびデータ取得系に流入する事象数が急増する点が挙げられる。加えて、記録された単一の事象内部においても、衝突の重なりによって構造が複雑化し、物理的に興味のある信号が背景事象に埋もれてしまう可能性がある。

このように、高輝度 LHC 環境では、事象数の増大と事象内部構造の複雑化という課題が存在する。

1.2.4 高輝度環境におけるトリガーの重要性

前小節で述べたような高輝度 LHC 環境における課題は、トリガーシステムに直接的な影響を与える。衝突頻度および背景事象数の大幅な増加により、現行のトリガーシステムをそのまま適用した場合、所定のトリガーレートの制約内に出力を収めるためにはトリガー閾値の引き上げが必要となる。しかしながら、閾値の引き上げは物理アクセプタンスの大きな損失を生んでしまう。トリガー閾値と物理アクセプタンスの関係は、シミュレーションによっても示されており、図 1.8 ではシングルレプトントリガーの p_T 閾値と物理アクセプタンスの関係が示されている。 p_T 閾値を低減することが、幅広い物理過程に対するアクセプタンスの向上に直結することが分かる。こうした背景から、高輝度環境に対応するためにはトリガーシステム自体のアップグレードが不可欠である。

一方で、高輝度 LHC 環境では、初段トリガーにおける出力レートを現行の約 100 kHz から最大 1 MHz へ約 10 倍に拡張する [21]。オンライン処理資源やデータ帯域には有限の制約が存在するため、物理的重要性やオンライン再構成に要する処理負荷を考慮して、許容レートの最適化が行われる。この結果、拡張された出力レートは、各物理オブジェクトに一律に配分されるわけではなく、設計上の優先度に基づいて割り当てられる。初段ミュオントリガーの場合、Run 3 における 2024 年の運転実績では、シングルミュオントリガーにおいて p_T 閾値 20 GeV の条件でおよそ 11 kHz のレートが観測されている [22]。対して、高輝度 LHC 環境を想定した Run 4 のトリガーメニューでは、同一の p_T 閾値に対して約 40 kHz のレートの割り振りが見積もられている [21]。

以上のことから、高輝度環境に適応した高効率かつ高精度なトリガー設計が不可欠となっている。

1.3 本研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究ではエンドキャップ領域における初段ミュオントリガーのトリガーロジック開発を行った。初段ミュオントリガーでは、検出器の幾何構造に起因して単一のミュオンが複数のミュオン候補として再構成される場合があり、これがトリガーレート増加の要因となる。本研究の目的は、このような重複したミュオン候補をトリガーの段階で判定し排除するロジックを開発し実装することである。

本研究では、重複したミュオン候補を判定し除去するロジック Overlap Removal について、アルゴリズム設計から実装、性能評価までを一貫して行った。性能評価においては、特に複数のミュオンを含む事象を対象とし、トリガー効率および物理感度への影響を評価した。

本論文の次章以降の構成は次の通りである。

第 2 章 高輝度 LHC-ATLAS 実験の概要

第 3 章 初段エンドキャップミュオントリガーのトリガーロジックの概要

第 4 章 重複したミュオン候補除去アルゴリズム (Overlap Removal) の開発

第 5 章 FPGA 実装と検証

第 6 章 Overlap Removal の性能評価

第 7 章 本論文のまとめと今後の展望

1.3. 本研究の目的

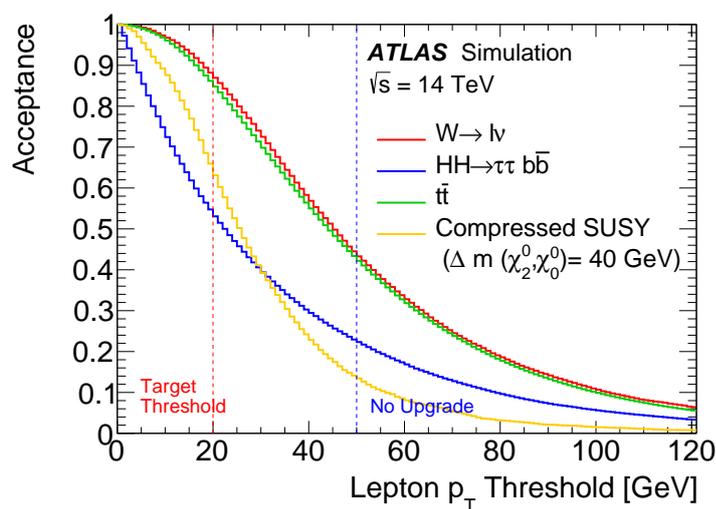


図 1.8: シングルレプトントリガーの p_T 閾値に対する物理アクセプタンスの依存性を示したシミュレーション結果 [21]。 $W \rightarrow l\nu$ 、 $H \rightarrow \tau\tau b\bar{b}$ 、 $t\bar{t}$ 、 および低運動量レプトンを含む超対称性 (SUSY) モデルの例を示している。 図中の青線はトリガーアップグレードを行わない場合に想定される p_T 閾値 50 GeV の閾値を、赤線はアップグレード後に目標とされている p_T 閾値 20 GeV を表している。 p_T 閾値を 50 GeV に設定した場合、多くの物理過程においてアクセプタンスが大きく低下する一方で、20 GeV まで閾値を低減することにより、幅広い物理過程に対するアクセプタンスを維持できることが分かる。

第 2 章

高輝度 LHC-ATLAS 実験

ATLAS 実験は、LHC の衝突点の一つに設置された ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) 検出器を用いて、標準模型の精密測定および新物理探索を目的とした高エネルギー陽子衝突実験である [23, 24]。本研究では、高輝度 LHC 環境において動作する初段ミューオントリガーの性能向上を目的としており、その理解には ATLAS 検出器の構成およびトリガー・データ収集 (Trigger and Data Acquisition: TDAQ) システムの役割を把握することが不可欠である。このため本章では、まず LHC の概要を述べた後、ATLAS 検出器の構成とその各サブシステムについて概説する。加えて、高輝度 LHC-ATLAS 実験における TDAQ システムの概要について説明する。

2.1 LHC

Large Hadron Collider (LHC) は、スイスとフランスの国境に位置する欧州原子核研究機構 (CERN) に設置された、周長約 27 km の円形陽子加速器である。LHC は、設計上は重心系エネルギー 14 TeV に達する世界最高エネルギーの陽子-陽子衝突を実現可能であり、ATLAS 実験を含む複数の大型検出器に衝突事象を供給している。陽子に加えて、鉛などの重イオンを加速する運転も行われており、幅広い目的を持って運転される。LHC を含む CERN に設置されている加速器群を図 2.1 に示した。陽子は LHC へ入射するまでに複数の前段加速器によって加速される。はじめに線形加速器である Linear Accelerator 4 (Linac4) によって 50 MeV まで加速される。続いて、Proton Synchrotron Booster (PSB) によって 1.4 GeV まで加速され、次に Proton Synchrotron (PS) で 25 GeV まで加速される。そして、Super Proton Synchrotron (SPS) で 450 GeV まで加速されると、LHC へ入射され、現行では 6.8 TeV まで加速される。陽子ビームの制御には超電導技術が用いられており、超電導加速空洞にて加速を行い、超電導双極電磁石にて進行方向を曲げている。この際、最大で 8.33 T もの強磁場が使用されている [26]。

LHC における主な衝突点は ATLAS 検出器を含めて 4 箇所存在し、それぞれに CMS (Compact Muon Solenoid)、LHCb (Large Hadron Collider beauty)、ALICE (A Large Ion Collider Experiment) といった検出器が設置されている。

CMS 実験は ATLAS 実験と同様に、標準模型の精密測定および新物理探索を含む幅広い物理を対象としている。LHCb 実験は b クォークに関連するフレーバー物理に特化しており、ALICE 実験は重イオン衝突を対象としたクォーク・グルーオンプラズマの性質解明を目的としている。

2.2 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は、LHC の衝突点で生成された粒子を多角的に測定することを目的として設計された大型の汎用粒子検出器である。直径約 25 m、長さ約 44 m の円筒形をしており、その全体像は

2.2. ATLAS 検出器

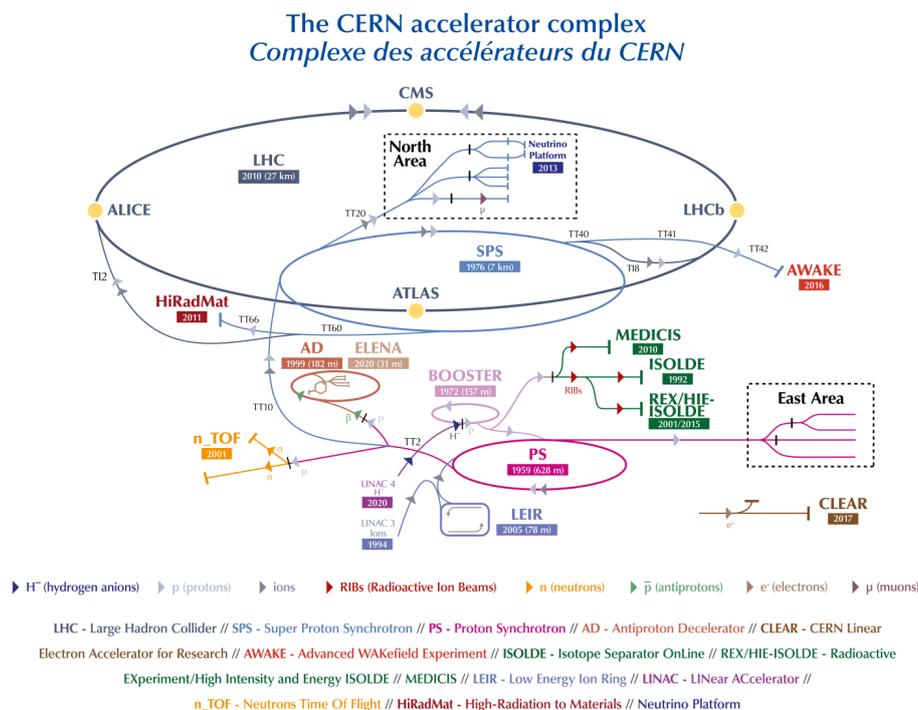


図 2.1: CERN に設置されている加速器群の全体像 [25]。複数の加速器が存在しており、最も大きな加速器リングが LHC である。

図 2.2 のようになっている。円筒の側面部分と底面部分では検出器の配置や種類が異なっており、側面部分をバレル領域、底面部分をエンドキャップ領域と呼ぶ。

ATLAS 検出器内部には超電導ソレノイド磁石および超電導トロイド磁石によって磁場が発生しており、荷電粒子の飛跡を磁場中で曲げることで運動量が測定される。検出器の主なサブシステムとしては、内側から内部飛跡検出器、カロリメータ、ミューオンスペクトロメータが設置されている。

図 2.3 に、ATLAS 検出器における粒子の典型的な応答の模式図を示す。衝突点近傍では、荷電粒子が内部飛跡検出器を通過し、磁場中で曲げられることで運動量が測定される。その外側には電磁カロリメータおよびハドロンカロリメータが配置されており、電子や光子は主に電磁カロリメータにおいて電磁シャワーを形成しエネルギーが測定され、ハドロンはハドロンカロリメータでハドロンシャワーを形成してエネルギーが測定される。

一方、ミューオンは物質との相互作用が弱いため、カロリメータをほぼ透過し、検出器最外縁に配置されたミューオンスペクトロメータに到達する。この特性により、ミューオンは他の荷電粒子と識別することが可能である。また、ニュートリノは検出器内でほとんど相互作用しないため、直接検出されず、イベント再構成時に運動量が不釣り合いとなることから間接的に推定される。

このように、ATLAS 検出器では、粒子が各サブシステムで示す応答の違いを組み合わせることで、生成粒子の種類、エネルギーおよび運動量を総合的に再構成している。これらのサブシステムはそれぞれ異なる物理量の測定に特化しており、相補的な情報を組み合わせることで、高い識別能力と測定

2.2. ATLAS 検出器

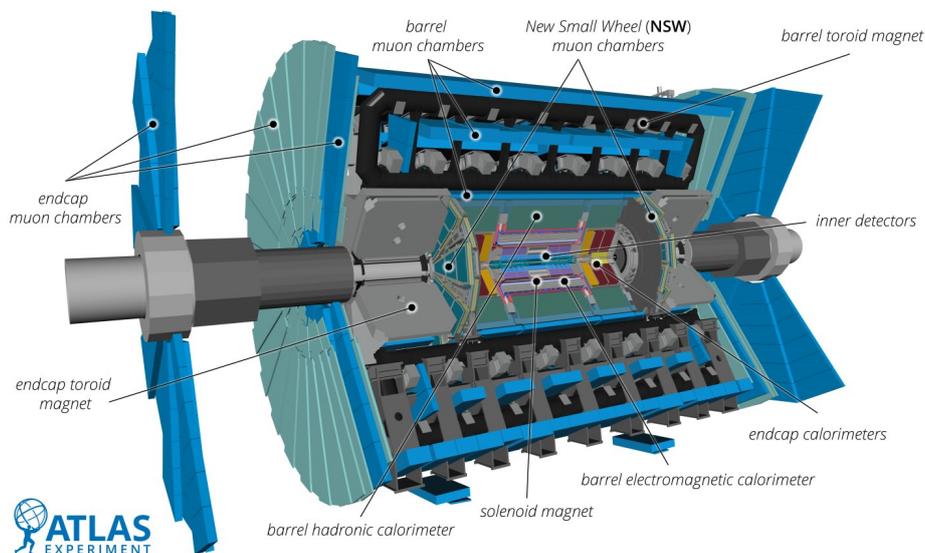


図 2.2: ATLAS 検出器の全体像 [27]。複数の検出器サブシステムから構成されており、内側から内部飛跡検出器、カロリメータ、ミューオン検出器が設置されている。

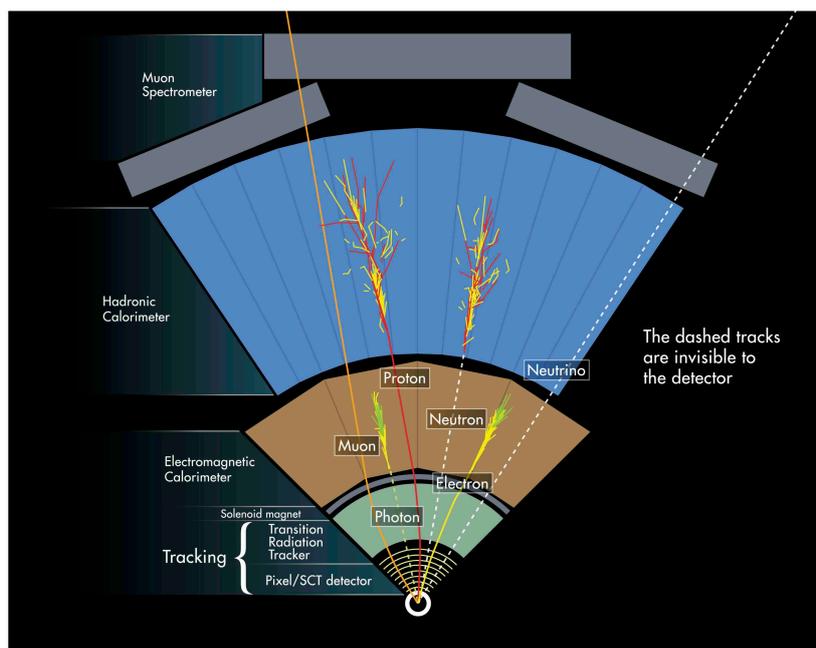


図 2.3: ATLAS 検出器における粒子応答の模式図 [28]。粒子の種類に応じて内部飛跡検出器、カロリメータ、ミューオンスペクトロメータにおける応答が異なることを示している。

精度を実現している。この多層構造により、ATLAS 検出器は幅広い事象に対して高い感度を持つ検出器として機能している。以下では、ATLAS 検出器で用いられる座標系および磁場構成について述べた後、本研究が対象としている初段エンドキャップミューオントリガーと特に関係の深いミューオンスペクトロメータについて詳述する。

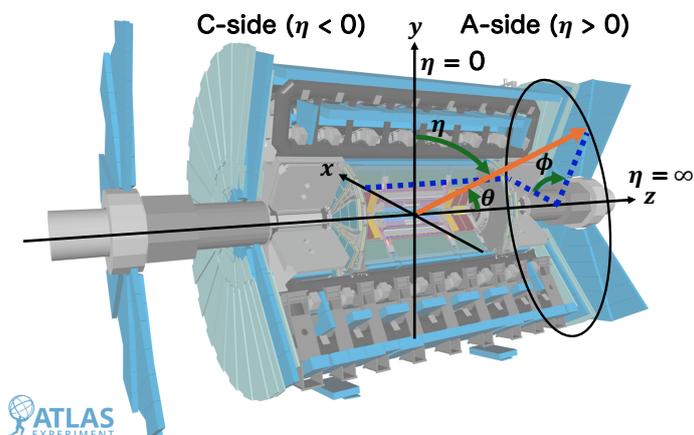


図 2.4: ATLAS 実験で使用される座標系 ([27] の画像を編集して使用)。直交座標系および円筒座標系で表される。

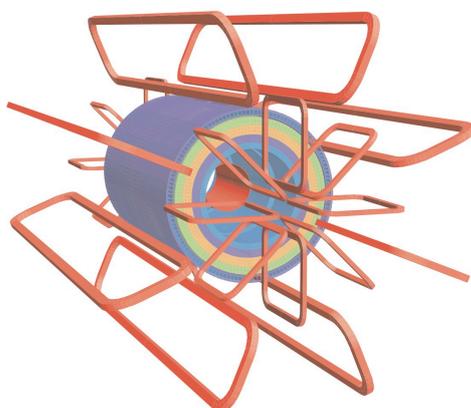


図 2.5: ATLAS 検出器に設置された超電導磁石の幾何構造 [23]。内部飛跡検出器を取り囲むソレノイド磁石と、バレル領域およびエンドキャップ領域に配置されたトロイド磁石から構成されている。

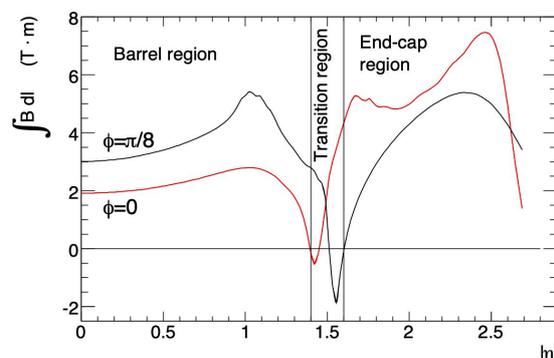


図 2.6: トロイド磁石における積分磁場の分布 [23]。 $\phi = 0$ と $\phi = \pi/8$ における $|\eta|$ 依存性を示しており、 η 方向および ϕ 方向に磁場が非一様であることが分かる。

2.2.1 用いられる変数と座標系

ATLAS 実験で使用される座標系を図 2.4 に示す。直交座標系および円筒座標系の双方が用いられる。直交座標系では、 z 軸をビーム軸方向に取り、 x 軸を LHC リングの中心方向、 y 軸を地面に対して上向きに取ることで、右手系を構成する。円筒座標系の場合、ビーム軸方向の z 軸はそのままに、動径方向を $R (= \sqrt{x^2 + y^2})$ 、ビーム軸周りに方位角を ϕ 、ビーム軸からの天頂角を θ と定義する。ATLAS 実験のような加速器実験では、天頂角 θ を用いて式 2.1 で定義される擬ラピディティ η が使用される。

$$\eta = -\ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.1)$$

η はビーム軸方向のローレンツブーストに対して不変な量であり、高エネルギー衝突において粒子の角度分布を記述するのに適している。このような特性から、 η が広く用いられている。また、ATLAS 実験では z 軸正方向を A-side、負方向を C-side と呼んでいる。

2.2. ATLAS 検出器

ATLAS 実験では、一般に陽子同士を衝突させる。陽子は複合粒子でありパートン分布には不定性があることから、衝突に関与するクォークやグルーオンのエネルギーおよび運動量分布を知ることはできない。一方で、ビーム軸に垂直な方向については、衝突前の初期状態における運動量の総和が 0 であるとみなすことができる。この性質から、横方向の運動量およびエネルギーとして p_T (Transverse momentum) や E_T (Transverse energy) がしばしば用いられる。また、ビーム軸に垂直な成分の保存則を用いることで、ニュートリノなど検出されない粒子に起因する横方向エネルギーの不釣り合いを 2 次元ベクトルとして定義することができる。この量は E_T^{miss} (Missing Transverse Energy: MET) と呼ばれる。同様に、横方向運動量の不釣り合いは p_T^{miss} (Missing transverse momentum) として定義される。

2.2.2 マグネットシステム

ATLAS 検出器では、荷電粒子の運動量測定を目的として磁場が印加されている。検出器内部には磁場を発生させる超電導磁石が配置されており、ソレノイド磁石、バレルトロイド磁石、エンドキャップトロイド磁石の 3 つの磁石から構成されている。その概要を図 2.5 に示す。

ソレノイド磁石は内部飛跡検出器と電磁カロリメータの間に設置されている。これにより、内部飛跡検出器領域において約 2 T の磁場を発生させ、飛跡の曲率から運動量測定を可能にしている。

一方、トロイド磁石はバレル領域およびエンドキャップ領域にそれぞれ配置されており、主にミューオンの運動量測定を目的としている。バレルトロイド磁石は約 0.5 T、エンドキャップトロイド磁石は約 1 T の磁場を発生させており、いずれも ϕ 方向に 8 回対称性を持つ構造となっている。トロイド磁場はその配置形状のため、 η 方向および ϕ 方向に対して一様ではなく、図 2.6 に示すように空間的に複雑な分布を持つ。ミューオン運動量測定においては、この非一様な磁場特性を考慮した再構成手法が必要となる。

2.2.3 ミューオンスペクトロメータ

ミューオンスペクトロメータは、ATLAS 検出器の最外層に設置されており、ミューオンの測定に使用される。 $|\eta| < 2.4$ の範囲内でミューオンに対するトリガー発行を行う。ミューオンスペクトロメータでは、 $|\eta| < 1.05$ をバレル領域、 $1.05 < |\eta| < 1.91$ をエンドキャップ領域、 $1.91 < |\eta| < 2.4$ をフォワード領域と呼ぶ。図 2.7 にミューオンスペクトロメータの全体像を示す。バレル領域には、RPC (Resistive Plate Chamber) と MDT (Monitored Drift Tube) 検出器が、エンドキャップ領域には TGC (Thin Gap Chamber) と NSW (New Small Wheel)、MDT 検出器が設置されている。このうち、トリガー発行のために RPC、TGC、NSW 検出器が使用され、精密測定用に NSW、MDT 検出器が使用される。

ミューオンスペクトロメータは、 ϕ 方向に対して大きさの異なるセクターを 2 種類持ち、バレルトロイド磁石が位置するセクターを small sector、その間に位置するセクターを large sector と呼んでいる。それぞれの領域におけるミューオンスペクトロメータの配置図を図 2.8 に示す。

以下では本研究と関わりの深い TGC 検出器について説明する。

2.2. ATLAS 検出器

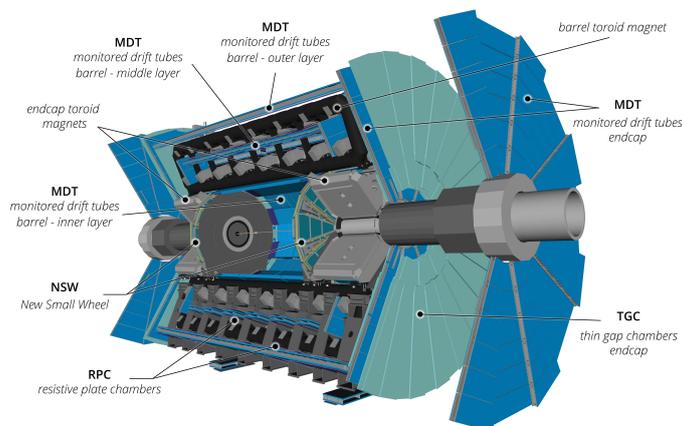


図 2.7: ミューオンスペクトロメータの全体像 [24]。

2.2.3.1 TGC 検出器

TGC 検出器は、エンドキャップ領域においてトリガー発行を目的として使用される検出器である。 $1.05 < |\eta| < 2.4$ の範囲をカバーしており、アノードワイヤとカソードストリップを用いて R - ϕ 平面における二次元位置情報を読み出す Multi Wire Proportional Chamber (MWPC) の一種である。ワイヤで R 方向を、ストリップで ϕ 方向を測定する。

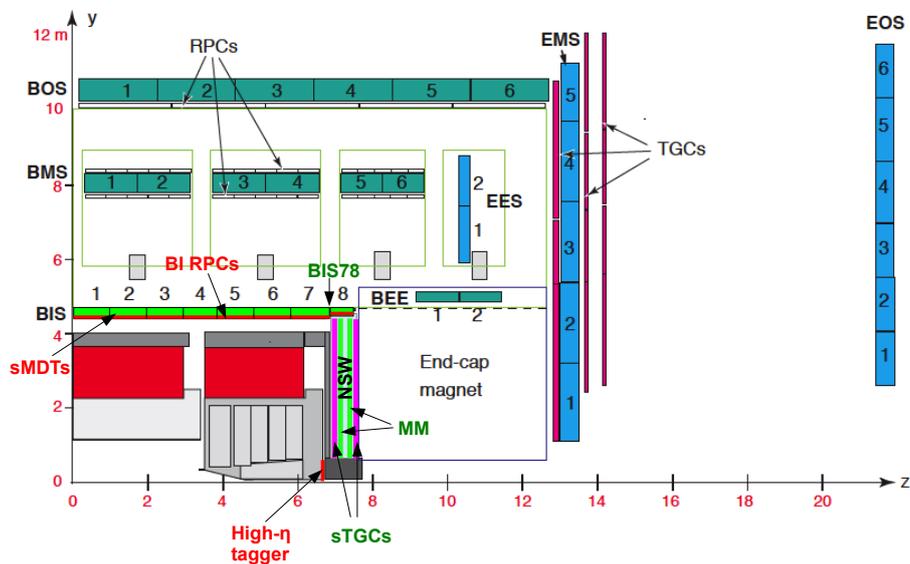
TGC チェンバーの構造を図 2.9 に示す。ガスギャップの幅は 2.8 mm であり、その内部には直径 50 μm のワイヤが 1.8 mm 間隔で配置されている。TGC はトリガー判定に使用される検出器であるため高い時間分解能が要求されており、ワイヤとカソードの間隔は 1.4 mm に設定されている。

ワイヤには 2.9 ± 0.1 kV の高電圧が印加されており、検出器内部には CO_2 と $\text{n-C}_5\text{H}_{12}$ を体積比で 55% : 45% に混合したガスが充填されている。荷電粒子がガス中を通過すると電離により自由電子が生成され、高電圧によって形成された電場中で電子雪崩が生じる。この過程によりワイヤおよびストリップに誘起される信号を読み出すことで、粒子の通過位置が測定される。

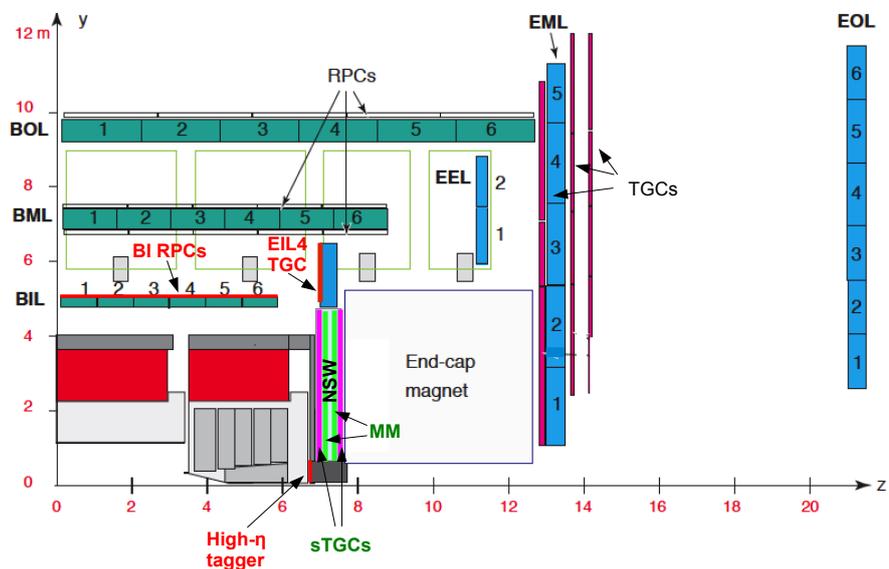
ワイヤは 6–20 本 (10.8–55.8 mm) をまとめて 1 チャンネルとして読み出される。一方、ストリップでは衝突点から見た方位角方向に対して 2–3 mrad の位置分解能を有する。

R - z 平面における TGC 検出器の配置を図 2.10 に示す。TGC 検出器は Big Wheel (BW) と EIL4 の 2 種類に分類される。TGC BW はトロイド磁石の外側に設置された 3 つのステーションから構成されており、内側から M1、M2、M3 と呼ばれる。一方、TGC EIL4 は large sector に配置された TGC であり、トロイド磁石の内側に位置している。各ステーションは 2 層または 3 層構造をとっており、M1 および EIL4 は 3 層構造、M2 および M3 は 2 層構造となっている。

2.2. ATLAS 検出器



(a) small sector



(b) large sector

図 2.8: ミューオンスペクトロメータの y - z 平面の配置図 [29]。 ϕ 方向に大きさの異なるセクターを 2 種類持つ。(a) は small sector、(b) は large sector と呼ばれる。緑色で文字で示されるのは Run 2 から導入された検出器、赤色の文字で示されるのは Run 4 より導入予定の検出器である。

2.2. ATLAS 検出器

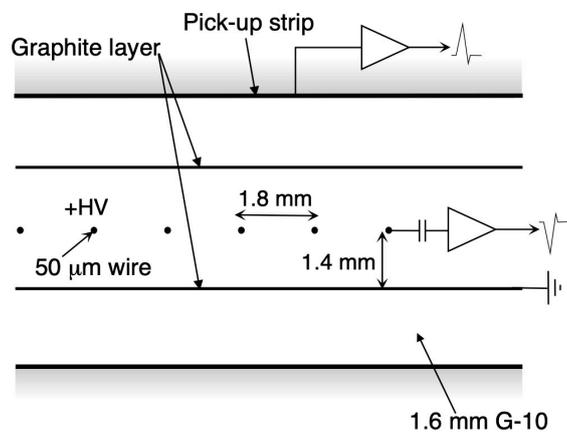


図 2.9: TGC チェンバーの構造 [23]。

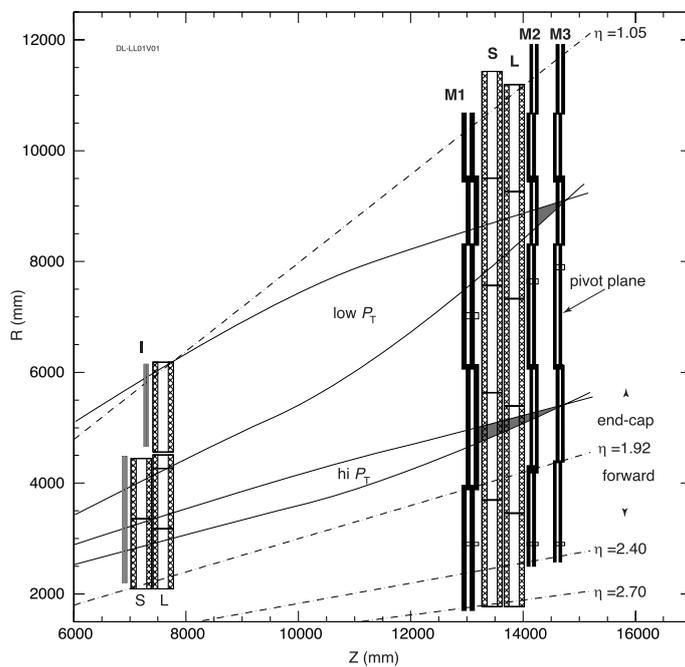


図 2.10: R-z 平面から見た TGC 検出器の配置図 [30]。トロイド磁石の内側に EIL4 が、外側に M1、M2、M3 が設置されている。

TGC BW 検出器

図 2.11 に TGC BW の M1 ステーションの全体像を示す。TGC BW は台形型のチェンバーを方位角方向に周期的に配置した構造を有している。カバーする η 領域のうち、 $1.05 < |\eta| < 1.92$ をエンドキャップ領域、 $1.92 < |\eta| < 2.4$ をフォワード領域と呼ぶ。

エンドキャップ領域では、M1 では 4 枚、M2 および M3 では 5 枚のチェンバーを組み合わせた単位をトリガーセクターと定義する。一方、フォワード領域では 1 枚のチェンバーを 1 トリガーセクターとする。この単位を用いると、エンドキャップ領域は 48 枚、フォワード領域は 24 枚のトリガーセクターから構成されている。隣接するチェンバーは z 方向にずらして配置されており、一部を重ねることで不感領域が生じない構造となっている。この配置構造により、単一のミュオンが複数の隣接トリガーセクターを同時に通過してしまう領域が存在し、同一ミュオンに由来する複数のミュオン候補が各トリガーセクターで独立に生成される可能性がある。このような重複したミュオン候補は、トリガーにおいて同一ミュオンを複数回カウントしてしまう原因となる。

TGC BW 検出器の情報を使用する初段エンドキャップミュオントリガーでは、複数のトリガーセクターを組み合わせた単位で処理が行われる。その詳細な処理単位および構成については第 3 章で述べる。

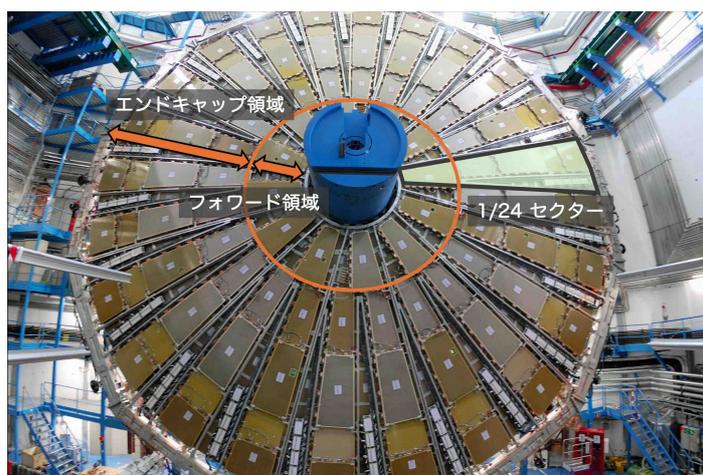


図 2.11: TGC BW 検出器 M1 ステーションの全体像 ([31] の図を編集して使用)。TGC BW は台形型チェンバーを方位角方向に周期的に配置した構造を有しており、 $1.05 < |\eta| < 1.92$ をエンドキャップ領域、 $1.92 < |\eta| < 2.4$ をフォワード領域と呼ぶ。

TGC 検出器に関するフロントエンドエレクトロニクス

TGC 検出器で検出されたヒット情報はトリガー判定に使用される。TGC 検出器に関連して使用されるフロントエンドエレクトロニクスの全体像を図 2.12 に示す。

TGC 検出器で荷電粒子が通過した際に発生する信号は、Amplifier Shaper Discriminator (ASD) に入力される。ASD は入力されたアナログ信号を電圧信号へ変換し増幅する。さらに、コンパレータによって論理信号へ変換し、Primary Processor board (PS board) に送信する。PS board には Patch Panel ASIC (PP ASIC) および FPGA が搭載されている。PP ASIC はヒット信号に対してバンチ

2.2. ATLAS 検出器

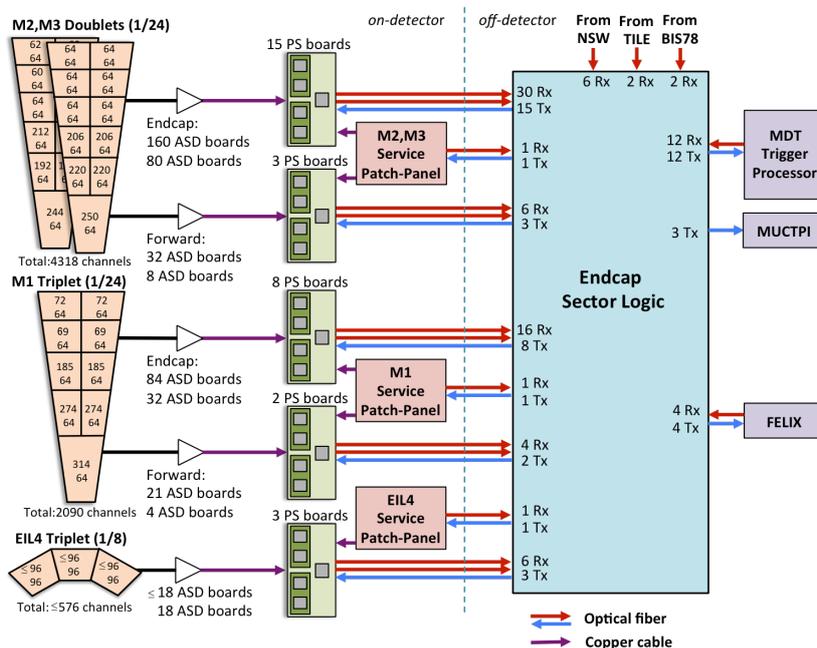


図 2.12: TGC 検出器に関するエレクトロニクスの全体像 [29]。

交差識別 (Bunch Crossing Identification: BCID) を付与する役割を担う。さらに、PS board 上の FPGA においてヘッダー情報などが付加され、Sector Logic (SL) へ送信される。Sector Logic は PS board から送信されたヒット情報を受信し、FPGA 上でトリガー処理およびデータの一時保存を行う。トリガー処理の結果は MUon to Central Trigger Processor Interface (MUCTPI) へ送信され、後段のトリガー判定に用いられる。

以下ではそれぞれのエレクトロニクスについて概説する。

Amplifier Shaper Discriminator (ASD) ASD は TGC 検出器から送られてくるアナログ信号を増幅および整形し、コンパレータによる閾値判定を行う回路である。ASD の写真を図 2.13 に示す。ASD は TGC 検出器から送信された電流信号を電圧効率 0.8 V/pC で電圧信号に変換する。電圧信号はゲイン 7 倍に増幅され、コンパレータを使用して Low Voltage Differential Signaling (LVDS) 規格に従いデジタル信号へ変換する。デジタル信号は後段回路の PS board へ送信される。

Primary Processor board (PS board) PS board は ASD から送られてきた信号を BCID するなどの処理を行う。PS board の写真を図 2.14 に示す。主要な機能は FPGA および PP ASIC が担う。FPGA は Sector Logic との通信や PS board 上の素子のコントロール・モニター等を行い、PP ASIC はテストパルスやヒット信号の遅延、ヒット信号の BCID を行う。陽子バンチ交差は 40 MHz であるが、粒子の衝突点から TGC 検出器までに飛来するまでの時間 (Time of Flight: TOF) や、TGC 検出器から PS board までのケーブル長はそれぞれ固有の値を持つ。そのため、PS board ではそれぞれに適切な信号遅延を与え、陽子バンチ交差ごとに信号を同期させる。

Sector Logic (SL) SL では PS board から送られてきた信号に対してトリガー判定を行うエレクトロ

2.2. ATLAS 検出器

ニクスであり、ATLAS 検出器とは隔離された回路室に設置されている。大規模 FPGA および MPSoC と呼ばれる System on Chip (SoC) を搭載している。SL の第二試作機の写真を図 2.15 に示す。FPGA は Virtex UltraScale+ ファミリの XCVU13P-FLGA2577-1-e [32] を搭載しており、トリガーロジックやリードアウトロジックを実装している。Super Logic Region (SLR) と呼ばれるシリコンダイによって領域が 4 分割されており、それぞれの領域にモジュールが搭載される。MPSoC は FPGA や PS board へのレジスタアクセスを行いコントロールする役割を持つ。また、FPGA の制御やデータ読み出しを行うことができる。

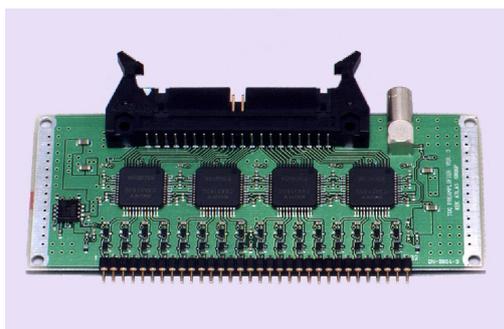


図 2.13: ASD の写真 [29]。



図 2.14: PS board の写真 [33]。

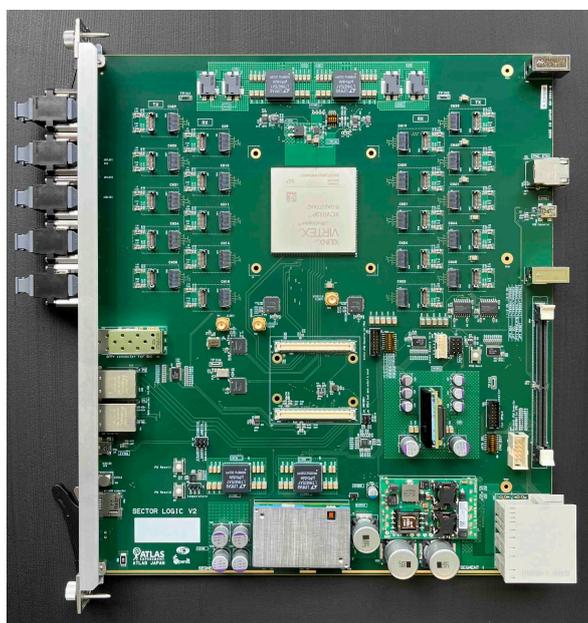


図 2.15: SL 第二試作機の写真 [34]。

2.3 高輝度 LHC-ATLAS 実験におけるトリガーシステム

LHC-ATLAS 実験では、保存するデータを選別するトリガーシステムが導入されている。本節では、高輝度 LHC-ATLAS 実験におけるトリガーシステムについて、特に本研究と関わりの深いミュオントリガーシステムに焦点を当てて説明する。

2.3.1 TDAQ システムの構成

高輝度 LHC-ATLAS 実験で使用されるトリガーシステムについて、全体のアーキテクチャを図 2.16 に示す。大きく二段階で構成されており、Level-0 Trigger (L0 Trigger) と呼ばれる初段トリガーと Event Filter (EF) と呼ばれる後段トリガーが存在する。

L0 Trigger は 10 μ s 以内に物理オブジェクトの同定を行う。L0 Trigger によってトリガーの判定がされた場合、そのトリガーデータおよび検出器データは、1 MHz でデータ収集システム (DAQ) を通じて EF へ転送される。EF システムは、さらにイベントレートを 10 kHz まで低減し、トリガー判定されたイベントを保存するためにストレージへ転送する。

以下では、L0 trigger と EF のトリガーシステムについて概観を説明する。

Level-0 Trigger

L0 Trigger では、高い衝突レート環境下において限られたレイテンシ内で事象選別を行う必要があるため、高速かつ決定論的な処理が可能なハードウェアベースのトリガーとして実装されている。L0 Trigger は、Level-0 Calorimeter Trigger (L0Calo)、Level-0 Muon Trigger (L0Muon)、MUon to Central Trigger Processor Interface (MUCTPI)、Global Trigger、および Central Trigger Processor (CTP) と呼ばれるサブシステムから構成されている。

L0Calo では電磁カロリメータおよびハドロンカロリメータのデータを用いて電子、タウレプトン、およびジェット候補を同定し、 E_T^{miss} を計算する。トリガー判定結果は Global Trigger へ送信される。

L0Muon では全てのミュオンスペクトロメータからのデータおよび Tile カロリメータの情報の一部を受信してミュオン候補を同定する。 $|\eta| < 1.05$ の領域をカバーする Barrel Sector Logic、 $1.05 < |\eta| < 2.4$ の領域をカバーする Endcap Sector Logic と呼ばれるサブシステムが存在する。Barrel Sector Logic は、各バンチ交差ごとに RPC および最外層の Tile カロリメータからデータを受信する。Endcap Sector Logic は、各バンチ交差ごとに TGC、NSW、最外層の Tile カロリメータおよびバレル-エンドキャップの遷移領域に配置されている RPC からデータを受信する。双方の Sector Logic は、FPGA ベースでミュオン候補の再構成を行い、その結果を MUCTPI を介して Global Trigger へ送信する。

MUCTPI はバレルおよびエンドキャップのミュオンシステムからのトリガー情報を集約・統合し、その結果を Global Trigger および CTP へ送信する。L0Muon システムにおいて L0Muon システムにおいて、ミュオンスペクトロメータの幾何構造から生じる 2 重に計数されたミュオン候補を識別 (Overlap Removal) することも行う。

Global Trigger は L0 Trigger に新たに導入されたサブシステムであり、カロリメータ情報に対して従来より詳細な情報を用いたオフライン処理に近いアルゴリズム処理を行う。加えて、MUCTPI から

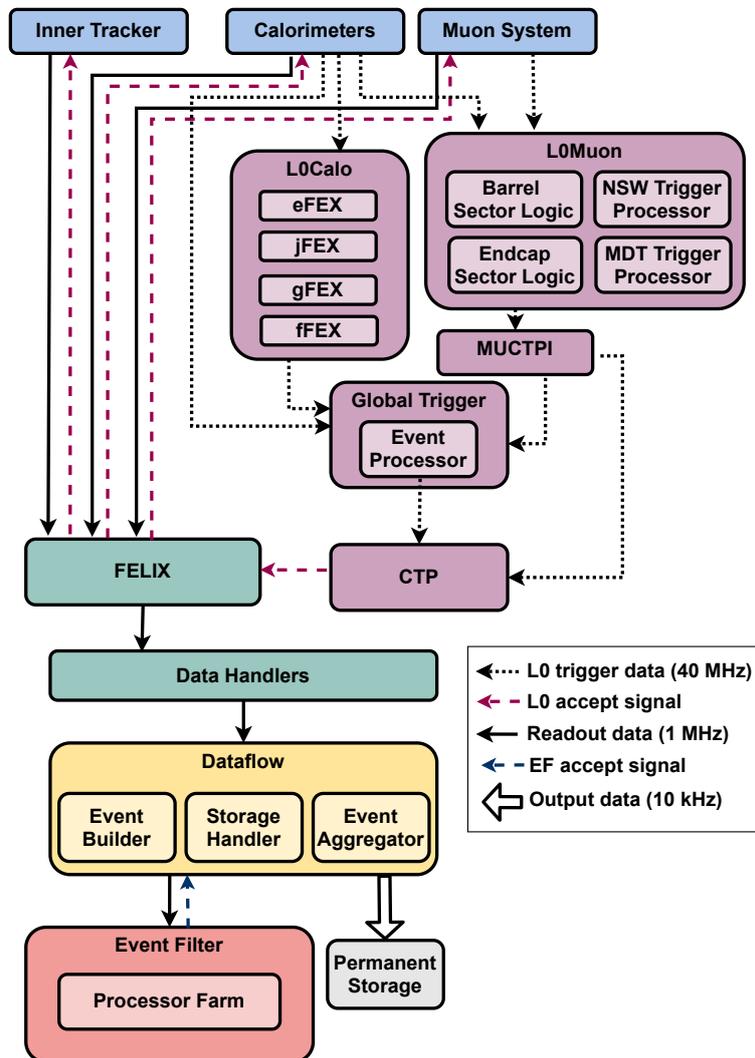


図 2.16: 高輝度 LHC-ATLAS 実験における TDAQ システムのアーキテクチャ [35]。

提供されるミューオン情報を組み合わせて判定を行い、その結果を CTP へ送信する。

CTP はトリガーマニュー構成などを考慮した最終的な L0 トリガー判定を行う。この判定は、Level-0 Accept (L0A) 信号として検出器システムへ送信される。

Event Filter

EF では L0 Trigger によって選択された事象に対して、ソフトウェアベースの高精度な事象再構成を行い、さらなる事象選別を実施する。EF では、L0 Trigger から最大 1 MHz の入力レートで事象を受け取り、約 10 kHz まで事象レートを低減することを目標としている。この段階では、全検出器のデータを用いてオフライン解析に近いアルゴリズムによる事象再構成が行われる。EF においてトリ

2.3. 高輝度 LHC-ATLAS 実験におけるトリガーシステム

ガー判定を通過した事象は、ATLAS オフラインコンピューティングシステムのストレージへ転送される。生の出力イベントサイズは 6 MB と見積もられており、トリガーの総出力レートを 10 kHz とすると、システムからの総出力帯域は 60 GB/s となる。

2.3.2 高輝度化に向けたトリガーシステムの課題

高輝度 LHC 環境では、陽子の平均衝突数 (μ) が 200 近くに達し、年間に記録するデータも Run 3 と比較して増加することが見込まれている。一方、予算について楽観的に見積もっても年次で横ばいであることから、計算基盤の要求は極めて大きい。図 2.17 は、計算リソース使用量およびストレージ使用量の将来予測を示したものである。黒線は年あたり 10% および 20% のハードウェア性能向上およびコスト効率改善による供給可能容量の増加を仮定した目安であり、R&D の達成度合いによっては必要量がこの供給見込みを上回り得ることが示唆されている。したがって、高輝度 LHC に向けてデータ処理の早期段階からの計算・保存負荷を抑える設計と、それを支えるソフトウェア・データ管理の R&D が強く求められる。

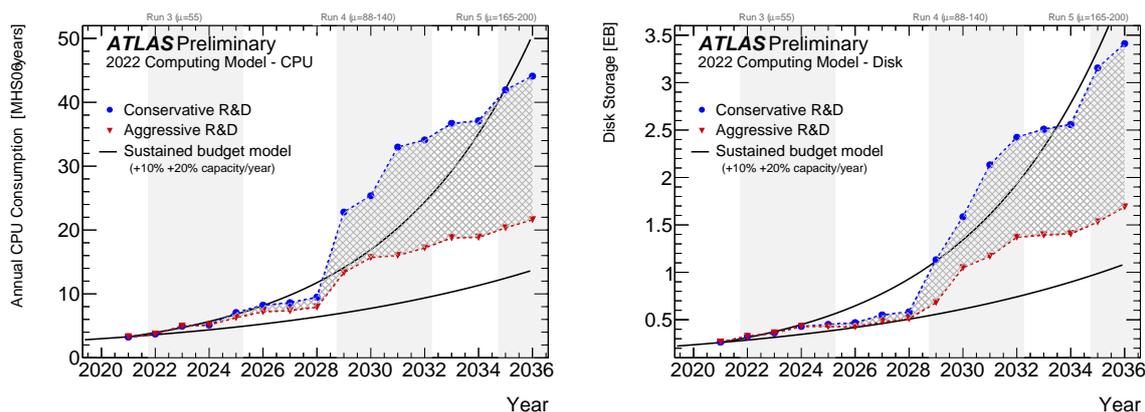


図 2.17: 2020 年から 2036 年までの期間において必要となる計算リソース使用量 (a) およびストレージ使用量 (b) の見積もり [36]。青色マーカーは保守的、赤色マーカーは大きく技術発展が達成された場合の R&D シナリオを示している。黒線は予算とハードウェアの技術向上に対する賄うことができる資源量を示している。

2.3.3 Level-0 Muon Trigger

Level-0 Muon Trigger (L0 Muon) は、高輝度 LHC-ATLAS 実験 アップグレードにおいて拡張されたレイテンシおよびレート条件の下で、より高精度なミュオン候補の再構成を行うことを目的とした初段トリガーシステムである。L0 Muon では、ミュオンスペクトロメータおよび Tile カロリメータからの情報をもとにトリガー判定が行われる。トリガーおよび読み出しシステムのレイテンシとレートが拡張されたことにより、従来よりも多くの検出器情報を用いたミュオン候補の再構成が可能となり、トリガー効率の向上が図られている。

2.3. 高輝度 LHC-ATLAS 実験におけるトリガーシステム

L0Muon は、Barrel Sector Logic、Endcap Sector Logic、MDT Trigger Processor および NSW Trigger Processor の 4 つのサブシステムから構成されている。Sector Logic および NSW Trigger Processor は刷新され、MDT Trigger Processor は新たに導入される。L0Muon のシステムを簡略化したブロック図を図 2.18 に示す。

Barrel Sector Logic は RPC および Tile カロリメータからヒット情報およびエネルギー情報を受信し、Endcap Sector Logic は TGC、NSW、RPC、Tile カロリメータからヒット情報およびエネルギー情報を受信する。Sector Logic ではこれらの情報を用いてミューオン候補を再構成し、その結果を MDT Trigger Processor に送信する。MDT Trigger Processor はより高精度な p_T 判定に基づいてミューオン候補のフィルタリングを行い、その結果を Sector Logic に返す。これらの処理を経た後、Sector Logic はミューオン候補を MUCTPI へ送信する。

レイテンシとレートに対応するため、一部を除いて電子回路も刷新される。刷新後は、全てのヒットデータが高速光リンクを介して転送され、トリガーロジックの処理は全て Sector Logic に実装される。

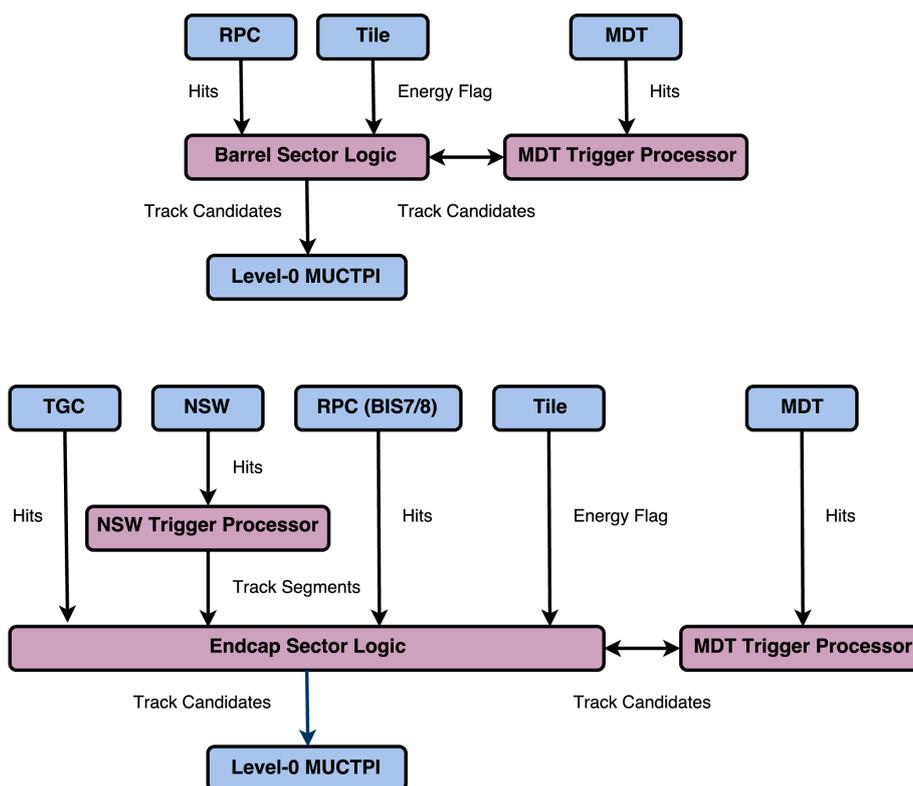


図 2.18: Level-0 Muon Trigger のシステムを簡略化したブロック図 [21]。上部分はバレル領域、下部分はエンドキャップ領域におけるシステムを示している。

2.3. 高輝度 LHC-ATLAS 実験におけるトリガーシステム

トリガーマニュー

ATLAS 実験において使用されるトリガーの集合はトリガーマニューと呼ばれる。トリガーマニューには、各トリガー項目に対して選択条件および許容レートが定義されている。図 2.19 は、高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けて提案されているトリガーマニューの一例を示している。

ミューオントリガーでは、ミューオンの横方向運動量 p_T に閾値を設定することで事象選別が行われる。図 2.19 に示す例では、シングルミューオントリガーに対して p_T 閾値 20 GeV が設定され、45 kHz のレートが割り当てられている。一方で、2 つ以上のミューオンを同時に要求するダイミューオントリガーをはじめとするマルチミューオントリガーでは、シングルミューオントリガーと比較してより低い p_T 閾値を設定することが可能である。同図に示す例では、ダイミューオントリガーに対して各ミューオンの p_T 閾値が 10 GeV に設定され、対応するレートは 10 kHz となっている。

Trigger Selection	Run 1 Offline p_T Threshold [GeV]	Run 2 (2017) Offline p_T Threshold [GeV]	Planned HL-LHC Offline p_T Threshold [GeV]	L0 Rate [kHz]	After regional tracking cuts [kHz]	Event Filter Rate [kHz]
isolated single e	25	27	22	200	40	1.5
isolated single μ	25	27	20	45	45	1.5
single γ	120	145	120	5	5	0.3
forward e			35	40	8	0.2
di- γ	25	25	25,25		20	0.2
di- e	15	18	10,10	60	10	0.2
di- μ	15	15	10,10	10	2	0.2
$e - \mu$	17,6	8,25 / 18,15	10,10	45	10	0.2
single τ	100	170	150	3	3	0.35
di- τ	40,30	40,30	40,30	200	40	0.5 ^{††}
single b -jet	200	235	180			0.35 ^{†††}
single jet	370	460	400	25	25	0.25
large- R jet	470	500	300	40	40	0.5
four-jet (w/ b -tags)		45 [†] (1-tag)	65(2-tags)	100	20	0.1
four-jet	85	125	100			0.2
H_T	700	700	375	50	10	0.2 ^{†††}
E_T^{miss}	150	200	210	60	5	0.4
VBF inclusive			2x75 w/ ($\Delta\eta > 2.5$ & $\Delta\phi < 2.5$)	33	5	0.5 ^{†††}
B -physics ^{††}				50	10	0.5
Supporting Trigs				100	40	2
Total				1066	338	10.4

[†]In Run 2, the 450 kHz trigger operates below the efficiency plateau of the Level-0 trigger.

^{††}This is a placeholder for a selection to be defined.

^{†††}Assumes additional analysis-specific inputs at the Event Filter level.

図 2.19: 高輝度 LHC-ATLAS 実験において提案されているトリガーマニューの例 [21]。トリガーマニューは多様な物理過程を効率的に取得するために設計されており、本図はその構成例を示している。

2.3.4 エンドキャップ領域における初段ミューオントリガー

本研究は L0Muon における Endcap Sector Logic サブシステムである初段エンドキャップミューオントリガーと密接に関係している。

Endcap Sector Logic では主に TGC 検出器からのヒット情報を用いてエンドキャップ領域におけるミューオン飛跡の再構成を行う。再構成には、後述する第 3 章で説明するように、事前に定義された

2.3. 高輝度 LHC-ATLAS 実験におけるトリガーシステム

ヒットパターンとの照合に基づくパターンマッチング手法が用いられている。この手法は高速な処理が可能であり、初段トリガーにおける実装に適した特性を持つ。

従来の Endcap Sector Logic では、ワイヤおよびストリップに対して、1 ステーションあたりの層数に応じた最小ヒット数の条件を課していた。これに対し、高輝度 LHC-ATLAS 実験では検出器構成の変更およびレイテンシ拡張を活用し、全体としてより緩いヒット条件を許容する設計が採用されている。このような設計により、物理感度およびトリガー効率の向上が期待されている。

TGC 検出器のみを用いてミュオン候補を再構成した場合、衝突点由来でないミュオンに起因するフェイクミュオンがトリガーレートを不要に増加させることが知られている。この問題に対処するため、トロイド磁場内部に配置された検出器とのコインシデンスをとる Inner Coincidence が導入されてきた。図 2.20 に 2025 年の Run 3 における Inner Coincidence によるトリガーレート削減の効果を示す。EIL4、Tile カロリメータおよび NSW 検出器との Inner Coincidence を用いることで、フェイクミュオンに起因するトリガーレートが実際に抑制されることが確認されている。

これらの運用経験を踏まえ、高輝度 LHC-ATLAS 実験においても初段エンドキャップミュオントリガーとして Inner Coincidence は実装される。その概念図を図 2.21 に示す。TGC 検出器によって再構成されたミュオン候補は、 $1.05 < |\eta| < 1.3$ の領域では Tile カロリメータまたは RPC BIS78 検出器と、 $1.3 < |\eta| < 2.4$ の領域では NSW 検出器と位置および角度情報に基づくコインシデンスをとることで、背景事象の抑制が図られている。

以上のようなトリガーは Sector Logic の FPGA に実装される。その具体的なトリガーロジックについては第 3 章で述べる。

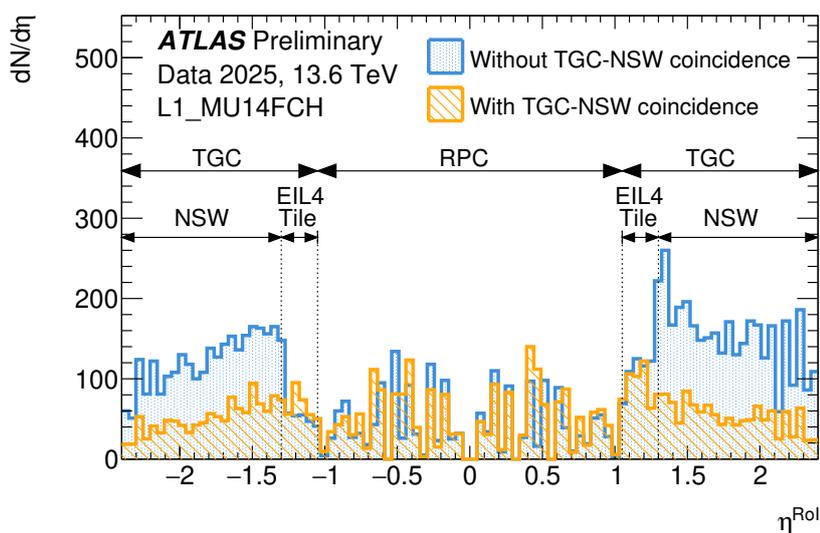


図 2.20: 初段ミュオントリガーにおける Inner Coincidence によるトリガーレート削減の効果 [37]。初段ミュオントリガーのトリガー発行数の η 分布を示している。 $1.3 < |\eta| < 2.4$ のエンドキャップ領域において、内層ミュオンスペクトロメータである NSW とのコインシデンスを追加することで、背景事象起源のトリガーレートが有意に削減されている。

2.3. 高輝度 LHC-ATLAS 実験におけるトリガーシステム

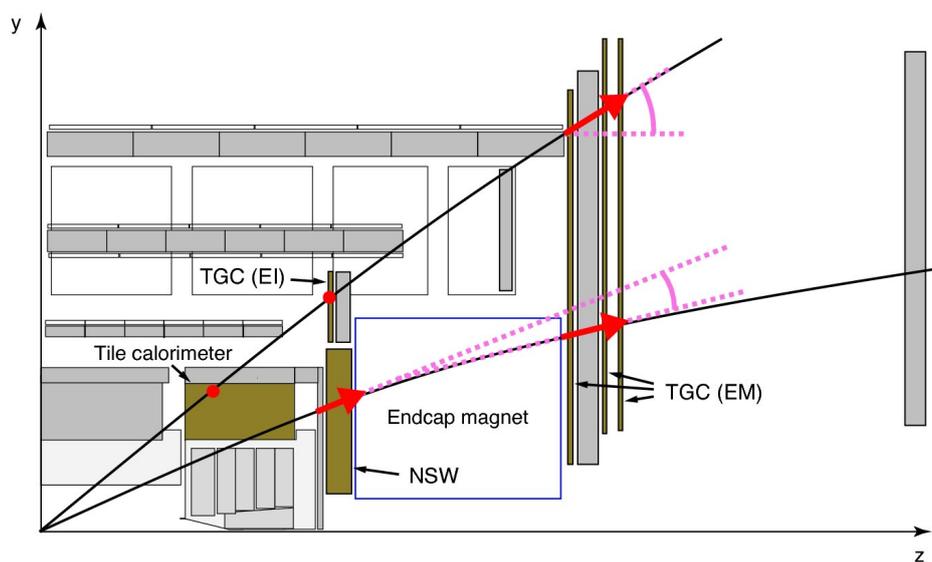


図 2.21: 高輝度 LHC-ATLAS 実験における初段エンドキャップミュオントリガーの Inner Coincidence の概念図 [21]。TGC 検出器により再構成されたミュオン候補は、領域により EIL4、Tile カロリメータ、NSW 検出器とコインシデンスをとる。本図は large sector を示したもので、small sector では EIL4 が RPC BIS78 検出器に置き換えられる。

第3章

初段エンドキャップミュオントリガーにおけるトリガーロジック

高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けて初段エンドキャップミュオントリガーは刷新される。トリガーロジックは、Endcap Sector Logic (SL) 上の FPGA にデジタル回路として実装される。本章では、SL に実装されるトリガーロジックについて説明し、その後、残された課題について取り上げ、本研究の目的について述べる。

3.1 エンドキャップセクターロジックの役割と構成

高輝度 LHC-ATLAS 実験の初段エンドキャップミュオントリガーでは、図 3.1 に示すように TGC BW (BW) を ϕ 方向に 24 分割し、その 1 区画 (1/24 セクター) を処理単位としている。1/24 セクターは TGC BW の幾何学的構造に基づき、エンドキャップセクター 2 つ (Endcap phi0 および Endcap phi1) とフォワードセクター 1 つ (Forward) から構成されており、各 1/24 セクターは 1 台の SL によって処理される。SL は PS board からヒット信号を受信し、トリガーロジックを通じてミュオン候補を再構成、選別を行い、1 台の SL あたり最大 6 個のミュオン候補を後段の MUCTPI へ送る。

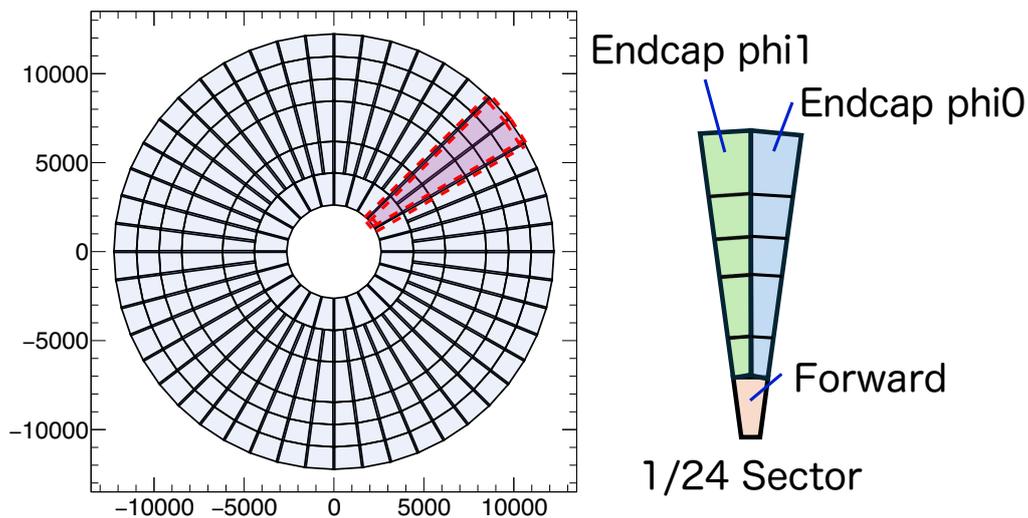


図 3.1: TGC BW における 1/24 セクターの概念図。1 台の SL は TGC BW を ϕ 方向に 24 分割した 1/24 セクターを処理する。この 1/24 セクターはエンドキャップセクター 2 つとフォワードセクター 1 つから構成される。

3.2. トリガーロジックの流れ

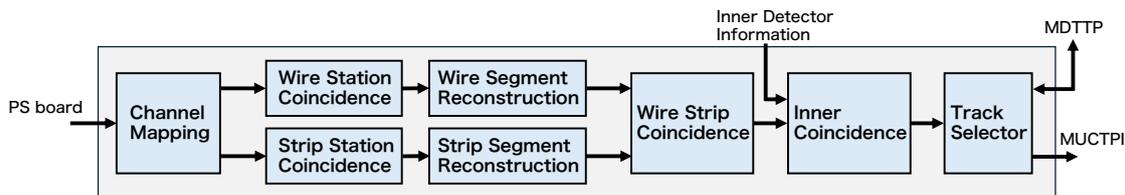


図 3.2: トリガーロジックの全体像。Channel Mapping、Station Coincidence、Segment Reconstruction、Wire-Strip Coincidence、Inner Coincidence、Track Selector という 6 段のトリガーモジュールから構成される。

3.2 トリガーロジックの流れ

SL の FPGA に実装されるトリガーロジックの流れを図 3.2 に示す。Channel Mapping、Station Coincidence、Segment Reconstruction、Wire-Strip Coincidence、Inner Coincidence、Track Selector の 6 段のトリガーモジュールから構成されており、すべてのトリガーモジュールは 160 MHz クロックに同期して動作する。

TGC BW の全ヒットチャンネルを受信しワイヤおよびストリップを独立に処理しつつ、段階的なコインシデンス判定によってミュオン候補を絞り込む構成となっている。SL が受信した TGC BW のヒット情報はまず Channel Mapping に入力され、後段のトリガーモジュールで扱うために適した形式へ変換される。変換後のデータはワイヤおよびストリップごとに信号が分岐し、それぞれにおいて Station Coincidence によるステーション間の情報を統合し、チャンネルが重なり合う領域を決定する。続いて、決定した領域をもとに Segment Reconstruction によってミュオン候補の飛跡情報の再構成を行う。再構成されたワイヤおよびストリップの飛跡は Wire-Strip Coincidence において対応付けが行われ、ミュオン候補の p_T 閾値の算出と座標の出力を行う。さらに Inner Coincidence では、トロイド磁場内部のミュオンスペクトロメータの情報を用いて陽子衝突点に由来しない背景事象由来と考えられるミュオン候補を除去する。最後に Track Selector によって、複数のミュオン候補の中からより高い p_T 閾値を持つミュオン候補を選定し、後段へ送信するミュオン候補を決定する。

以下では、それぞれのトリガーモジュールの処理について概説する。

3.2.1 Channel Mapping

Channel Mapping は、SL の FPGA に実装されるトリガーロジックの最前段のモジュールである。本モジュールは、PS board から送られてくるヒット情報を、後段で飛跡再構成を行うトリガーモジュールで扱いやすい形式に変換する。加えて、TGC BW の幾何構造やミュオンの軌跡特性を考慮したチャンネルの整理を行う。TGC BW は η 方向に分割された複数のチェンバーから構成されており、M1 ステーションは 4 つ、M2 と M3 ステーションは 5 つのチェンバーから成る。チェンバーは、ステーション内で不感領域が生じないようにオーバーラップをもって配置されている。このため、一部のワイヤチャンネルはチェンバー間で幾何学的に重複しており、同一の η 位置を指すチャンネルが存在する。これに対応するため、重複を持つワイヤチャンネルに対しては OR 処理を行い同一チャンネルとして扱う。一方で、ストリップチャンネルでは、ミュオンの軌跡を考慮した処理を行う。ミュオンは磁場によって主に η 方向へ曲がるため、異なるステーション間でヒットの η 座標が

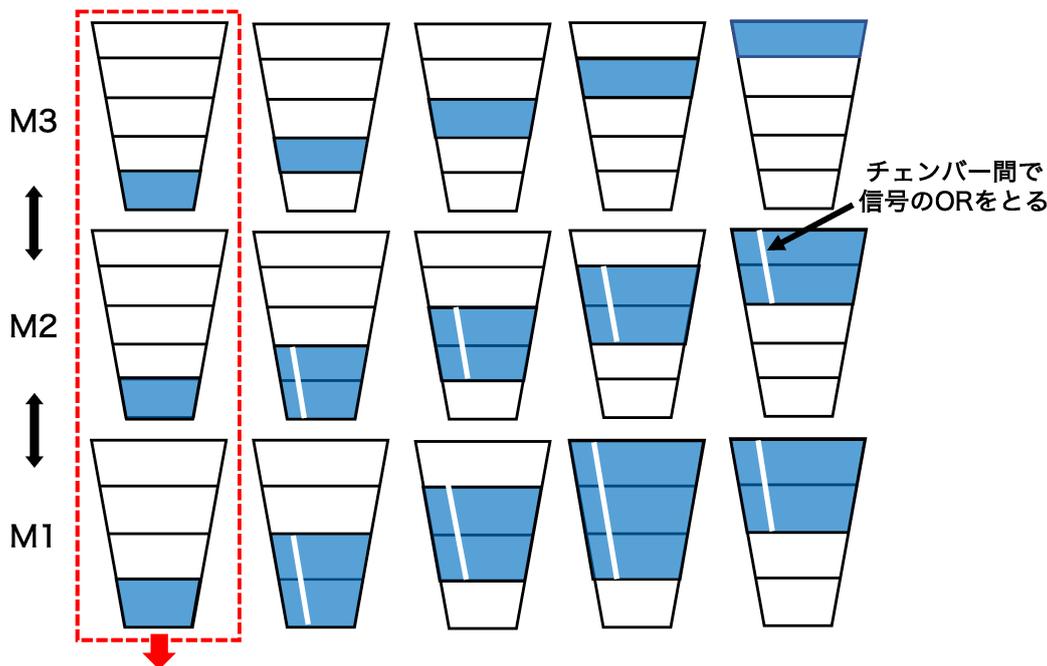


図 3.3: ストリップチャンネルにおける OR 処理の取り方 [38]。M3 のそれぞれのチェンバーに対してステーション間でコインシデンスを取る際、M1, M2 ではより広い範囲のチェンバーの情報を参照できるように OR を取った情報を後段に流す。

ずれている可能性がある。そのため、後段モジュールにおけるステーション間でのコインシデンス処理を考慮して、図 3.3 に示すように M1 と M2 において隣接するチェンバーで同一 ϕ 座標のチャンネルについて OR 処理を行う。

3.2.2 Station Coincidence

Station Coincidence は、ステーション内の二層または三層のレイヤー間におけるコインシデンス判定を行い、代表点を選出するモジュールである。ワイヤー、ストリップの Station Coincidence は、それぞれ独立したモジュールで行われる。図 3.4 のように TGC BW における ワイヤーおよびストリップのチャンネルは、ステーション内でそれぞれ η 、 ϕ 方向にずらして配置されており、これをスタガリング構造と呼ぶ。チャンネルが重なり合う領域を代表点と定義し、これを各ステーションのヒット点として出力することで、位置分解能を向上させつつデータ量を削減することが可能となる。詳細については、先行研究 [40] を参照されたい。

3.2.3 Segment Reconstruction

Segment Reconstruction では、Station Coincidence で得られた各ステーションの代表点を組み合わせ、飛跡のなす角度 $\Delta\theta$ または $\Delta\phi$ を決定する。図 3.5 に示すように、ワイヤーでは $\Delta\theta$ 、ストリップでは $\Delta\phi$ を再構成する。ワイヤー、ストリップの Segment Reconstruction は、それぞれ独立したモジュールで行われる。本モジュールでは、代表点の組み合わせに対してあらかじめ計算した角度パターンに対応表 (Look Up Table: LUT) を保持しておき、複雑な計算を省略して高速に角度情報を出

3.2. トリガーロジックの流れ

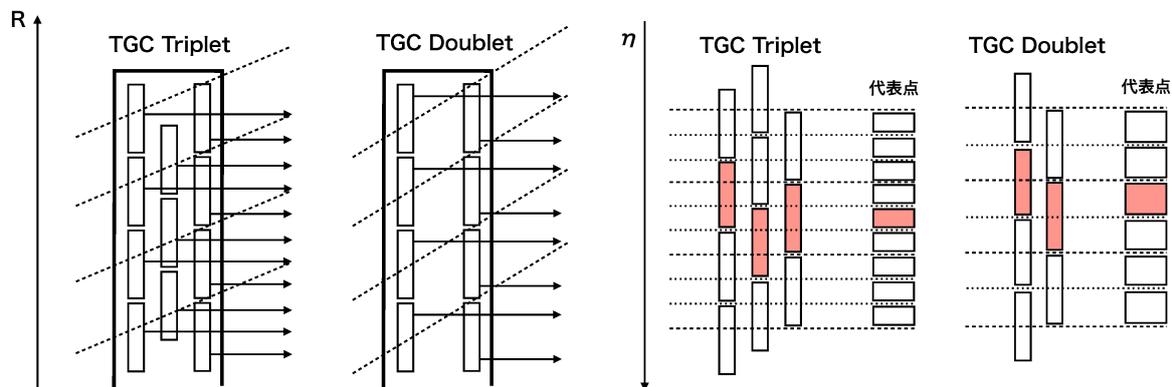


図 3.4: スタッガリング構造 [39]。ワイヤーにおけるものを示している。各レイヤーにおけるチャンネルの重複領域を代表点として定義する。二層または三層でコインシデンスをとり、決定した代表点を後段に送る。

表 3.1: Wire-Segment Reconstruction におけるデータフォーマット [41]。

# of bits	Name
2	Number of the layers with the hits used for coincidence
8	Angle difference $\Delta\theta$ between the segment and the vector from Interaction Point
10	Global η position of the segment at M3 station

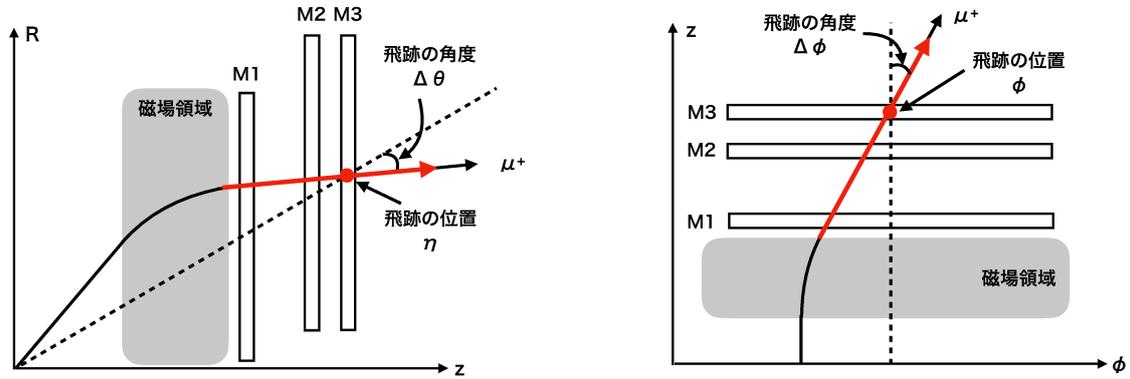
力できるようにしている。この手法はパターンマッチングと呼ばれる。本モジュールでの出力は、ワイヤー、ストリップごとに定義された領域で最大 1 候補のみを返す。複数の候補が存在する場合は、ヒットレイヤー数が最も多いものを選択する。

Wire-Segment Reconstruction では、 $1/24$ セクター内を Unit、Subunit という単位に分割し、それぞれで処理を行う。1 つの Unit は M1 ステーションの代表点 96 個、M2 ステーションの代表点 32 個、M3 ステーションの代表点 16 個をカバーすることで、Endcap ϕ_0 、Endcap ϕ_1 、Forward トリガーセクターはそれぞれ 37、37、16 分割される。さらに、各 Unit を 4 等分するように Subunit が定義されており、各 Subunit ごとに角度パターンを保存した LUT が用意されている。1 つの Subunit からは最大 1 個のミュオン候補が出力され、SL あたり最大 360 個のミュオン候補が生成される。

Strip-Segment Reconstruction も $1/24$ セクター内を Unit、Subunit という単位に分割し、それぞれで処理を行う。1 つの Unit は M1 ステーションの代表点 40 個、M2 ステーションの代表点 24 個、M3 ステーションの代表点 16 個をカバーする。チェンバーごとにそれぞれ Unit が存在し、1 枚のチェンバーには 4 つの Unit が定義される。このため、Endcap ϕ_0 、Endcap ϕ_1 、Forward トリガーセクターにはそれぞれ 20、20、4 つの Unit が存在する。Strip-Segment Reconstruction では Unit を 2 等分するように Subunit が定義されており、各 Subunit ごとに角度パターンを保存した LUT が用意されている。Strip-Segment Reconstruction では 1 つの Unit からは最大 1 個のミュオン候補が出力され、SL あたり最大 44 個のミュオン候補が生成される。

Wire-Segment Reconstruction のデータフォーマットを表 3.1 に、Strip-Segment Reconstruction のデータフォーマットを表 3.2 に示す。

3.2. トリガーロジックの流れ



(a) ワイヤにおけるパターンマッチングの概略図。ワイヤの代表点を組み合わせて $\Delta\theta$ を決定する。

(b) ストリップにおけるパターンマッチングの概略図。ストリップの代表点を組み合わせて $\Delta\phi$ を決定する。

図 3.5: (a) ワイヤと (b) ストリップにおけるパターンマッチングの概略図 [39]。赤い線はパターンマッチングアルゴリズムによって再構成される飛跡を示す。黒い点線は衝突点と M3 ステーションにおける代表点を結ぶ直線であり、再構成された飛跡との角度差を $\Delta\theta$ および $\Delta\phi$ と定義する。

表 3.2: Strip-Segment Reconstruction におけるデータフォーマット [41]。

# of bits	Name
2	Number of the layers with the hits used for coincidence
6	Local ϕ position in the chamber
9	Angle difference $\Delta\phi$ between the segment and the vector from Interaction Point

3.2.4 Wire-Strip Coincidence

Wire-Strip Coincidence では、Segment Reconstruction によって再構成された $\Delta\theta$ および $\Delta\phi$ を組み合わせ、ミューオン候補の横方向運動量閾値 (p_T 閾値) の判定と、その座標の出力を行う。本モジュールでは、 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\phi$ に対応する p_T 閾値をあらかじめ計算し LUT に保持しておき、これを用いて高速に p_T 判定を実行する。この LUT は Coincidence Window (CW) と呼ばれ、ワイヤの Subunit とストリップの Unit の組み合わせごとに用意されている。概略図を図 3.6 に示す。また、本モジュールでは η 、 ϕ の値を用いてミューオン候補の座標変換 (グローバル座標) も行う。

本モジュールでは、 $1/24$ セクターを Region という単位に分割し、Region ごとに出力するミューオン候補の数を決定する。Region は図 3.7 に示すように、 $|\eta| = 1.3$ の境界で 8-Unit Region と 32-Unit Region に分割される。図 3.8 に示すように 8-Unit Region はワイヤ 2 Subunit とストリップ 4 Unit から構成され、最大 1 つのミューオン候補を出力する。一方、32-Unit Region はワイヤ 8 Subunit とストリップ 4 Unit から構成され、最大 4 つのミューオン候補を出力する。SL 全体あたり最大 180 のミューオン候補が生成される。

Wire-Strip Coincidence のデータフォーマットを表 3.3 に示す。

3.2. トリガーロジックの流れ

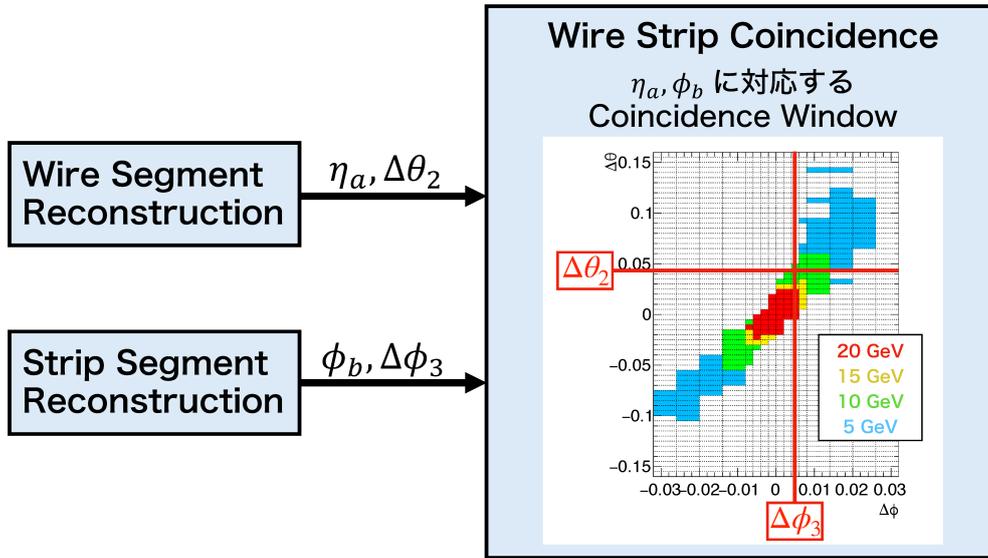


図 3.6: Wire-Strip Coincidence の概略図 ([39] の CW の図をトリミングして使用)。Segment Reconstruction の出力である η, ϕ に対応した Coincidence Window を参照し、 $\Delta\theta$ および $\Delta\phi$ から 横方向運動量閾値 p_T 閾値を判定する。

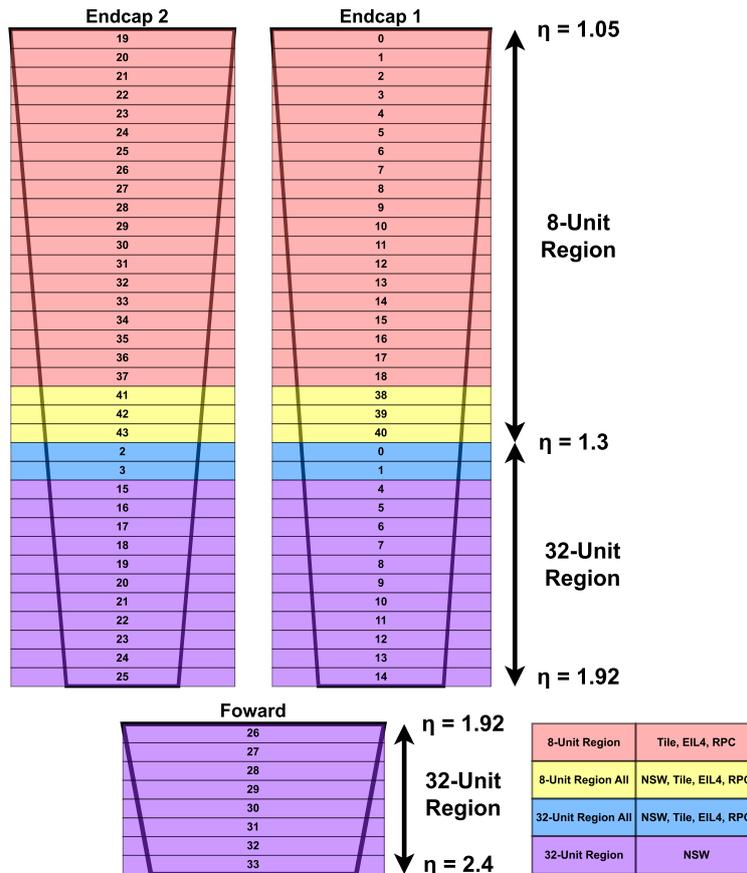


図 3.7: Region の定義 [41]。 $|\eta| = 1.3$ に境界をもち、8-Unit Region と 32-Unit Region に分割される。

3.2. トリガーロジックの流れ

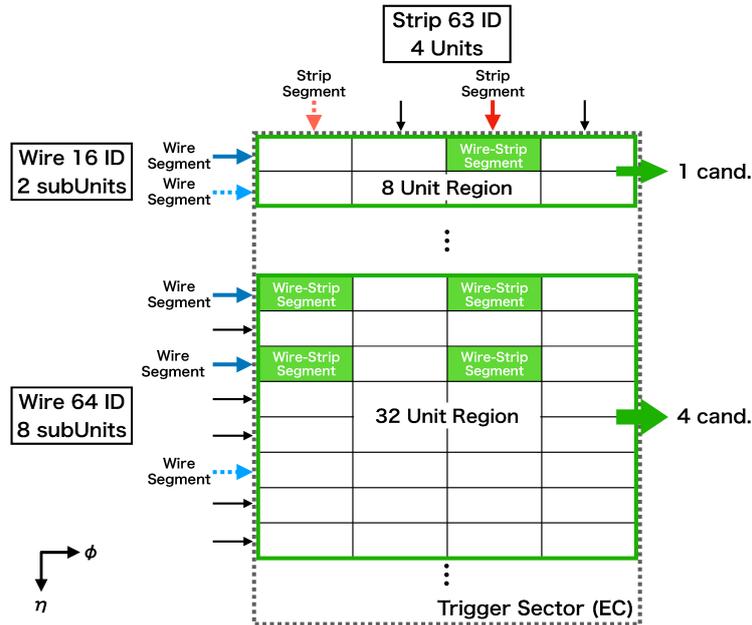


図 3.8: Region ごとのミュオン候補出力の構造 [41]。8-Unit Region は最大 1 個、32-Unit Region は最大 4 個の候補を出力する。

表 3.3: Wire-Strip Coincidence におけるデータフォーマット [41]。Unit position のビット数は 8-Unit Region と 32-Unit Region で異なる。

# of bits	Name
1	Flag of successful reconstruction
4	Minimum p_T threshold satisfied by the Track Candidate
8	Global η position of the wire segment at M3
8	Global ϕ position of the strip segment at M3
7/5	Unit position in the region
7	$\Delta\theta$ of the wire segment used for coincidence
2	Number of the TGC layers with the wire hits used for coincidence
4	$\Delta\phi$ of the strip segment used for coincidence
2	Number of the TGC layers with the strip hits used for coincidence

3.2.5 Inner Coincidence

Inner Coincidence では、トロイド磁場領域内に位置する内層ミュオンスペクトロメータと TGC BW で再構成された飛跡情報とのコインシデンスをとることで、衝突点由来でないミュオン候補を排除する。内層ミュオンスペクトロメータとしては、TGC EIL4、RPC BIS78、Tile カロリメータ、および NSW を使用する。概要を図 3.9 に示す。本モジュールでは、図 3.7 に示すように、Region ごとにコインシデンスをとる内層ミュオンスペクトロメータがあらかじめ決められている。また、Wire-Strip Coincidence と同様に Region ごとにミュオン候補の出力数が異なっており、

3.2. トリガーロジックの流れ

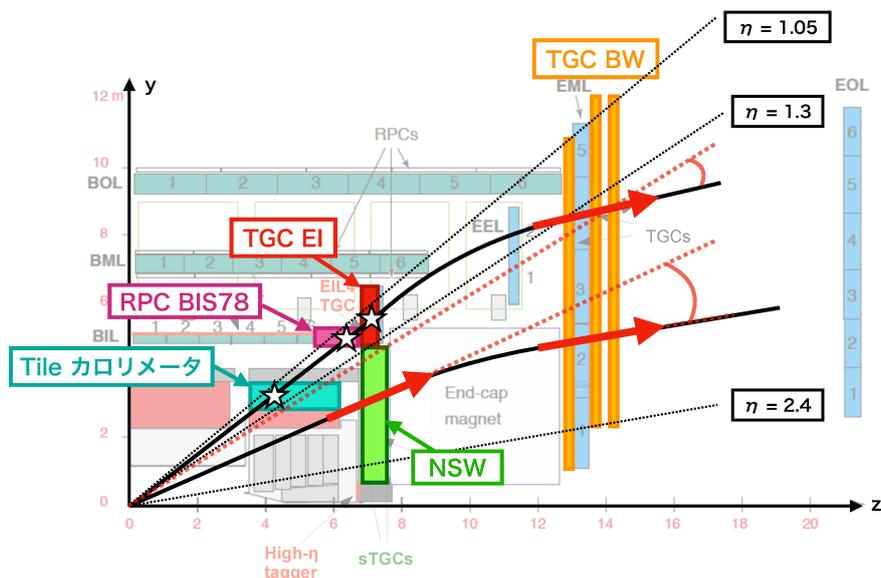


図 3.9: Inner Coincidence の概要図 [39]。内層ミュオンスペクトロメータとのコインシデンスを取ることで、衝突点由来でないミュオン候補を削減する。

8-Unit Region では最大 1 個、32-Unit Region では最大 2 個のミュオン候補を出力を行う。このため、SL あたりミュオン候補の最大出力数は 112 個となる。詳細については、先行研究 [42] を参照されたい。

3.2.6 Track Selector

Track Selector は SL に実装されるトリガーロジックモジュールの最終段に位置し、ミュオン候補の p_T 閾値を比較することで、高い p_T を持つ候補を選択する。本モジュールでは、後段のトリガー処理に送信するため、ミュオン候補を p_T 閾値の大きい順に 6 個選択する。

Track Selector の処理は 6 クロックサイクルで完了する。112 個のミュオン候補から 6 個を選択するために、Batcher の奇偶マージソート [43] を基にしたソーティングアルゴリズムを使用する。このアルゴリズムは並列処理により高速化が可能であり、ハードウェア実装される初段エンドキャップミュオントリガーに適した特性を持つ。Track Selector のブロック図を図 3.10 に示す。本モジュールは、8-key Sorting Network と 16-key Merging Network から構成されており、それぞれのネットワークは図 3.11 に示す構造になっている。図中の横方向の線がワイヤ、縦方向の線がコンパレータを表しており、各コンパレータにおいて 2 個のミュオン候補が比較される。上側に配置されているワイヤほど優先度が高い候補であることを示す。

Track Selector では p_T 閾値が大きいミュオン候補を選別するが、トリガーモジュールに入力されるミュオン候補の中には再構成の失敗などにより無効なミュオン候補が含まれている可能性がある。このような無効なミュオン候補が p_T 閾値の値のみで比較されてしまうと、有効なミュオン候補が選択されず出力されない恐れがある。この問題を避けるため、Track Selector では p_T 閾値 (4 bit) に加えてミュオン候補が有効であることを示す `valid_flag` を最上位ビットとして付加し

3.2. トリガーロジックの流れ

た 5 bit の値 {valid_flag, p_T 閾値} を比較に使用する。

このように構成することで、valid_flag = 0 の無効なミュオン候補は p_T 閾値の値に依らずいかなる有効なミュオン候補よりも低い優先度で扱われる。結果、単純なビット比較のみで有効なミュオン候補の選別を可能としている。

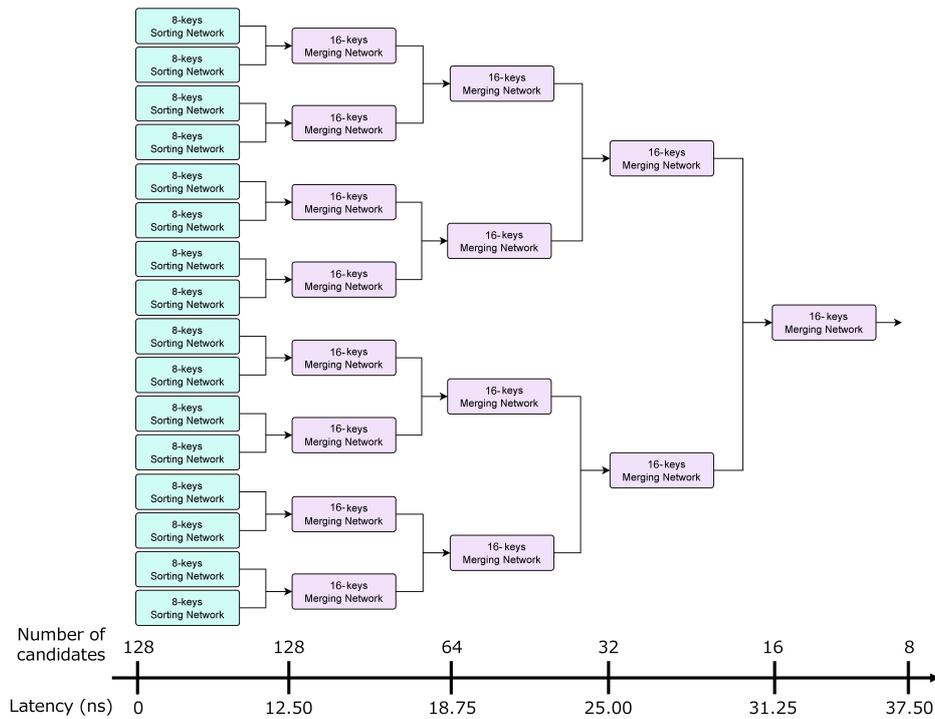


図 3.10: Track Selector のブロック図 ([44] の図を一部編集して使用)。8-key Sorting Network と 16-key Merging Network を用いて、ミュオン候補数を 128 個から 8 個まで段階的に削減する。各ネットワークでは p_T 閾値を比較し、高い p_T を持つ候補が上位に配置される。

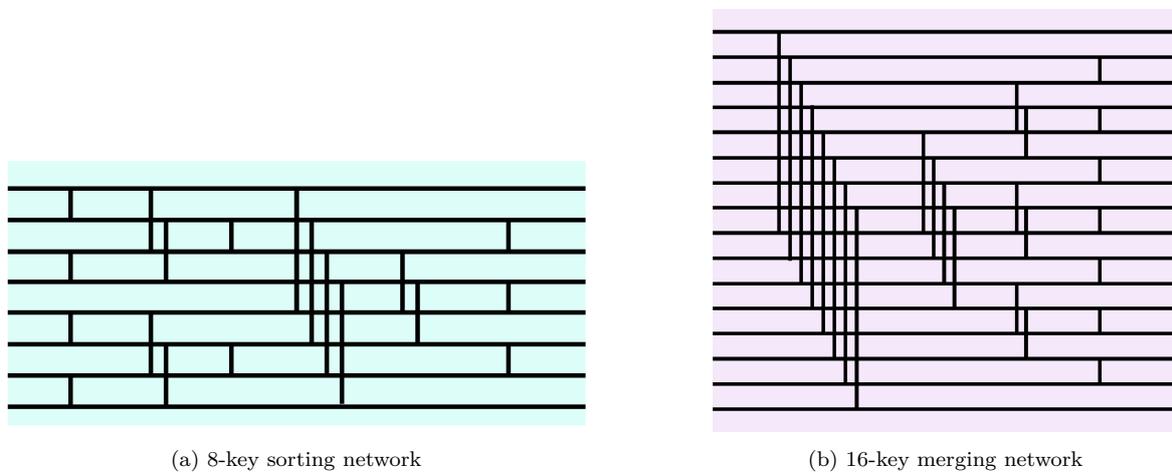


図 3.11: Track Selector で使用されるネットワーク図 [44]。横方向の線はワイヤー、縦方向の線はコンパレータを表す。各ステップで複数のコンパレータが並列に動作する。

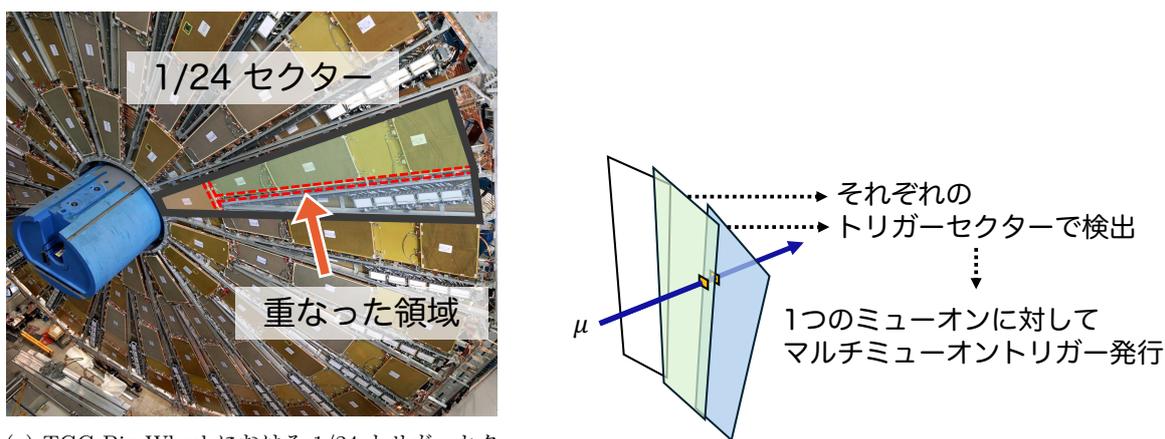
3.3 トリガーロジックの抱える課題と本研究の目的

2025年度現在、高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた初段エンドキャップミュオントリガーのトリガーロジックの開発が進められている。前節までで述べたように、基本的なトリガーロジックはすでに確立されており、現在はより高効率なトリガーを実現するための最適化が進められている。その最適化課題の一つが、本研究で対象とする重複したミュオン候補の除去である。

初段エンドキャップミュオントリガーは TGC BW で取得したヒット情報を基にミュオン候補を再構成する。TGC BW は複数のトリガーセクターから構成されており、検出器の不感領域を排除するために図 3.12 に示すように隣接するトリガーセクター同士が一部重なり合うように配置されている。このような領域をオーバーラップ領域と呼ぶ。ミュオン候補の再構成はトリガーセクター単位で独立に行われるため、1つのミュオンがオーバーラップ領域を通過した場合、同一のミュオンに由来する複数のミュオン候補が生成される可能性がある。本論文では、これらを重複したミュオン候補と定義する。

重複したミュオン候補が存在すると、シングルミュオン事象であってもマルチミュオントリガーが発行される可能性があり、不要なトリガーレートの増加を招く。第 2 章で述べたように、マルチミュオントリガーは生成断面積が比較的小さい物理過程を対象としているため、シングルミュオントリガーと比べて低い p_T 閾値が設定されている。このとき、シングルミュオン事象に由来する重複したミュオン候補が存在すると、マルチミュオントリガーのレートを圧迫し、本来取得すべき物理事象の記録を妨げる可能性がある。

このため、Run 3 までの初段ミュオントリガーでは、オーバーラップ領域に起因する重複したミュオン候補による不要なトリガー発行を抑制するロジックが導入されている [45, 46]。Run 3 までの初段ミュオントリガーにおけるミュオン候補の情報は、ワイヤーとストリップについてコイン



(a) TGC Big Wheel における 1/24 トリガーセクターの配置 ([47] より一部図を編集して使用)。不感領域を補うため、隣接するトリガーセクターは一部が重なり合うように配置されている。

(b) オーバーラップ領域を通過するミュオンの概念図。1本のミュオンが複数のトリガーセクターで独立に検出されることで、同一ミュオンに由来する複数のミュオン候補が生成される。

図 3.12: TGC Big Wheel におけるトリガーセクターの重なり構造と、それに起因する重複したミュオン候補生成の概念図。(a) 不感領域を補うため、隣接するトリガーセクターは一部が重なり合うように配置されている。(b) オーバーラップ領域を通過した 1 本のミュオンが、複数のトリガーセクターで独立に再構成されることで重複したミュオン候補が生成され、マルチミュオントリガーの誤発行を引き起こす可能性がある。

3.3. トリガーロジックの抱える課題と本研究の目的

シデンスが取られた領域単位の候補情報となっている。隣接するトリガーセクター間で空間的に近い領域にミュオン候補が存在する場合、候補自体は無効化せず、マルチミュオントリガーの発行を行わないよう処理することで、トリガーレート増加を抑制する。重複したミュオン候補は後段処理に残存し得る一方で、マルチミュオントリガーの誤発行を抑制することでレート増加を抑えていた。

一方で、高輝度 LHC に向けてトリガーシステムは刷新され、初段ミュオントリガーではトリガー処理単位や利用可能な情報が大きく変更される。特に、SL にはワイヤーとストリップのヒット情報が入力されることから、従来 방식을そのまま適用することはできない。このため、新たな初段エンドキャップミュオントリガーの構成に適した新たな重複対策ロジックが必要となる。

そこで本研究では、この課題に対処するため、重複したミュオン候補を除去するロジック (Overlap Removal) の開発および実装を行う。Run 3 まではミュオン候補は残しつつマルチミュオントリガーのみを抑制する設計であることに対し、本研究によるロジックでは候補そのものを除去する設計を採用する。同一ミュオンに由来すると判断される複数の候補が存在する場合、1つのみを保持し、それ以外を無効化する。これにより、重複したミュオン候補に起因する不要なマルチミュオントリガー発行を抑制しつつ、物理感度の維持を目指す。また、重複候補そのものを無効化のために、後段処理における冗長な再構成の抑制も期待できる。

第 4 章から第 6 章では、Overlap Removal のアルゴリズム設計、FPGA 実装、ならびに性能評価について述べる。

第4章

重複したミュオン候補除去アルゴリズムの開発

第3章で述べたように、現状のトリガーロジックでは同一のミュオンに対して重複してミュオン候補を再構成し、マルチミュオントリガーを不要に発行してしまう可能性がある。そのため、本研究では重複したミュオン候補を検出し除去するロジックである Overlap Removal の開発および実装を行った。本章では、重複したミュオン候補に特徴的な物理量の傾向を調査し、その結果を基に Overlap Removal の設計に用いる判定量およびアルゴリズムを定める。

4.1 重複したミュオン候補の除去アルゴリズムに課される制約と設計方針

Overlap Removal のアルゴリズムを設計するにあたり、まず初段エンドキャップミュオントリガーにおける制約条件を整理する。

Sector Logic (SL) では、1/24 セクター内に含まれる複数のトリガーセクターにおいてミュオン候補が独立に再構成され、その後に情報が統合される。この際、各ミュオン候補がどのトリガーセクターで再構成されたものであるかという情報は保持されない。したがって、重複したミュオン候補の判定は、再構成後に得られるミュオン候補の情報のみに基づいて行う必要がある。また、TGC BW におけるトリガーセクターの配置について、その幾何学的な重なり幅や感度の重なり方は一様ではなく、設計値から直ちに重複したミュオン候補が生成される領域（オーバーラップ領域）を定義することは困難である。

一方で、重複したミュオン候補を除去するアルゴリズムでは、実際に空間的に近接して飛来した複数のミュオン事象と重複したミュオン候補とを区別できることが必要である。本来取得すべきトリガー事象はそのまま取得し、重複したミュオン候補によるものだけを排除することが求められる。

これらの制約および要求を踏まえてアルゴリズム開発を行う必要がある。特に、どの物理量が同一ミュオン由来であることを最もよく反映するかは自明ではない。そこで本研究では、シミュレーションを用いて生成されたミュオン候補を解析し、重複したミュオン候補に特有の傾向が現れる物理量を調べる方針を採用した。ミュオン候補間の η 座標の差 $\Delta\eta^{\text{TC}}$ 、 ϕ 座標の差 $\Delta\phi^{\text{TC}}$ 、および横方向運動量閾値に関する情報に注目し、これらが重複判定に有効であるかを検証した。

図 4.1 に M3 ステーションについて設計値を基に概算した 1/24 セクター内におけるワイヤおよびストリップチャンネルの重なっている様子の模式図を示す。ミュオン候補の座標は複数チャンネルの情報を組み合わせた代表点として定義されるため、図 4.1 からオーバーラップ領域および重複判定条件を直接議論することはできない。しかし、複数のワイヤおよびストリップチャンネルが幾何学的に重なって配置されており、同一ミュオンに由来して重複したミュオン候補が生成され得る構造であることが分かる。

4.2. 重複したミュオン候補の判定基準

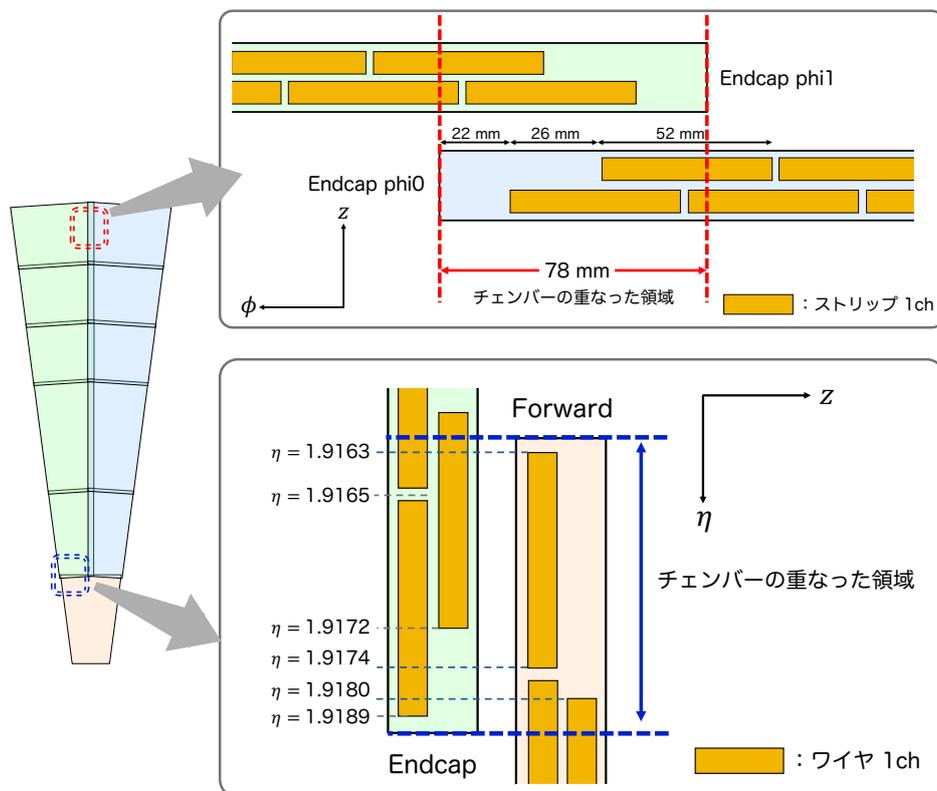


図 4.1: 設計値に基づいて概算した 1/24 セクター内のチャンネルの重なるの模式図。M3 ステーションについて計算したものである。Endcap-Endcap 領域および Endcap-Forward 領域の各領域において重なっていることが確認できる。ミュオン候補の座標は複数のチャンネルを組み合わせることで代表点を定義して決定するため、本図からどの領域に入射した際に重複したミュオン候補が生成されるのか判断することはできない。しかし、複数チャンネルが同時に応答し得る構造であり、重複したミュオン候補が生成され得ることが分かる。

また、図 4.2 に示すように 1/24 セクター内のオーバーラップ領域や重複判定条件は Endcap-Endcap 領域と Endcap-Forward 領域の 2 種類に区別し決定する。これらの領域は幾何学的条件が異なることから、区別して扱う。

さらに、本アルゴリズムは最終的に初段エンドキャップミュオントリガーファームウェアとしてハードウェア実装されることから、判定基準は離散的なビット表現として定義される必要があり、複雑な演算を用いることは適切ではない。そこで、まず重複したミュオン候補の傾向を実数表現により評価し、その結果を基に判定基準をファームウェアのためのビット演算に落とし込むプロセスを踏んだ。

次節では、これら制約のもとで決定した重複したミュオン候補の判定基準について説明する。

4.2 重複したミュオン候補の判定基準

4.2.1 解析の条件

重複したミュオン候補の判定基準を定義するにあたり、物理量の傾向を把握することを目的としてシミュレーションを用いて解析を行った。トリガーロジックのシミュレーション環境には、ソフト

4.2. 重複したミュオン候補の判定基準

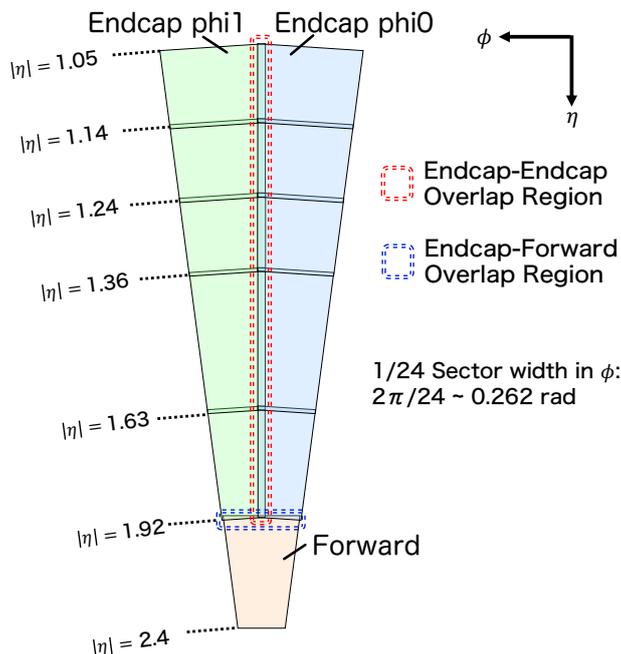


図 4.2: 1/24 セクターのオーバーラップ領域とその種類。エンドキャップセクター同士の重なり (Endcap-Endcap Overlap Region) とエンドキャップセクターとフォワードセクターの重なり (Endcap-Forward Overlap Region と表記) の 2 種類に区別して扱う。

ウェアシミュレータと呼ばれるシミュレータを使用した。このシミュレータは、C++ で記述されたプログラムであり、初段エンドキャップミュオントリガーのトリガーロジックの開発にあたり先行して作成されたシミュレータである。演算はデジタル値でなく実数で行うため、そのロジックの理想性を示すものとなる。

使用したイベントサンプルの条件を以下に示す。

- 生成粒子：シングルミュオン
- パイルアップなし
- $1 \text{ GeV} < p_T < 100 \text{ GeV}$ 一様分布
- $1.05 < |\eta| < 2.4$ 一様分布 (エンドキャップ領域)

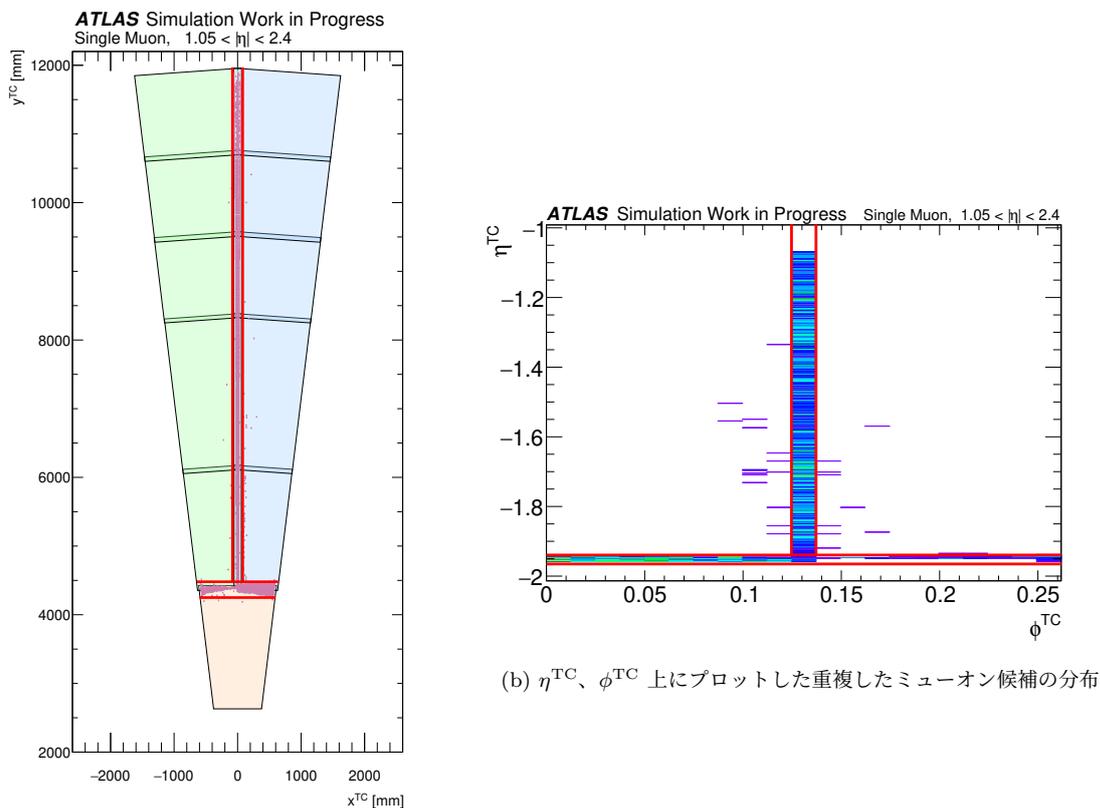
使用するサンプルはシングルミュオンであることから、同一イベント内において隣り合うトリガーセクターで複数のミュオン候補が再構成されている場合、それらを重複したミュオン候補であると判断した。

また、 p_T 閾値について、将来仕様では 16 段階に細分化される設計であるのに対し、現在のソフトウェアシミュレータでは 4 段階で実装されている。さらに、本解析で用いるシミュレーション環境における検出器配置および磁場条件は、高輝度化環境における実際の運転環境と完全には一致しない。以上の理由から、本章で観測される p_T 閾値の近接性は本解析条件に依存した結果として扱い、将来仕様で同様の挙動が得られる保証はないものとする。

4.2.2 オーバーラップ領域の同定

Overlap Removal の判定ロジックを決定するにあたり、重複したミュオン候補が生成される領域としてオーバーラップ領域を定義する必要がある。本ロジックのアルゴリズムは、近接して飛来した複数のミュオン事象を誤判定することを抑制するため、重複したミュオン候補が発生する可能性のある領域に限定して適用する。

重複したミュオン候補を 1/24 セクター上にプロットしその空間分布を確認することで、オーバーラップ領域を同定した。結果を図 4.3 に示す。この分布から、重複したミュオン候補は主としてトリガーセクターの重なり部分に集中して生成されることが分かる。この結果に基づき、決定した Endcap-Endcap 領域および Endcap-Forward 領域に対応するオーバーラップ領域を図中赤線で囲んで示している。以降の解析およびアルゴリズム設計では、ここで定義した領域をオーバーラップ領域として扱う。



(a) 1/24 セクター上にプロットした重複したミュオン候補の分布

図 4.3: 1/24 セクター単位でみた重複したミュオン候補の分布。トリガーセクターの重なっている領域と一致していることが確認できる。ここから、重複したミュオン候補が集中する領域をオーバーラップ領域として定義する。オーバーラップ領域は赤線で囲んで示している。

4.2. 重複したミュオン候補の判定基準

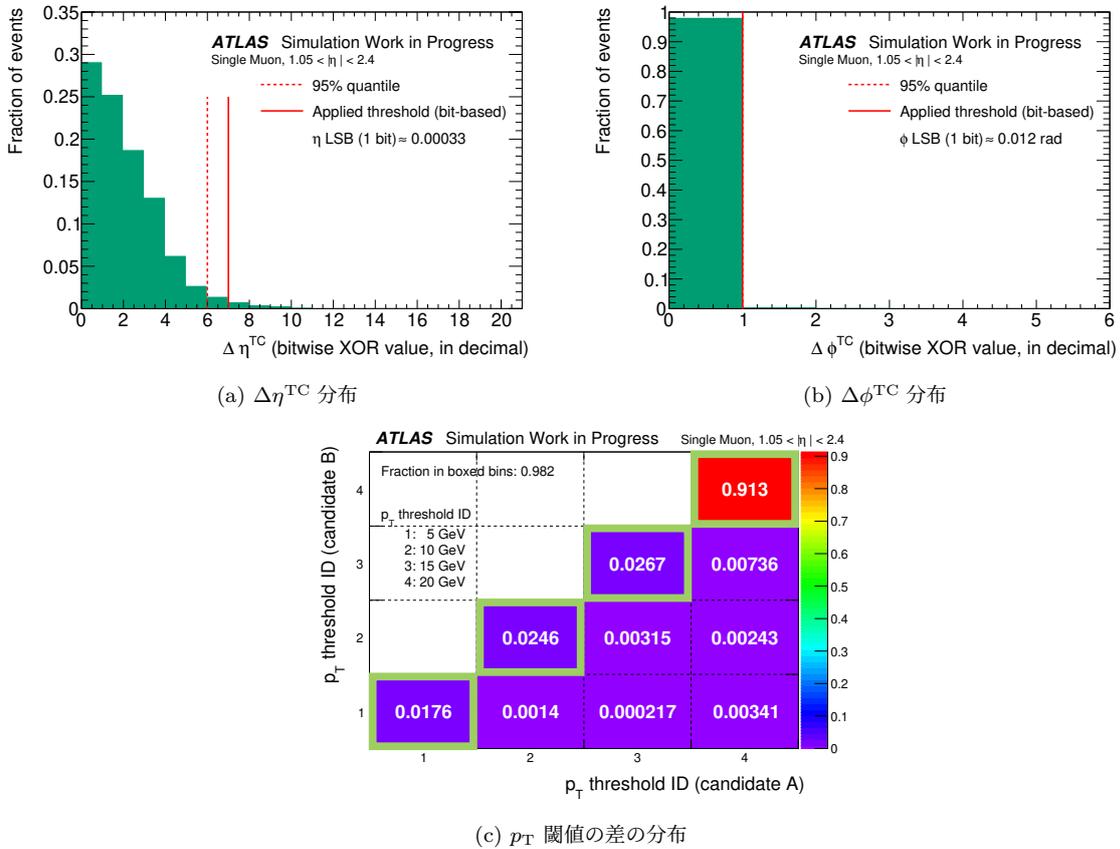


図 4.4: Endcap–Endcap 領域における重複したミュオン候補の $\Delta\eta^{\text{TC}}$ と $\Delta\phi^{\text{TC}}$ 、 p_{T} 閾値の差の分布。(a) と (b) において、赤の点線は全イベントの 95 % を示し、赤の実線はファームウェア実装で実際に設定する判定閾値を示している。(c) では、2つのミュオン候補が同一の p_{T} 閾値を持つ場合を緑の枠線で示しており、本研究ではこれらの条件を重複判定の基準として採用する。

4.2.3 重複したミュオン候補にみられる特徴

続いて、各オーバーラップ領域において生成される重複したミュオン候補に対し、候補間の物理量の差にどのような特徴的傾向が現れるかを解析した。解析は当初実数表現で行ったが、本章ではファームウェア実装を見据えて行ったビット表現で得られた結果のみを示す。実数表現による分布は付録 A に示す。ビット表現で算出した Endcap–Endcap 領域 Endcap–Forward 領域についての結果をそれぞれ、図 4.4、図 4.5 に示す。 η または ϕ 方向への大きな依存がない場合はその領域全体での分布をまとめて 1 次元ヒストグラムで示している。また、 $\Delta\eta^{\text{TC}}$ 、 $\Delta\phi^{\text{TC}}$ それぞれについて、そのずれの大きさを実際のビットで表現したときにどの程度のビットのずれとして表現されるかを示している。 p_{T} 閾値については、4 段階の閾値のうちより p_{T} 閾値が大きいミュオン候補を横軸に示している。

まず、Endcap–Endcap 領域における結果として、 $\Delta\eta^{\text{TC}}$ および $\Delta\phi^{\text{TC}}$ はいずれも非常に近接した値でトリガー判定されていることが確認された。また、 p_{T} 閾値については、本解析条件において同一の値を取るイベントが多数を占める傾向が見られた。

続いて、Endcap–Forward 領域においても $\Delta\phi^{\text{TC}}$ は近接してトリガー判定されており、 p_{T} 閾値につ

4.2. 重複したミュオン候補の判定基準

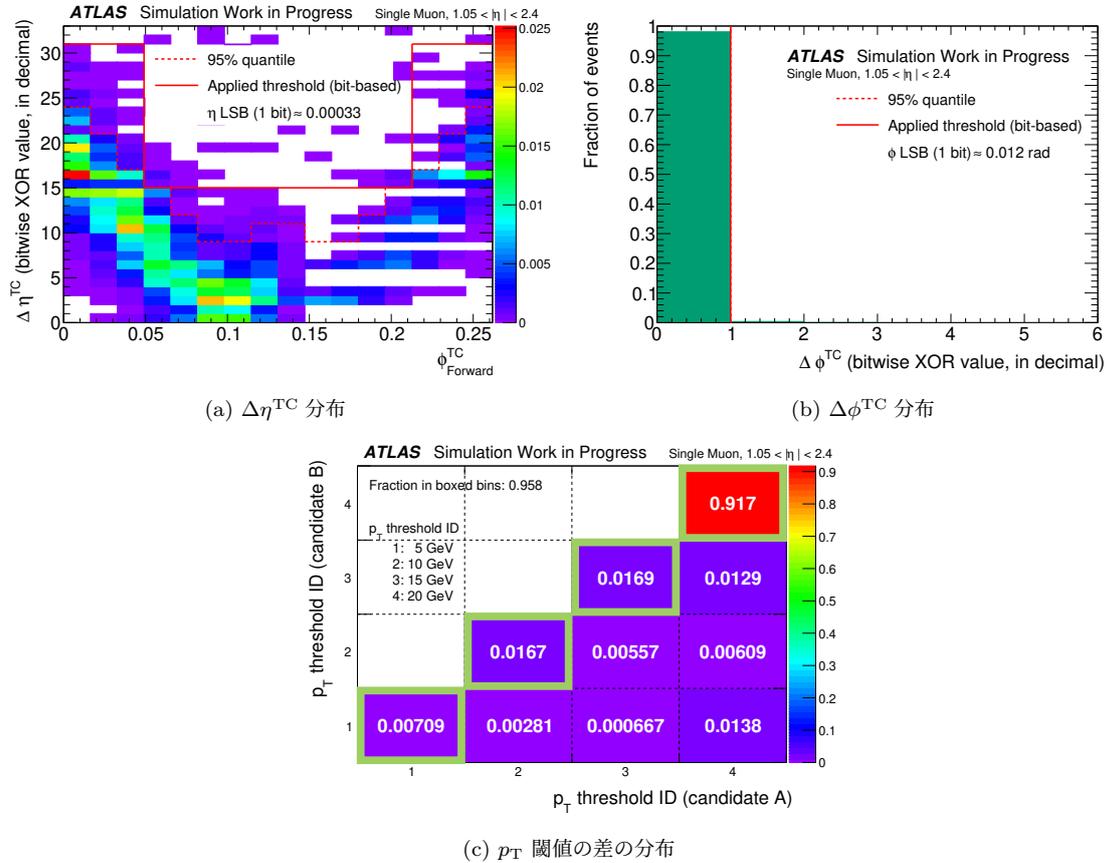


図 4.5: Endcap–Forward 領域における重複したミュオン候補の $\Delta\eta^{\text{TC}}$ と $\Delta\phi^{\text{TC}}$ 、 p_{T} 閾値の差の分布。(a) と (b) において、赤の点線は全イベントの 95 % を示し、赤の実線はファームウェア実装で実際に設定する判定閾値を示している。(c) では、2つのミュオン候補が同一の p_{T} 閾値を持つ場合を緑の枠線で示しており、本研究ではこれらの条件を重複判定の基準として採用する。

いは Endcap–Endcap 領域と同様に同一の値を取るイベントが多数を占める傾向が確認された。一方で、 $\Delta\eta^{\text{TC}}$ は特徴的な分布を示しており、1/24 セクターの中央付近では近い位置でトリガー判定されるのに対し、外側に向かうにつれてその差が大きくなる傾向が見られた。これは、 ϕ 方向に依存してトリガーセクターの重なり具合が異なることに起因するものである。また、この際に2つのエンドキャップセクター間でイベント数に差が生じているが、これは検出器の幾何構造に起因するものである。幾何構造の詳細については付録 B を参照されたい。

以上の結果から、重複したミュオン候補は、 $\Delta\eta^{\text{TC}}$ 、 $\Delta\phi^{\text{TC}}$ 、および p_{T} 閾値において飛跡情報が互いに近接していることが分かった。そこで、これらの物理量の近接度に閾値を設けることで、重複したミュオン候補を判定する方針とした。

本判定ロジックは初段エンドキャップミュオントリガーにファームウェアとして実装する必要があるため、閾値はビット表現で定義する。それぞれの物理量に対して、以下の条件を採用する。

- $\Delta\eta^{\text{TC}}$: 全イベントの 95 % を含む範囲
- $\Delta\phi^{\text{TC}}$: 全イベントの 95 % を含む範囲

4.2. 重複したミュオン候補の判定基準

14 bit 表現における上位 11 bit の一致を要求



図 4.6: 上位ビットで一致を判定する基準の概念図。14 bit で表現された物理量に対し、上位 11 bit の一致を判定に要求する場合を例に示している。緑の括弧で示した上位 11 bit が一致している場合、赤色で示した下位ビットが異なっても一致と判定される。

- p_T 閾値: 同一の値を取る場合、もしくは p_T 閾値に関する条件を課さない

p_T 閾値については可変な条件として設定し、第 6 章における性能評価では、 p_T 閾値を重複判定条件に含める場合と含めない場合の両方について評価を行う。

各物理量について上記の条件をすべて満たした場合に、重複したミュオン候補であると判定する。これらの閾値は、図 4.4 および図 4.5 において赤の点線で示している。

4.2.4 判定基準のビット表現への落とし込み

重複したミュオン候補の判定基準をファームウェア上に実装するため、連続量として定義された物理量を離散的なビット表現に基づいて再定義する必要がある。本研究では、各物理量が n ビットで表現されるとき、 $\Delta\eta^{\text{TC}}$ および $\Delta\phi^{\text{TC}}$ についてはその上位 m ビットが一致している場合に当該物理量が一致していると判定する。具体的な判定方法の概念図を図 4.6 に示す。

一致を要求するビット数 m は、前節で示した重複したミュオン候補の分布に基づいて決定した。Endcap–Endcap 領域および Endcap–Forward 領域における各物理量の判定条件を表 4.1 にまとめる。また、このときに設定される判定閾値は、図 4.4 および図 4.5 の $\Delta\eta^{\text{TC}}$ 、 $\Delta\phi^{\text{TC}}$ において赤の実線で示している。なお、Endcap–Forward 領域における $\Delta\eta$ の判定については、ファームウェア実装時における ϕ のビット数の制約から、1/24 セクター 3 つ分に相当するオクタント単位で閾値を定義する。ここで用いる閾値を図 4.7 の赤の実線で示している。詳細は第 5 章にて説明する。

これらの判定基準は、物理量をビット列として表現した際の上位ビットの一致条件として記述できるため、後段のファームウェア実装においては単純なビット演算に基づく判定が可能である。具体的な論理回路および FPGA 実装については第 5 章で詳述する。

4.2.5 設計アルゴリズムの基本検証

本節では、前節で定義した重複したミュオン候補の判定基準が、特定のトリガーセクターや位置に依存せずに機能するかを確認するため、基本的な検証を行った。本検証の目的は性能評価ではなく、設計した判定基準がトリガーセクターや位置に依存せず、空間的に一貫した挙動を示すかを確認する

4.2. 重複したミュオン候補の判定基準

表 4.1: 重複したミュオン候補の判定基準。それぞれのオーバーラップ領域において、 $\Delta\eta^{\text{TC}}$ 、 $\Delta\phi^{\text{TC}}$ 、 p_{T} 閾値の全てが条件を満たしたときに重複していると判定する。

領域	物理量	判定条件	備考
Endcap-Endcap	$\Delta\eta^{\text{TC}}$	14 bit 中 上位 11 bit 一致	$\Delta\eta^{\text{TC}} \approx 0.003$ 無視
	$\Delta\phi^{\text{TC}}$	9 bit 中 上位 8 bit 一致	$\Delta\phi^{\text{TC}} \approx 0.012$ 無視
	p_{T} 閾値	完全一致 / 要求しない	
Endcap-Forward	$\Delta\eta^{\text{TC}}$	14 bit 中 上位 10 / 9 bit 一致	$\Delta\eta^{\text{TC}} \approx 0.005 / 0.01$ 無視 オクタント単位で決定
	$\Delta\phi^{\text{TC}}$	9 bit 中 上位 8 bit 一致	$\Delta\phi^{\text{TC}} \approx 0.012$ 無視
	p_{T} 閾値	完全一致 / 要求しない	

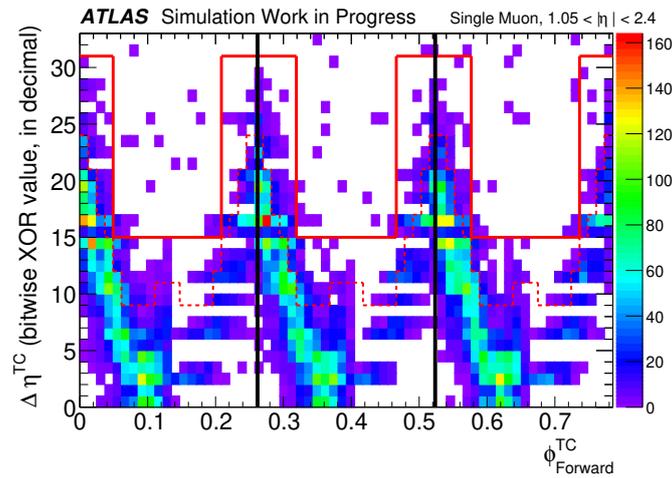
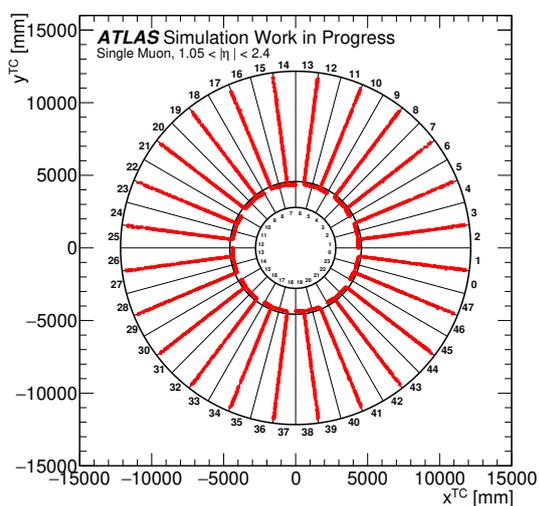


図 4.7: Endcap-Forward 領域における $\Delta\eta^{\text{TC}}$ の重複判定閾値。赤の点線は全イベントの 95 % を示し、赤の実線はファームウェア実装で実際に設定する判定閾値を示している。 ϕ 方向の周期性を考慮し、 $1/24$ セクターを 3 つ分合わせたオクタント単位にした上で閾値を設定している。

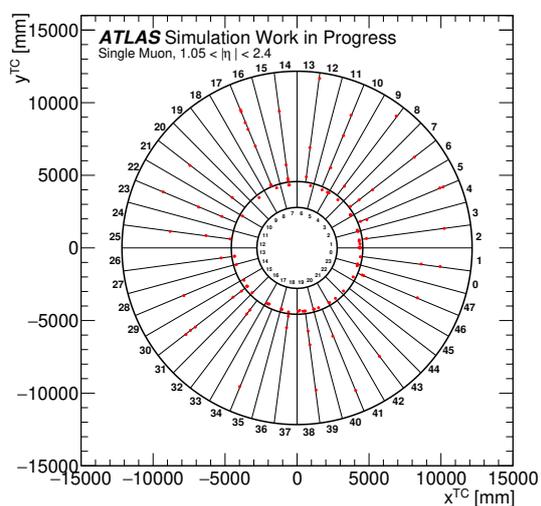
ことである。

具体的には、表 4.1 の閾値を適用し、TGC BW 上に重複したミュオン候補をプロットすることで、 $1/24$ セクターごとに顕著な偏りなどが無いのかを確認した。その結果を図 4.8 に示す。結果として、重複したミュオン候補が全体として均一に除去されており、特定のトリガーセクターに依存した過剰な除去は見られないことが確認できた。

4.2. 重複したミュオン候補の判定基準



(a) 重複したミュオン候補の分布。



(b) 重複したミュオン候補の分布

図 4.8: 重複判定条件の適用前後の重複したミュオン候補の空間分布。重複したミュオン候補がトリガー判定された位置を赤点で示している。(a) 重複判定条件の適用前、(b) 適用後をそれぞれ示している。1/24 セクターごとに偏りが生じておらず、均一に重複したミュオン候補が除去できていることが確認できる。

第5章

FPGA 実装と検証

本章では、第4章で設計した重複したミュオン候補の除去アルゴリズム Overlap Removal を初段エンドキャップミュオントリガーへ統合するため、FPGA 上にファームウェアとして実装した結果について述べる。重複判定に用いる p_T 閾値に関する条件は設計自由度として扱っており、本章で示す実装および検証ではその一例として完全一致を要求する条件を採用している。また、具体的なアルゴリズムやトリガーロジックへ統合した際に、実装における制約を満たしているのかを評価した。加えて、実装したファームウェアに対してテストベンチを作成し、機能検証を行った。

なお、本章で述べる FPGA 実装および検証は、すべて Xilinx 社が提供する FPGA 開発環境 Vivado [48] を用いて行ったものであり、実機 FPGA への書き込みおよび動作確認は行っていない。

5.1 FPGA 実装概観

本節では、Overlap Removal を FPGA 上への実装について述べる。初段エンドキャップミュオントリガーでは、固定レイテンシでのパイプライン処理がされることから、アルゴリズムはクロック同期で逐次処理可能な形で設計する必要がある。この条件を踏まえ、本研究では Overlap Removal を 1 クロックサイクルのパイプライン構造として実装した。

以下では、まず Overlap Removal の実装位置を示し、次にモジュール構成および入出力仕様を説明する。さらに、実装後のリソース使用量およびタイミング性能について評価を行う。

5.1.1 Overlap Removal の実装位置

2025 年度現在における Endcap Sector Logic (SL) に実装されているトリガーロジックのブロック図を図 5.1 に示す。第2章で述べたように、SL は SLR と呼ばれる 4 つのシリコンダイに分割されており、各 SLR にトリガーロジックをはじめとした回路が配置されている。

Overlap Removal は、異なるトリガーセクターによって重複して再構成されたミュオン候補を除去するロジックである。そのため、複数のトリガーセクターから再構成されたミュオン候補が一箇所に集約された後段で処理を行う必要がある。SL においてミュオン候補の集約は Wire-Strip Coincidence 以降の段階で行われるため、Overlap Removal は Wire-Strip Coincidence より後段に実装する必要がある。現行のファームウェア構成では Wire-Strip Coincidence 以降のトリガーロジックが実装されている領域は SLR1 のみであるため、Overlap Removal は SLR1 に実装する。SLR1 には既存のトリガーモジュールとして Inner Coincidence および Track Selector が実装されている。

本ロジックを実装するにあたり、以下の条件を満たすことが求められる。

- 将来的な機能追加を考慮し、SLR1 におけるリソース使用量を抑えること。

5.1. FPGA 実装概観

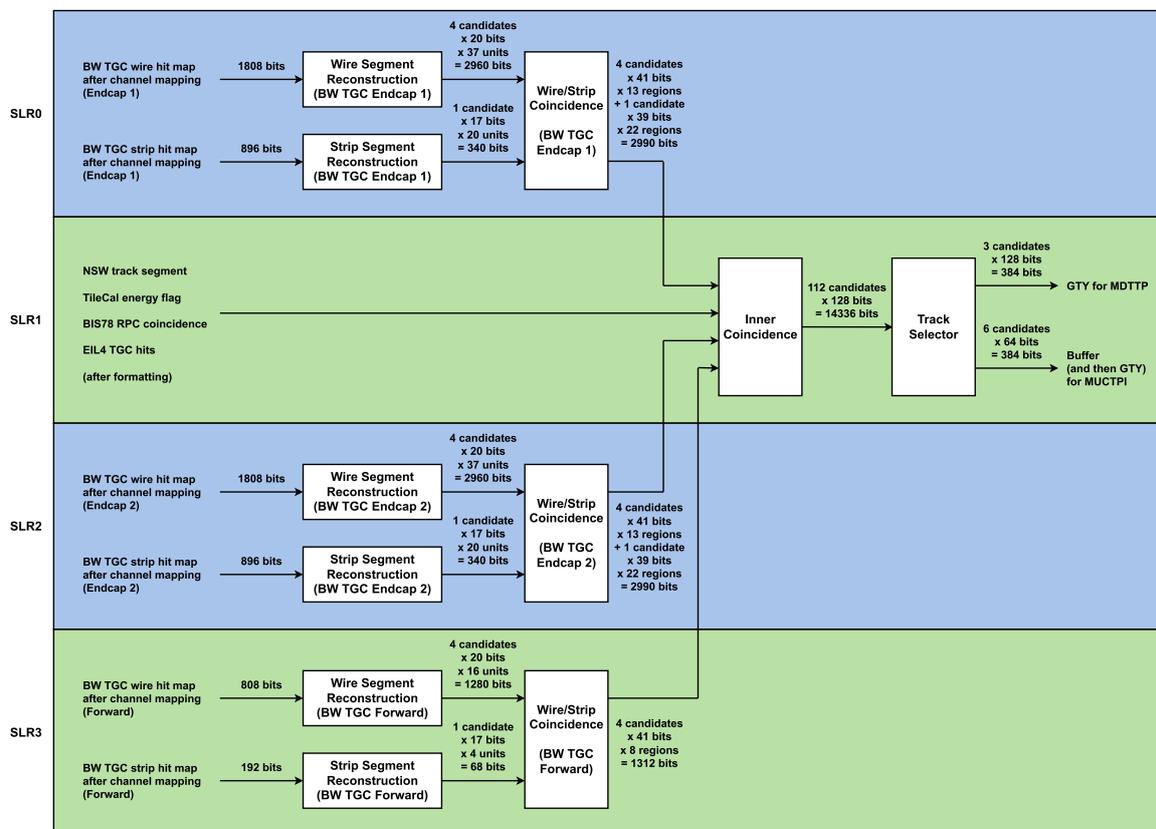


図 5.1: エンドキャップ SL のファームウェアに実装されるトリガーロジックのブロック図 [41]。シリコンダイで物理的に分割された SLR ごとにトリガーロジックが実装される。Overlap Removal は異なるトリガーセクターで再構成されたミュオン候補を比較することから、それぞれのトリガーセクターで再構成されたミュオン候補が統合される SLR1 に実装する。

- SL が出力するミュオン候補数を不必要に減少させないこと。

第 3 章で述べたように、Track Selector は奇偶マージソートに基づくアルゴリズムを用いて 112 個のミュオン候補から最終的に 6 個を選定するロジックである。このトリガーモジュールは、段階的に候補数を削減していく構造を持つため、途中段階において候補数が 16 個まで削減される処理過程が存在する。本研究では、この Track Selector の段階的な選別構造に着目し、112 個から 16 個まで候補を削減した段階で重複判定を行うことが有効であると判断した。この段階では、候補数が十分に削減されている一方で物理として重要なミュオン候補は失われていないと考えられるため、リソース使用量および出力候補数に関する要件を満たすことが可能である。

以上を踏まえ、本研究では Track Selector の処理を 112 個から 16 個へ削減する前段と 16 個から 6 個へ削減する後段の 2 段階に分割し、その間に Overlap Removal を挿入する構成を採用した。以降では、前段の処理を Pre-Track Selector、後段の処理を Post-Track Selector と呼ぶことにする。Overlap Removal の実装位置を図 5.2 に、Overlap Removal を実装した際の Track Selector のロジック概略を図 5.3 に示す。Pre-Track Selector によって 112 個のミュオン候補を 16 個まで削減

5.1. FPGA 実装概観

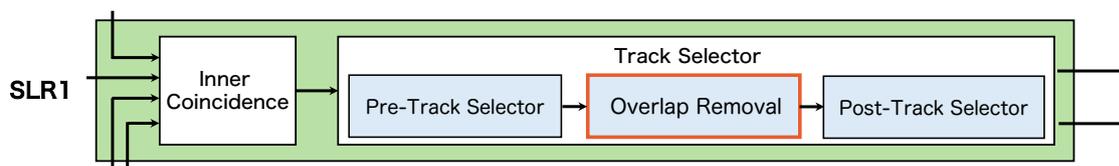


図 5.2: Overlap Removal の実装場所。Track Selector を 2 段階に分割しその間に Overlap Removal を実装する形で、内部に実装する。

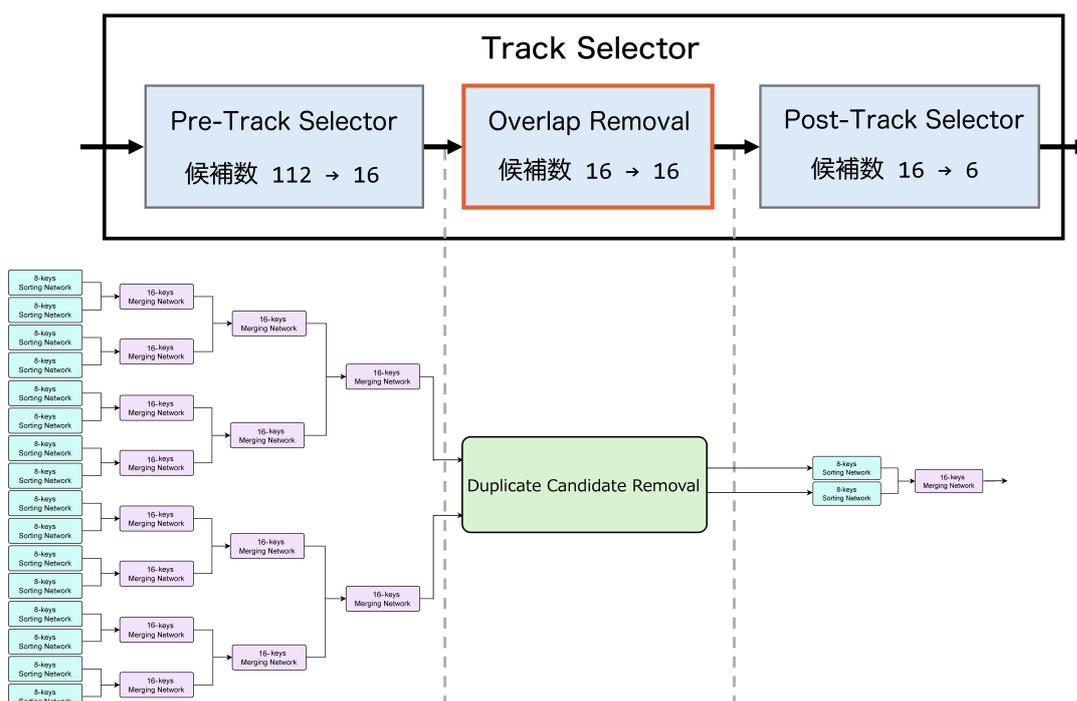


図 5.3: Overlap Removal を実装した Track Selector の概要 ([44] の図を編集して使用)。Track Selector によって 112 個のミュオン候補を 16 個まで削減した後、Overlap Removal によって重複したミュオン候補の除去を行う。出力したミュオン候補を Track Selector に再度入力し 6 個に選別する。

した後、Overlap Removal により重複したミュオン候補を除去する。Overlap Removal の出力は Post-Track Selector に入力され、最終的に 6 個のミュオン候補が選定される処理フローとなっている。

Overlap Removal の出力と Track Selector との整合性

Overlap Removal を Track Selector の処理途中に実装したことにより、Overlap Removal が出力するミュオン候補数は入力数と同じ 16 個に制約される。これは、第 3.2 節で述べたように Track Selector がアルゴリズムの性質上、2 の冪乗個の候補を入力とする構造を持つためである。この制約下では、重複したミュオン候補をファームウェア内部で直接削除することはできない。

そこで本研究では、重複したミュオン候補の有効性を示す `valid_flag` を無効化する方式を採用した。`valid_flag = 0` と設定されたミュオン候補は、後段の Post-Track Selector において自動的に低優先度の候補として扱われるため、既存の選別ロジックとの整合性を保ったまま重複ミュオン

候補の除去を実装することが可能となる。

5.1.2 ファームウェア設計

続いて、Overlap Removal のファームウェア設計について述べる。第 4 章より、重複判定条件には各候補の η 、 ϕ および p_T 閾値を用いることが決定した。これらの物理量について、所定の重複判定条件をすべて満たした場合に重複であると判定し、対応する `valid_flag` を更新する。なお、この際、`valid_flag` を更新する重複したミューオン候補はどちらか一方であり、他方のミューオン候補は有効な候補として保持する。

物理量のビット表現と判定条件

ファームウェア実装においては、各物理量はビット列として表現される。各物理量の定義域とビット数などをまとめたものを表 5.1 に示す。 η は $[-2.7, 2.7]$ の範囲を符号付き 14 bit で表現され、その分解能は ~ 0.00033 である。 ϕ は $[0, 2\pi)$ の範囲を符号なし 9 bit で表現され、分解能は ~ 0.012 である。また、 p_T 閾値はファームウェア仕様として 4 bit に割り当てられており、設計上は 16 段階の値を扱う。一方で現在の開発環境では、入力として与えられる p_T 閾値は 4 段階である。このため、本章における実装および検証では暫定的な条件として、表 4.1 に示した判定基準の一例である p_T 閾値の完全一致を要求する条件を採用した。 η および ϕ に関する判定条件については、表 4.1 に示した基準を適用している。

表 5.1: Overlap Removal で使用する物理量のビット情報。

物理量	ビット数	定義域	分解能
η	14	$[-2.7, 2.7]$	~ 0.00033
ϕ	9	$[0, 2\pi)$	~ 0.012
p_T 閾値	4	–	16 段階 ¹

¹ 現在は開発段階のため 4 段階で実装されている。

重複判定アルゴリズムの実装方針

η および ϕ に対する一致判定は、ビット表現において下位ビットの一部を無視し上位ビットが一致しているかどうかに基づいて行う。一般に、このような多入力条件に基づく一致判定をファームウェアで実装する場合、判定条件を LUT として定義し、LUT や BRAM を用いて参照する方式が考えられる。この方法は実装が容易である一方で、専用メモリ資源の消費や同期読み出しに伴う追加レイテンシが生じてしまう。

本研究では、トリガーロジックにおける固定レイテンシ動作とリソース使用量の最小化を重視し、これらの方式を採用しなかった。代わりに、ビット列の一致判定を各ビットに対する XOR 演算によって差分を求め、その結果を OR 演算により集約する方式を用いた。この方法ではキャリー伝播を伴う演算を必要とせず、完全に並列な論理演算のみで判定が可能であるため、1 クロック以内での判定が実現できる。

このような単純な論理構成により、専用メモリ資源を使用することなく、低レイテンシで重複判定を行うことが可能となった。図 5.4 に本手法による判定の具体例を示す。

また、Endcap-Forward 領域の $\Delta\eta$ の判定については、1/24 セクター 3 つ分を組み合わせたオクタント単位で閾値を決定する。この理由は、 ϕ が 9 ビット で表現され、1/24 セクターは片方のサイドに 24 個存在することから、1/24 セクターごとに一様なビット境界を設計することが困難であるためである¹⁾。一方、オクタント単位では 8 回対称となることから、ビット表現と整合した判定が可能になる。具体的には、 ϕ の上位 3 bit を無視した下位 6 bit を用いて一致判定を行う。

Track Selector における処理方式の活用

Overlap Removal の実装にあたっては、Track Selector における既存のミュオン候補管理方式を活用した。Track Selector では、各ミュオン候補を識別するために識別子 (id)、 p_T 閾値および valid_flag からなる専用の構造体を用いてソートおよび選別を行っている。Overlap Removal では、この構造体に重複判定に必要な η および ϕ が付加された拡張した構造体を用いて判定処理を行う。判定後はこれらの情報を除去し、元の構造体形式に戻して Post-Track Selector に入力する。この設計により、重複判定に必要な情報のみを局所的に利用し、後段の処理に不要なビット幅の増加を抑えていることができる。

以上の設計に基づくファームウェアの概要を図 5.5 に示す。重複と判定された場合、該当する 2 つのミュオン候補は全く同一の物理情報を持っていると解釈し、どちらの候補を無効化しても影響は等価であると考えられる。そのため、対応する id が大きい候補を無効化する規則を採用した。この規則により、ミュオン候補が重複されていると判定された場合には複数のミュオン候補のうち、常に 1 つの候補のみが保持される。

また、valid_flag は入力値を初期値としてコピーされ、1 → 0 への更新のみが行われる。以上により、候補の識別子および p_T を保持したまま、valid_flag のみを更新した 16 個の候補を出力する。

Track Selector で行われるこれらの処理の流れについてまとめたものを図 5.6 に示す。

5.1.3 Track Selector への影響および全体のレイテンシ

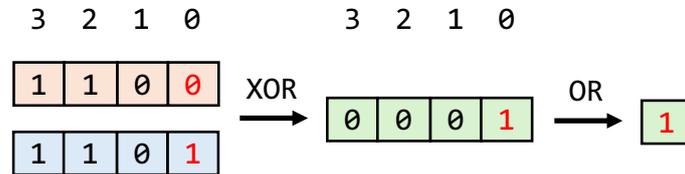
設計した Overlap Removal は 1 クロックサイクル (6.25 ns) で動作する。重複判定により決められた valid_flag の値は、クロック同期で出力値に反映される。

一方で、Overlap Removal の入力となるミュオン候補は、Pre-Track Selector において 8 個ずつの単位で p_T 閾値の順にソートされた状態で入力される。Overlap Removal において valid_flag を無効化することで、このソート済みの順序が崩れてしまう可能性がある。そのため図 5.3 に示すように、Overlap Removal の出力に対しては、まず 8-key Sorting Network を用いて 8 個ずつ再度ソートを行い、続いて 16-key Merging Network により上位 8 個の候補を選択する構成とした。

以上の構成により、Track Selector 全体に必要なクロック数は 9 クロックサイクル (56.25 ns) となる。内訳として、Pre-Track Selector による候補削減に 5 クロック、Overlap Removal による重複判定

1) 9 ビットで表現されることから、 $2^9 = 512$ 通りの値を取ることができる。512 は 24 を因数として持たないため、1/24 セクターごとにビット範囲を設定することができない。

値が一致していない場合



値が一致している場合

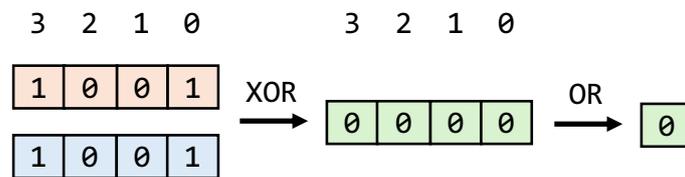


図 5.4: XOR および OR 演算を用いたビット一致判定の方法。上段は 2 つの値が一致していない場合、下段は一致している場合を示す。各ビットに対して XOR を取り、その結果を OR で集約することで、全ビットが一致しているかを 1 クロックで判定できる。この手法は FPGA 実装において簡潔かつ高速な判定を可能とする。



図 5.5: Overlap Removal のファームウェア概要。入力されるミューオン候補に対して全組み合わせで並列に重複判定を行うことで 1 クロックサイクルで処理を行う。重複判定がなされたミューオン候補のペアについては、id がより大きい候補の valid_flag を無効化する。

に 1 クロック、再選別を行う Post-Track Selector に 3 クロックを要する。

5.1.4 Overlap Removal を実装した際のリソース使用量

将来的な機能追加や他トリガーモジュールとの共存を考慮した際、Overlap Removal の実装にあたって SLR1 におけるリソース使用量を抑えることは重要な設計要件の一つである。本小節では、この設計要件が FPGA 実装において満たされているかをリソース使用量の観点から検証した。

FPGA 上では、前節までに述べた各種ロジックがデジタル回路として実装され、主に LUT やフリップフロップ (Flip-Flop: FF) などの論理リソースを消費する。これらのリソースには FPGA ごとに上限が存在するため、Overlap Removal をトリガーモジュールへ追加した場合に全体のリソース使用量が設計上の許容範囲内に収まっているかを確認する必要がある。

Overlap Removal を実装した Track Selector モジュール単体のリソース使用量を図 5.7 に示す。ま

5.1. FPGA 実装概観

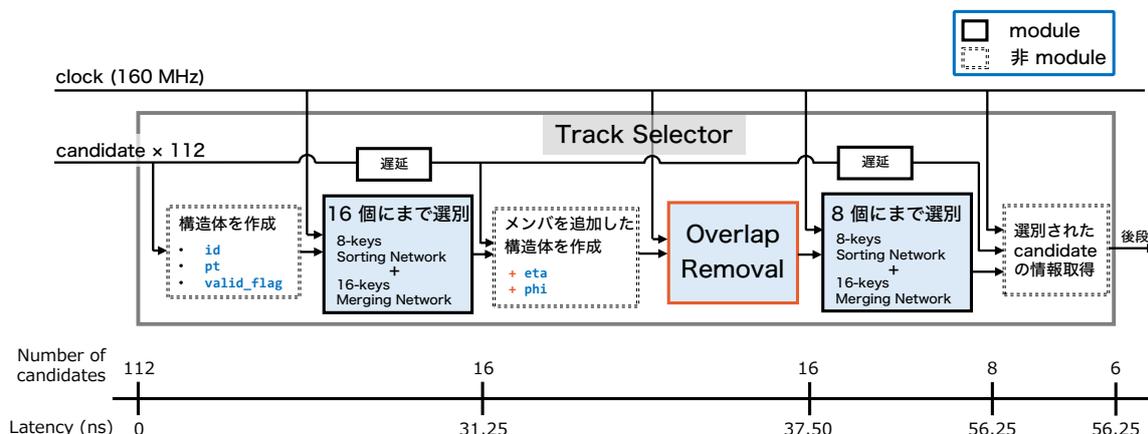


図 5.6: Overlap Removal を実装した Track Selector のブロック図。ミュオン候補から構造体を作成し、Pre-Track Selector によって 112 個のミュオン候補を 16 個まで削減する。その後、メンバを追加した新たな構造体を作成し、Overlap Removal により重複したミュオン候補を無効化する。Overlap Removal の出力は Post-Track Selector に入力され、最終的に 6 個のミュオン候補が選定される。

た、Overlap Removal 実装前後における FPGA 全体でのリソース使用量の比較結果を図 5.8 に示す。これらの結果から、Overlap Removal の実装によるリソース使用量の増加は小さく、実装後においても LUT、FF など各種リソースの使用率はいずれも 50 % 未満に抑えられている。将来的な機能拡張や配置制約への耐性を確保する上で、リソース使用率を十分低く保ちつつ実装可能であることが確認できた。

さらに、FPGA を構成する各 SLR におけるリソース配置領域を図 5.9 に示す。水色で示した領域が使用されているリソース配置領域であり、赤色で示した領域が Overlap Removal の実装箇所である。Overlap Removal が占有している領域は限定的であり、SLR 内でのリソース配置に与える影響が小さいことが分かる。

以上の結果から、Overlap Removal を組み込んだ Track Selector は、SLR1 におけるリソース使用量を十分低く抑えたまま実装可能であり、十分な拡張性を有している。

5.1.5 Overlap Removal を実装した際のタイミング制約

Overlap Removal を Track Selector に組み込んだ際のタイミング制約についても検証を行った。トリガーロジックでは、固定レイテンシかつ高クロック周波数での動作が必須要件であり、Overlap Removal の追加がこれらの条件を損なわないことを確認する必要がある。特に、初段エンドキャップミュオントリガーにおけるトリガーロジックは 160 MHz (6.25 ns) のクロック同期で動作可能でなければならない。

タイミング解析では、クロックに同期して動作する回路において、信号が次の処理に間に合って到着するか、および到着後に十分な時間その値を保持できるかといった観点から制約を評価する。主に以下の 3 点から評価を行う。

- Worst Negative Slack (WNS): Setup の項に示され、信号が次のクロックに間に合うまでの余裕 (スラック) の最小値を表す指標である。値が 0 ns 以上であれば、回路は指定したクロック周

5.1. FPGA 実装概観

Name	CLB LUTs (1728000)	CLB Registers (3456000)	CARRY8 (216000)	F7 Muxes (864000)	F8 Muxes (432000)	Block RAM Tile (2688)	URAM (1280)
TriggerProcessor_SLR1 (TriggerProcessor_SLR1)	140469	103883	6500	11640	4519	150	142
PipeGenerator_InnerCoincidence (PipeGenerator__parameterized13)	750	11052	0	0	0	0	0
PipeGenerator_WireStripCoincidence (PipeGenerator__parameterized12)	37	10984	272	0	0	0	0
TimeAligner_WSCoinOut (TimeAligner_WSCoinOut)	4596	0	0	0	0	0	0
Top_Inner_SL (Top_Inner_SL)	100623	70722	6140	3332	956	150	142
TrackSelector_Wrap (TrackSelector_Wrap)	34463	11125	88	8308	3563	0	0
post_selector (TrackSelector_Post)	1944	608	0	297	0	0	0
pre_selector (TrackSelector_Pre)	6068	2611	82	272	0	0	0
removal_wrapper (OverlapRemoval_Wrap)	113	140	6	0	0	0	0
ShiftRegisters_I_TC_store (ShiftRegistersGen__parameterized35)	12956	5526	0	3425	1575	0	0
ShiftRegisters_PreSelector (ShiftRegistersGen__parameterized34)	11734	2240	0	3585	1673	0	0

図 5.7: Overlap Removal を実装した Track Selector のリソース使用量。モジュール単位で LUT や FF など各要素の使用量を示している。赤枠で囲った箇所が Track Selector に関する項目である。

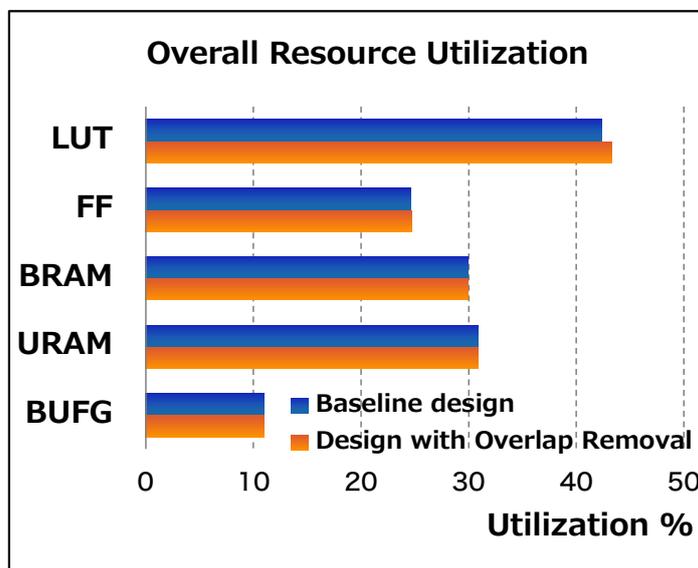


図 5.8: Overlap Removal を実装前後の FPGA 全体でのリソース使用量の比較。Overlap Removal 実装による影響は小さく、実装後もそれぞれのリソース使用量は 50 % 未満と十分な余裕を持った実装であることが確認できる。

期で動作可能であり、負の値であればその時間だけ制約を満たしていないことを示す。

- Worst Hold Slack (WHS): Hold の項に示され、信号が切り替わった直後に必要な保持時間のスラックの最小値を表す指標である。値が 0 ns 以上であれば、信号が早く変化しすぎることによる誤動作が生じないことを示す。
- Worst Pulse Width Slack (WPWS): Pulse Width の項に示され、クロック信号の High 幅および Low 幅が必要なスラックの最小時間を満たしているかを表す指標である。値が 0 ns 以上であれば、クロック幅の不足に起因する問題がないことを示す。

本検証では、論理合成後の設計に対して配置配線を含む実装を行い、その結果に基づくタイミング解析を用いて制約の確認を行った。タイミングの検証結果について、Overlap Removal を実装した Track Selector 単位で確認した結果を図 5.10 に、FPGA に実装される回路全体で確認した結果を

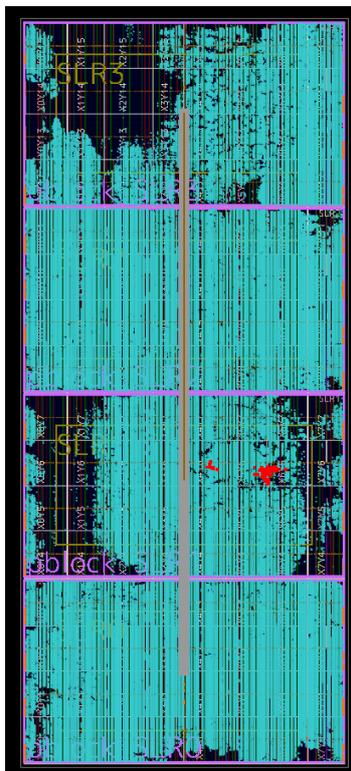


図 5.9: FPGA でのリソース配置領域。SLR ごとのリソース配置領域が示されており、上から順に SLR3、SLR2、SLR1、SLR0 に対応する。水色で示されている領域が使用されているリソース配置領域であり、赤色の領域が Overlap Removal の実装箇所である。

図 5.11 に示す。図から分かるように、いずれの指標においてもスラックは正の値をとっており、タイミング制約を満たしていることが確認できる。また、FPGA に実装される回路全体での WNS、WHS、WPWS は Track Selector 単体での結果よりも厳しい値を示しており、Track Selector が回路全体におけるタイミング上のボトルネックではないことが分かる。

以上より、Overlap Removal を含む Track Selector を実装した FPGA 設計は、初段エンドキャップ ミューオントリガーに要求される 160 MHz の固定レイテンシ動作において、すべてのタイミング制約を満たして動作可能であることを確認した。また、Track Selector は回路全体におけるタイミング上のボトルネックとはなっておらず、Overlap Removal の追加が既存トリガーロジックの動作マージンに与える影響が限定的であることも示された。

5.2 テストベンチによる設計確認

続いて、テストベンチを作成し、入出力の論理的整合性に加えてパイプライン処理におけるレイテンシおよび制御信号の時間的挙動が設計仕様と一致しているかを検証した。特に、本研究で新たに実装した Overlap Removal が既存の Track Selector のパイプライン構造および制御と整合的に動作しているかを重点的に確認した。

前小節で述べたタイミング制約の解析は、最悪遅延条件に基づく静的解析であり、回路が物理的に

5.2. テストベンチによる設計確認

Design Timing Summary

Setup	Hold	Pulse Width
Worst Negative Slack (WNS): 0.236 ns	Worst Hold Slack (WHS): 0.010 ns	Worst Pulse Width Slack (WPWS): 2.546 ns
Total Negative Slack (TNS): 0.000 ns	Total Hold Slack (THS): 0.000 ns	Total Pulse Width Negative Slack (TPWS): 0.000 ns
Number of Failing Endpoints: 0	Number of Failing Endpoints: 0	Number of Failing Endpoints: 0
Total Number of Endpoints: 15882	Total Number of Endpoints: 15882	Total Number of Endpoints: 15282

All user specified timing constraints are met.

図 5.10: Overlap Removal を実装した Track Selector におけるタイミング制約のステータス。Worst Negative Slack、Worst Hold Slack、Worst Pulse Width Slack の三つの指標を用いて評価している。

Design Timing Summary

Setup	Hold	Pulse Width
Worst Negative Slack (WNS): 0.026 ns	Worst Hold Slack (WHS): 0.002 ns	Worst Pulse Width Slack (WPWS): 0.269 ns
Total Negative Slack (TNS): 0.000 ns	Total Hold Slack (THS): 0.000 ns	Total Pulse Width Negative Slack (TPWS): 0.000 ns
Number of Failing Endpoints: 0	Number of Failing Endpoints: 0	Number of Failing Endpoints: 0
Total Number of Endpoints: 1842484	Total Number of Endpoints: 1827127	Total Number of Endpoints: 973607

All user specified timing constraints are met.

図 5.11: FPGA に実装される回路全体におけるタイミング制約のステータス

指定したクロック周期で動作可能であることを確認するものである。しかし、この解析のみでは、実際の信号が設計時に想定したクロック境界で伝搬しているか、またパイプライン各段におけるレイテンシや制御信号の振る舞いが仕様どおりに実現されているかを直接的に確認することはできない。そこでテストベンチを用いた動的検証を行い、入力から出力までの信号伝搬、パイプライン処理におけるレイテンシが設計仕様と一致していることを確認した。なお、本節ではファームウェア実装を対象とした検証環境全体を指してテストベンチと呼んでいる。

5.2.1 テストベンチ全体像

テストベンチの全体構成を図 5.12 に示す。本研究では、ファームウェア実装の正当性を確認するため、理想的な挙動を示すソフトウェア参照モデルを作成し、RTL シミュレーションとの出力比較を行った。まず、Python による疑似ミューオン候補生成器を用いて、実際の入力形式に従ったテストデータを生成する。生成した同一の入力データを、RTL シミュレーションおよび参照モデルの双方に与え、それぞれの出力を取得する。

この際、連続した複数クロックにわたって入力データを与えることで、パイプライン処理におけるレイテンシや制御信号の時間的挙動についても検証可能である。また、疑似ミューオン候補生成器では、Endcap-Endcap 領域および Endcap-Forward 領域における重複条件を満たすような入力データを生成可能とすることで、様々な入力パターンに対するファームウェア実装の応答を確認できるよう設計した。

以上の構成により、個々のテストケースに対して、ファームウェア実装が設計仕様どおりの挙動を示していることを検証した。

本研究において、テストベンチによる検証は、Overlap Removal を実装した Track Selector モジュール

5.2. テストベンチによる設計確認

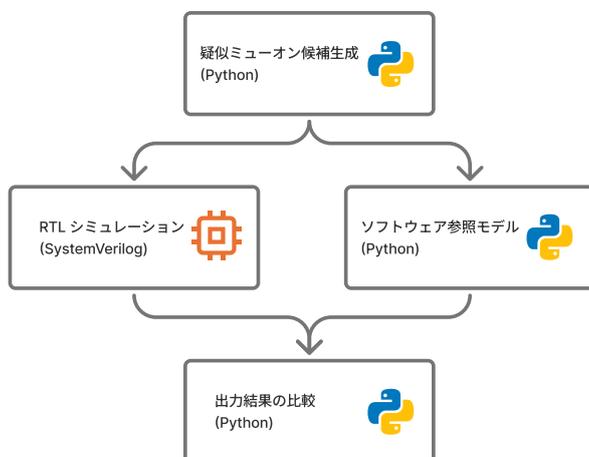


図 5.12: 構成したテストベンチの全体図。疑似ミューオン候補を生成し、RTL シミュレーションおよびソフトウェア参照モデルに同一の入力を与え、その出力を比較することで、ファームウェア実装が設計仕様どおりに動作しているかを検証した。

ル単位で行った。Track Selector では、112 個のミューオン候補を入力とし、内部のソート処理により 8 個のミューオン候補を選別した後、その上位 6 個を後段へ出力する構成になっている。本研究では、Overlap Removal のアルゴリズムの挙動を重点的に検証する目的から、Track Selector 自体のアルゴリズムによる 112 個の入力に対する 8 個の出力までを検証対象とした。また、テストベンチでは Track Selector 全体の入出力に加えて、Overlap Removal モジュール単位での入出力信号も取得可能な構成とし、重複判定による `valid_flag` の更新が設計仕様通りに行われていることを確認した。

5.2.2 検証結果

図 5.13 に、Overlap Removal を含む Track Selector に対する 1 クロック分に相当する 16 個のミューオン候補の入力および出力結果の一例を示す。Overlap Removal 適用後において、重複と判定されたミューオン候補の `valid_flag` が 0 に更新されていることが分かる。一方で、同一の重複グループ内において、少なくとも一つの候補が有効な状態で保持されていることも確認した。また、それぞれのミューオン候補が持つ情報について、`valid_flag` のみが更新されていることも確認できた。図に示した例は Overlap Removal モジュールのみでの入出力信号であるが、Track Selector 全体で確認した場合においても p_T 閾値の値が高いミューオン候補が選択されていることを確認している。

また、RTL シミュレーションから得られた出力は、ソフトウェア参照モデルの出力と一致していることを確認した。さらに、連続した複数クロックにわたって入力を与えた場合についても同様の比較を行い、各クロックにおいて期待される出力タイミングが参照モデルと一致していることを確認した。これにより、設計時に想定したレイテンシどおりに信号が伝搬していることが示された。同様の検証を、Endcap-Endcap 領域および Endcap-Forward 領域領域における様々な重複条件を含む入力パターンに対して行い、いずれの場合においても RTL シミュレーションと参照モデルの出力が一致することも確認している。

5.2. テストベンチによる設計確認

id	valid_flag	eta	phi	pt
71	0	00000000000000	00000000	0000
79	1	11011111001000	100000101	0011
78	1	11011111000100	100000100	0100
122	1	11011111010000	100000100	0101
103	1	00100010011011	010010011	1100
73	1	00100101100001	010010110	1110
77	1	00101001110101	010010001	1110
114	1	00100100110111	010010101	1111
43	1	11011111000000	100000100	0100
19	1	11011111001000	100000100	1000
24	1	11011111010000	100000101	1001
47	1	11011111001000	100000101	1010
25	1	00100010010100	010010010	1100
55	1	00100010010110	010010010	1100
63	1	00100110001010	010010111	1111
50	1	00100100110100	010010100	1111

id	valid_flag	eta	phi	pt
71	0	00000000000000	00000000	0000
79	1	11011111001000	100000101	0011
78	0	11011111000100	100000100	0100
122	1	11011111010000	100000100	0101
103	1	00100010011011	010010011	1100
73	1	00100101100001	010010110	1110
77	1	00101001110101	010010001	1110
114	0	00100100110111	010010101	1111
43	1	11011111000000	100000100	0100
19	1	11011111001000	100000100	1000
24	1	11011111010000	100000101	1001
47	1	11011111001000	100000101	1010
25	1	00100010010100	010010010	1100
55	0	00100010010110	010010010	1100
63	1	00100110001010	010010111	1111
50	1	00100100110100	010010100	1111

(a) Overlap Removal 適用前

(b) Overlap Removal 適用後

図 5.13: Overlap Removal 適用前後におけるミュオン候補の情報の比較。Overlap Removal 適用後において、一部の重複判定がなされたミュオン候補の `valid_flag` の値が 0 になっていることが確認できる。この際、図中の p_T 閾値は 4 bit 表現に基づき 16 段階で示されているが、本検証ではその値が完全一致していることを重複判定の条件として採用した。

以上の検証結果から、Overlap Removal を含む Track Selector のファームウェア実装において、重複したミュオン候補の判定および `valid_flag` の更新が設計仕様どおりに正しく行われていることを確認した。さらに、RTL シミュレーションとソフトウェア参照モデルとの比較により、単一クロックおよび連続クロック入力のいずれにおいても、出力の論理値およびタイミングが一致していることを確認した。以上により、初段トリガーに要求される機能的・時間的仕様を満たしていることを、テストベンチによる動的検証を通じて示すことができた。次章では、本実装による重複ミュオン候補の除去性能およびトリガー性能への影響について評価を行う。

第6章

初段エンドキャップミュオントリガーにおける Overlap Removal ロジックの性能評価

前章までに、本研究で開発した重複したミュオン候補の除去ロジックである Overlap Removal が、初段エンドキャップミュオントリガーにおいてファームウェア実装可能であることを示した。本章では、Overlap Removal が初段エンドキャップミュオントリガーの性能に与える影響を、トリガー効率および物理的に意味のある事象が誤って除去されないかという観点から評価する。特に、複数のミュオンを伴うマルチミュオン事象では、ミュオン同士が空間的に近接して飛来する場合があります。Overlap Removal がこれらを重複候補と誤判定する可能性がある。そこで本章では、Overlap Removal がトリガー効率を損なうことなく重複候補を除去できているかを検証する。

なお、本章で用いる評価は、初段エンドキャップミュオントリガーおよび Overlap Removal のロジックを C++ により実装したシミュレータ上で行う。

6.1 本章の目的と評価方針

Overlap Removal は、重複して再構成されたミュオン候補を除去することを目的としたロジックであり、その適用による影響は主にマルチミュオントリガーに現れる。そのため本章では、Overlap Removal の導入がマルチミュオントリガー性能にどのような影響を与えるかを評価の主軸とする。トリガー効率およびトリガーレートといったトリガーとしての性能指標の観点から評価を行う。

また、前章まで述べたように、Overlap Removal における p_T 閾値の扱いは設計自由度として位置付けられており、最終的な判定条件は将来仕様に基づく再評価を前提としている。そこで本章では、 p_T 閾値を重複判定条件として用いる場合と用いない場合の二通りの条件について、同一の評価指標およびデータを用いて性能評価を行う。本章で扱う評価条件を以下に示す。

- p_T 閾値を重複判定条件として用いる場合（完全一致）
- p_T 閾値を重複判定条件に含めない場合

これらの比較を通じて、 p_T 閾値の判定がトリガー性能および物理感度に与える影響を整理し、現行仕様における限界と今後の改善点について考察する。

6.2 シングルミュオンサンプルを用いた検証

Overlap Removal を評価するにあたって、まず Overlap Removal の挙動を把握するため、真のミュオン情報が利用可能なシミュレーションサンプルを用いて評価を行う。高輝度 LHC 環境を想定し、平均衝突数 $\langle \mu \rangle = 200$ の条件で Overlap Removal が重複したミュオン候補を適切に判定・除

6.2. シングルミュオンサンプルを用いた検証

去できるかを確認する。シングルミュオン事象では、物理的に生成されるミュオンは1つであるため、同一イベント内で複数のミュオン候補が再構成された場合、それらは再構成過程に起因する重複候補であるとみなすことができる。この性質を利用し、Overlap Removal が重複候補を適切に除去可能であるかを評価する。

本解析において、重複したミュオン候補であるかどうかの判断には、真のミュオン情報を用いる。真のミュオンを TGC 検出器面まで外挿し、その外挿位置とトリガー判定位置が空間的に近接している場合、ミュオン候補が真のミュオンに対応すると判断する。一つの真のミュオンに対してこの条件を満たすミュオン候補が複数存在する場合、それらを重複したミュオン候補と定義する。

近接判定には、ミュオンの位置差を表す指標として $\Delta R_{\mu\mu}^{\text{Truth}}$ を用いる。 $\Delta R_{\mu\mu}^{\text{Truth}}$ が所定の閾値以下である場合に、空間的に近接していると判断する。ミュオンは検出器内の磁場によって曲げられるため、ミュオンの飛跡には曲率が生じ、飛跡の曲率は横方向運動量 p_T に依存する。このため、近接判定に用いる $\Delta R_{\mu\mu}^{\text{Truth}}$ の閾値も p_T 依存で設定する。この閾値の決定には、 $\langle\mu\rangle = 0$ のシングルミュオンサンプルを用いた。真のミュオンの外挿位置とトリガー判定位置の差から $\Delta R_{\mu\mu}^{\text{Truth}}$ を計算し、 p_T に対する $\Delta R_{\mu\mu}^{\text{Truth}}$ の分布を基に閾値を決定した。

$\Delta R_{\mu\mu}^{\text{Truth}}$ は、真のミュオンの外挿位置 ($\eta^{\text{Truth}}, \phi^{\text{Truth}}$) とトリガー判定位置 ($\eta^{\text{TC}}, \phi^{\text{TC}}$) を用いて

$$\Delta R_{\mu\mu}^{\text{Truth}} = \sqrt{(\eta^{\text{Truth}} - \eta^{\text{TC}})^2 + (\phi^{\text{Truth}} - \phi^{\text{TC}})^2}$$

と定義する。以降では、ミュオン間の距離を単に ΔR と記す。

その結果を図 6.1 に示す。このとき、赤線で示した境界よりも $\Delta R_{\mu\mu}^{\text{Truth}}$ が小さい時、空間的に近接しており、当該の真のミュオン由来のミュオン候補であると判定した。これらの閾値は最適化を目的としたものではなく、シングルミュオンサンプルにおける $\Delta R_{\mu\mu}^{\text{Truth}}$ 分布を保守的に包含するよう設定したものである。本節以降に述べるシミュレーションサンプルを使用した性能評価においても同様に、トリガー判定がなされたかの判断には真のミュオンとの $\Delta R_{\mu\mu}^{\text{Truth}}$ の値から判断する。

加えて、本解析では以下の条件を満たす場合に Overlap Removal の除去対象である重複したミュオン候補であると判断する。

- 同一イベント内で、1/24 セクター内に 2 つ以上のミュオン候補が再構成されていること
- それらのミュオン候補が異なるトリガーセクターにおいて再構成されていること

これらの基準をもとに算出した $\langle\mu\rangle = 200$ におけるシングルミュオンサンプルの重複したミュオン候補の除去率を表 6.1 に示す。 p_T 閾値を重複判定条件として含めた場合および含めなかった場合双方について結果を示している。 p_T 閾値の条件によって除去率に差は見られるものの、いずれの場合においても重複したミュオン候補が除去可能であることが確認できる。

次に、それぞれの条件における重複除去の p_T 依存性を図 6.2 に示す。図 6.2(a) は p_T 閾値を重複判定条件として含めた場合、図 6.2(b) は含めなかった場合の結果である。いずれの場合においても、低 p_T 領域では重複除去が十分に行われていないことが分かる。これは、低 p_T のミュオンほど磁場による飛跡の曲率が大きくなり再構成精度が落ちることで、重複判定条件を満たすほど空間的に近接し

6.3. マルチミュオン事象への影響

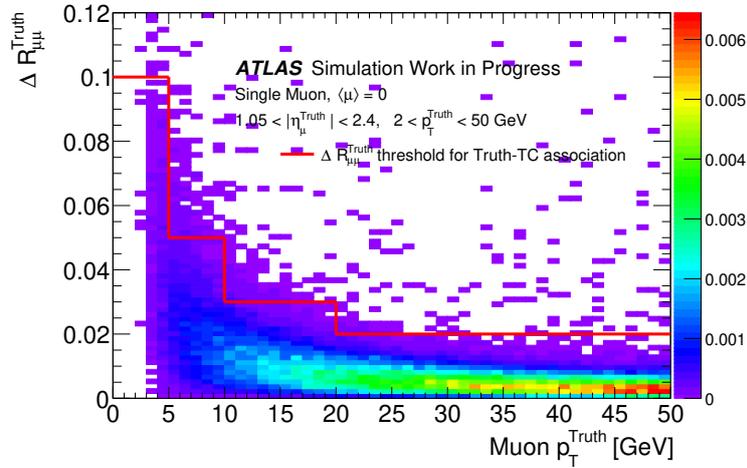


図 6.1: ミューオン候補が真のミュオンと対応しているのかを決定する条件。 $\Delta R_{\mu\mu}^{\text{Truth}}$ の値から、 p_T に依存して設定する。赤色で描いている線が決定した閾値である。 $\Delta R_{\mu\mu}^{\text{Truth}}$ の判定閾値は、 $p_T < 5$ GeV で 0.1、 $5 \leq p_T < 10$ GeV で 0.05、 $10 \leq p_T < 20$ GeV で 0.03、 $p_T \geq 20$ GeV で 0.02 と設定した。

表 6.1: シングルミュオンサンプル $\langle\mu\rangle = 200$ に対する重複したミュオン候補の除去率。統計誤差のみ考慮している。

条件	除去率
p_T 閾値完全一致	$89.6^{+1.0}_{-1.1} \%$
p_T 閾値条件なし	$97.2^{+0.5}_{-0.6} \%$

なくなるためであると考えられる。

以上より、トリガー判定位置および p_T 閾値の近接性に基づく判定条件を用いることで、パイラアップ環境においても Overlap Removal は重複したミュオン候補を判定・除去可能であることが示された。 p_T 閾値を重複判定条件に含めるか否かによって、重複除去率に差が生じることも明らかとなった。

6.3 マルチミュオン事象への影響

前節では、パイラアップ環境においても Overlap Removal により重複したミュオン候補を除去可能であることを示した。一方で、複数のミュオンが物理的に近接して生成されるマルチミュオン事象に対しては、Overlap Removal がそれらを重複したミュオン候補であると誤って判定し除去してしまう可能性がある。

そこで本節では、Overlap Removal が初段マルチミュオントリガーに与える影響について、トリガー効率およびマルチミュオン事象の除去率の観点から評価を行う。具体的には、Overlap Removal を適用しない場合と適用した場合とを比較し、重複判定条件の違いによる影響を調べる。

また、Overlap Removal の挙動およびトリガー効率がパイラアップ環境に依存するかを確認するため、 $\langle\mu\rangle = 0$ および 200 の条件において評価を行う。

6.3. マルチミュオン事象への影響

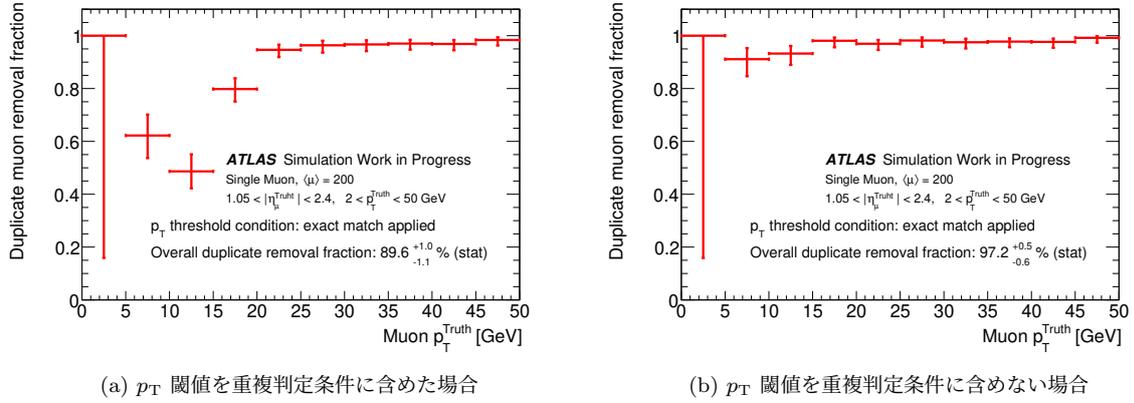


図 6.2: シングルミュオンサンプル $\langle \mu \rangle = 200$ における重複したミュオン候補のミュオンの p_T に対する除去率。(a) は p_T 閾値を重複判定条件に含めた場合、(b) は含めない場合の結果である。

6.3.1 評価に用いるサンプル

評価には、低質量粒子の崩壊に由来するマルチミュオン事象を用いる。親粒子の質量が小さい場合、ローレンツブーストの影響によりミュオン同士が空間的に近接して飛来することが多く、Overlap Removal の影響が顕著に現れると考えられる。具体的には、ダークフォトンがミュオン対に崩壊する事象、および τ レプトンが3つのミュオンに崩壊する事象 ($\tau \rightarrow 3\mu$) を用いる。これらはいずれも新物理過程として考えられる事象であるが、本解析では近接した複数のミュオンが生成される運動学的特徴に着目して用いる。

以下に、それぞれの事象について概説する。

ダークフォトン

ダークフォトン、ダークセクター [49] に由来する新しいゲージ粒子として提案されており、標準模型のレプトン対に崩壊する可能性を持つ。本解析では理論的背景には立ち入らず、低質量の粒子がミュオン対へ崩壊することで空間的に近接したミュオン対が生成される事象の一例として、ダークフォトンを用いる。

本解析で使用したサンプルのファインマンダイアグラムを図 6.3(a) に、サンプル生成に用いたダークフォトンモデルの主なパラメータを表 6.2 に示す。解析には生成されたミュオン対がどちらもエンドキャップ領域に飛来した事象を対象とした。

本サンプルにおける運動学的特性を把握するため、解析対象イベントにおける主なパラメータを図 6.4 に示す。それぞれミュオンの leading p_T 、sub-leading p_T および2つのミュオン間の距離 ΔR の分布を示している。また、sub-leading p_T と ΔR の相関を図 6.5 に示す。sub-leading p_T が大きい事象ほど ΔR が小さくなる傾向が見られる。

$\tau \rightarrow 3\mu$

第 1 章でも述べたように、 τ レプトンの3ミュオンへの崩壊はレプトンフレーバー保存則を破る新物理過程である。本解析では、3つのミュオンが空間的に近接して検出器に入射する事象として、

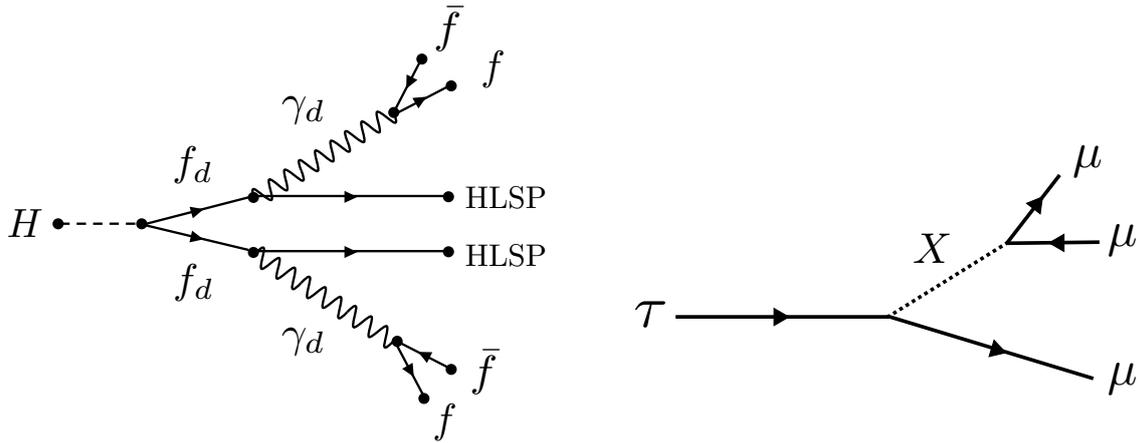
6.3. マルチミュオン事象への影響

表 6.2: 本解析で使したダークフォトンモデルの主なパラメータ

パラメータ	値
質量	0.4 GeV
平均寿命	0 (prompt decay)
ミュオン対への崩壊率	45 %

$\tau \rightarrow 3\mu$ 過程を用いる。本解析で使したサンプルのファインマンダイアグラムを図 6.3(b) に示す。本サンプルは、 τ レプトンが必ず 3 つのミュオンに崩壊するよう生成されている。

本サンプルにおける運動学的特性として、解析対象イベントにおける主なパラメータを図 6.6 に示す。それぞれミュオンの leading p_T 、lowest p_T 、および 3 つのミュオンの全ての組み合わせから計算される ΔR のうち最小値となる ΔR_{\min} の分布を示している。また、lowest p_T と ΔR_{\min} の相関を図 6.7 に示す。 ΔR_{\min} を与えるミュオンは必ずしも lowest p_T とは限らないが、lowest p_T が大きい事象ほど ΔR_{\min} が小さくなる傾向が見られる。



(a) ダークフォトンのファインマンダイアグラム。ダークフォトンが 2 つ生成され、それぞれでフェルミオン対に崩壊する。そのため、1 事象あたり最大 4 つのミュオンが生成される。

(b) $\tau \rightarrow 3\mu$ のファインマンダイアグラム。1 事象あたり 3 つのミュオンが必ず生成される。

図 6.3: 本解析で使した物理サンプルのファインマンダイアグラム。

6.3.2 初段マルチミュオントリガーの性能評価

本節では、初段マルチミュオントリガーとして、2 つのミュオンを要求するダイミュオントリガーおよび 3 つのミュオンを要求するトリミュオントリガーを用いて評価を行う。

6.3.2.1 ダークフォトンサンプルに対する評価

本小節では、ダークフォトンサンプルを使用してダイミュオントリガーのトリガー性能を評価する。第 2.3.3 小節で述べたように、高輝度 LHC-ATLAS 実験において提案されている初段ダイミュオントリガーにおける p_T 閾値はそれぞれ 10 GeV である。ここから、本研究では p_T 閾値が 10 GeV

6.3. マルチミュオン事象への影響

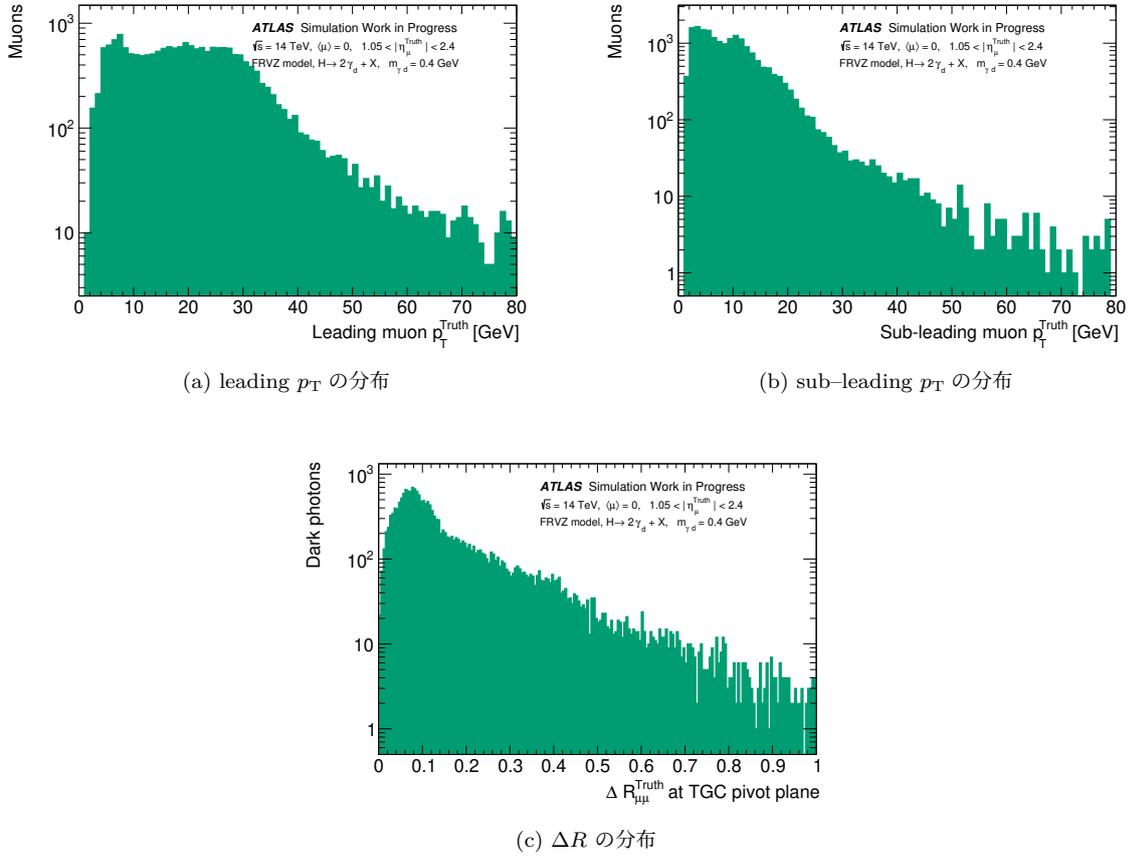


図 6.4: 本解析で対象となるダークフォトン由来のミュオンにおける主なパラメータ。(a) leading p_T の分布、(b) sub-leading p_T の分布、(c) 2つのミュオン間の距離 ΔR の分布を示している。

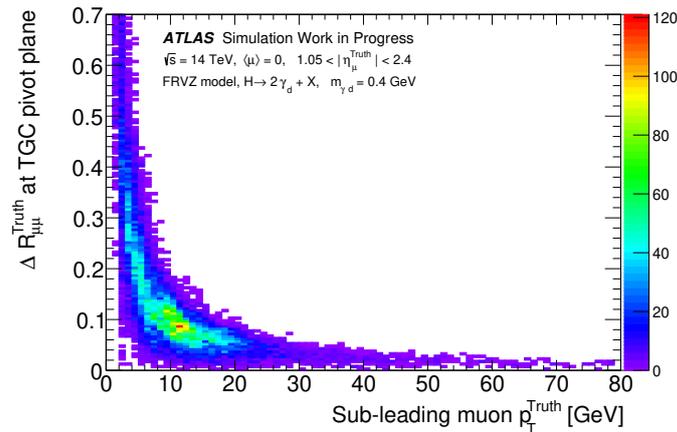
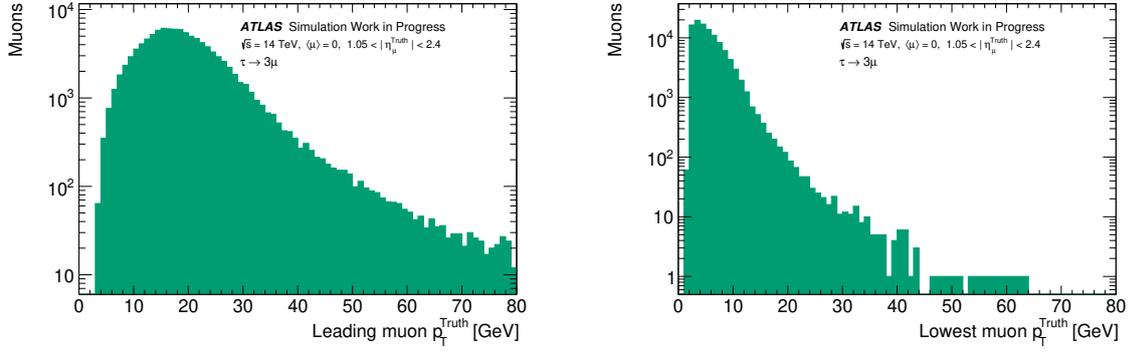


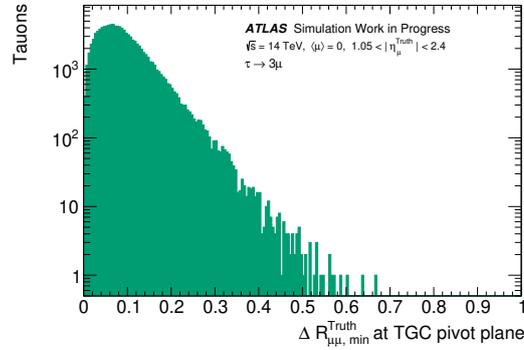
図 6.5: 本解析で対象となるダークフォトン由来のミュオンにおける sub-leading p_T と ΔR の相関。sub-leading p_T が大きくなると ΔR が小さくなる傾向が確認できる。

6.3. マルチミューオン事象への影響



(a) leading p_T の分布

(b) lowest p_T の分布



(c) 最小となるミューオン間の距離 ΔR_{\min} の分布

図 6.6: 本解析で対象となる $\tau \rightarrow 3\mu$ のミューオンにおける主なパラメータ。(a) leading p_T の分布、(b) lowest p_T の分布、(c) 最小となるミューオン間の距離 ΔR_{\min} の分布。

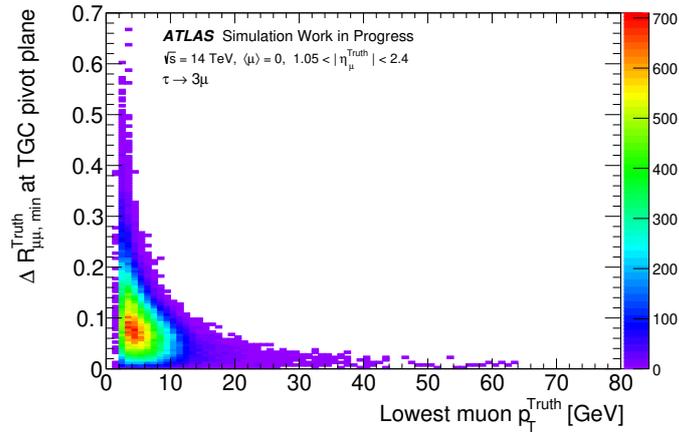


図 6.7: 本解析で対象となる $\tau \rightarrow 3\mu$ のミューオンにおける lowest p_T と ΔR_{\min} の相関。 ΔR_{\min} を与えるミューオンは必ずしも lowest p_T とは限らないが、lowest p_T が大きくなると ΔR_{\min} が小さくなる傾向が確認できる。

6.3. マルチミュオン事象への影響

のトリガー判定が2つ以上存在する場合に、ダイミュオントリガーが発行されると定義しトリガー効率を評価した。

$\langle\mu\rangle = 0$

$\langle\mu\rangle = 0$ におけるダークフォトンサンプルに対するダイミュオントリガーのトリガー効率を図 6.8 に示す。それぞれ ΔR および sub-leading p_T に対するトリガー効率を示している。Overlap Removal を適用していない場合、Overlap Removal を適用した際に重複判定に p_T 閾値を含めない場合、および含めた場合の結果を重ねて描いている。

いずれの結果からも、Overlap Removal を適用したことによるトリガー効率への差は誤差の範囲内であり、有意な差は確認されない。

ΔR に対するトリガー効率について、 $\Delta R < 0.06$ の領域において効率の低下が見られる。 ΔR が小さい領域では、2つのミュオンのトリガー判定位置が空間的に近接するに、トリガーロジック上で両者を分離して識別することが困難になり、効率が低下すると考えられる。

一方、sub-leading p_T に対するトリガー効率では、 p_T 閾値である 10 GeV 付近から効率が立ち上がっていることが確認できる。 $p_T > 30$ GeV の高い p_T の領域において効率の低下がみられるが、これは高い p_T を持つ場合その飛跡の曲率が小さくなることで2つのミュオンが近接しやすくなり、結果としてトリガーロジック上で分離が困難になったためであると考えられる。図 6.5 に示したように、sub-leading p_T と ΔR には相関が確認されており、この影響が反映された結果であると解釈できる。

また、いずれの結果においてもプラトー領域におけるトリガー効率は 0.8 程度である。本研究では、シングルミュオントリガーの性能を別途評価しており、本解析条件におけるトリガー効率は 0.9 程度であることを確認している（付録 C 参照）。この値を前提とすると、2つのミュオンが独立にトリガー条件を満たす場合、ダイミュオントリガーの効率は $0.9 \times 0.9 \sim 0.8$ 程度となることが期待される。本解析で得られたダイミュオントリガーの効率はこの期待値と整合していることから、ダイミュオン事象であることに起因した顕著な効率の低下は示唆されない。

$\langle\mu\rangle = 200$

$\langle\mu\rangle = 200$ におけるダークフォトンサンプルに対するダイミュオントリガーのトリガー効率を図 6.9 に示す。Overlap Removal を適用していない場合、Overlap Removal を適用した際に重複判定に p_T 閾値を含めない場合、含めた場合を重ねて描いている。

$\langle\mu\rangle = 200$ においても、 $\langle\mu\rangle = 0$ の場合と同様に、Overlap Removal の適用有無によるダイミュオントリガー効率に有意な差は見られない。また、 $\langle\mu\rangle = 0$ の結果と比較しても、分布の形状および効率の大きさに顕著な違いは確認されない。

以上より、パイラアップ環境においても、ダイミュオントリガーのトリガー効率は $\langle\mu\rangle = 0$ の場合と同様の挙動を示しており、効率の低下など顕著な影響は見られない。

6.3.2.2 $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルに対する評価

続けて、 $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルを使用してトリミュオントリガーのトリガー性能を評価する。高輝度 LHC-ATLAS 実験における初段トリミュオントリガーの p_T 閾値は現時点で未確定であるため、本

6.3. マルチミューオン事象への影響

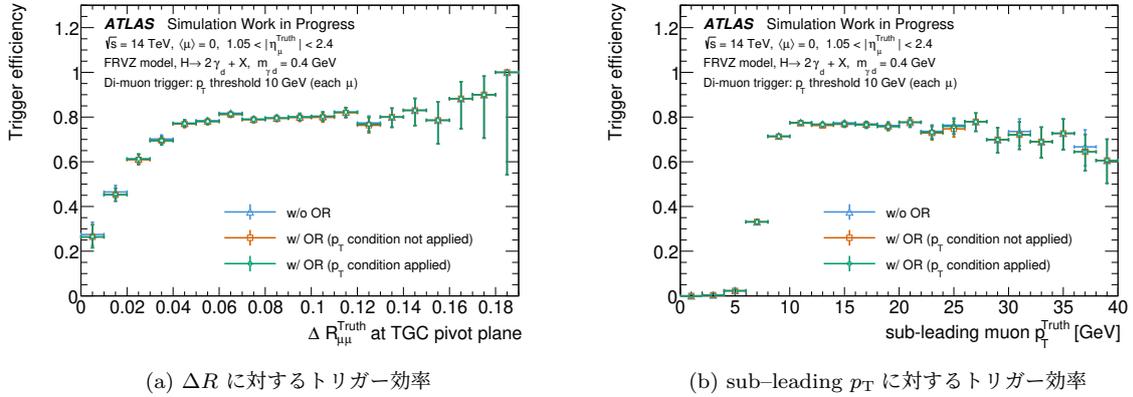


図 6.8: $\langle\mu\rangle = 0$ におけるダークフォトンサンプルに対するダイミュオントリガーのトリガー効率。(a) ΔR に対する効率、(b) sub-leading p_T に対する効率を示している。青色は Overlap Removal を適用していない場合、オレンジ色は p_T 閾値を重複判定条件として含めていない、緑色は含めた Overlap Removal を適用した場合である。図中では、Overlap Removal を OR と表記している。

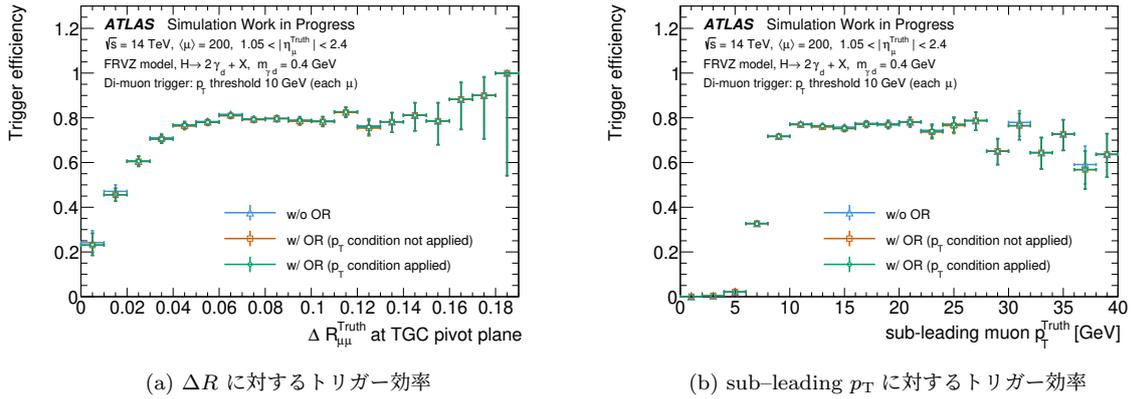


図 6.9: $\langle\mu\rangle = 200$ におけるダークフォトンサンプルに対するダイミュオントリガーのトリガー効率。(a) ΔR に対する効率、(b) sub-leading p_T に対する効率を示している。青色は Overlap Removal を適用していない場合、オレンジ色は p_T 閾値を重複判定条件として含めていない、緑色は含めた Overlap Removal を適用した場合である。

解析では Run 3 において用いられている設定に近い値として各ミューオン候補に対する p_T 閾値を 5 GeV と設定した。 p_T 閾値が 5 GeV を満たすトリガー判定が 3 つ以上存在する場合に、トリミュオントリガーが発行されると定義しトリガー効率を評価した。

$\langle\mu\rangle = 0$

$\langle\mu\rangle = 0$ におけるトリミュオントリガーのトリガー効率を図 6.10 に示す。

トリミュオントリガーにおいても、Overlap Removal を適用有無によるトリガー効率について、有意な差は確認されない。

ΔR に対するトリガー効率は、 $\Delta R < 0.08$ の領域において効率の低下が見られる。これは、ダイミュオントリガーにおける結果と同様、ミューオン同士が空間的に近接することでミューオン候補

6.3. マルチミュオン事象への影響

を十分に分離できなくなることに起因すると考えられる。一方、lowest p_T に対する効率では、5 GeV 付近で効率の立ち上がりが不十分である。付録 C に示されるように、 p_T 閾値が 5 GeV のシングルミュオントリガーにおいて、そのトリガー効率が 5 GeV 付近で十分に立ち上がっておらず、本結果はその性能が反映されたものであると解釈できる。

トリミュオントリガーの効率は、最も効率が高い領域においておよそ 0.7 程度となっている。シングルミュオントリガーのトリガー効率を前提とすると、トリミュオントリガーの効率は $0.9 \times 0.9 \times 0.9 \sim 0.7$ 程度となることが期待される。トリミュオントリガーの効率においてもこの期待値と整合しており、トリミュオン事象であることに起因した顕著な効率の低下は示唆されない。

$\langle \mu \rangle = 200$

$\langle \mu \rangle = 200$ におけるトリミュオントリガーのトリガー効率を図 6.11 に示す。Overlap Removal を適用していない場合、Overlap Removal を適用した際に重複判定に p_T 閾値を含めない場合、および含めた場合の結果を重ねて描いている。

$\langle \mu \rangle = 200$ においても、Overlap Removal の適用有無によるトリミュオントリガー効率に有意な差は見られない。また、 $\langle \mu \rangle = 0$ の結果と比較しても、分布の形状および効率の大きさに顕著な違いは確認されない。

以上、パイラップ環境においても、トリミュオントリガーのトリガー効率について顕著な影響は見られないことが確認できた。

6.3.3 Overlap Removal における物理事象への影響評価

マルチミュオン事象に対するトリガー効率を評価した結果、Overlap Removal の適用によるトリガー効率への影響は全体として小さいことが示された。しかしながら、Overlap Removal がマルチミュオン事象を重複したミュオン候補であると誤って判定し除去してしまう可能性は存在する。そのため、本小節では Overlap Removal の適用によるマルチミュオン事象の除去率を評価する。Overlap Removal を適用しなかった場合にトリガー判定されていたマルチミュオン事象を基準とし、

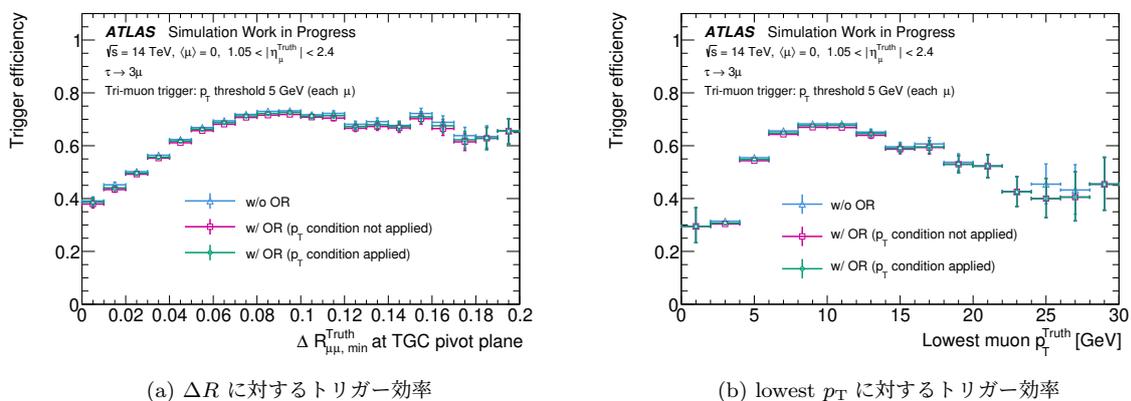


図 6.10: $\langle \mu \rangle = 0$ における $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルに対するトリミュオントリガーのトリガー効率。(a) ΔR に対する効率、(b) lowest p_T に対する効率を示している。青色は Overlap Removal を適用していない場合、ピンク色は p_T 閾値を重複判定条件として含めていない、緑色は含めた Overlap Removal を適用した場合である。

6.3. マルチミュオン事象への影響

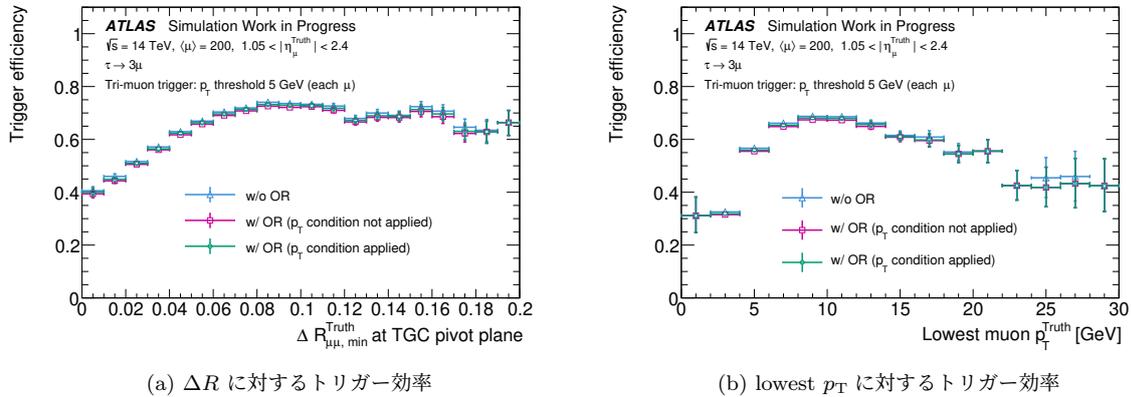


図 6.11: $\langle\mu\rangle = 200$ における $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルに対するトリミュオントリガーのトリガー効率。(a) ΔR に対する効率、(b) lowest p_T に対する効率を示している。青色は Overlap Removal を適用していない場合、ピンク色は p_T 閾値を重複判定条件として含めていない、緑色は含めた Overlap Removal を適用した場合である。

Overlap Removal の適用によって新たに失われる事象を評価対象とする。

ダークフォトンサンプルおよび $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルに対して、Overlap Removal によってどの程度の物理事象が除去されてしまっているのかを算出した。表 6.3 にその結果を示す。分母は Overlap Removal を適用しない場合にトリガー判定された物理事象であり、ダークフォトンサンプルに対してはダイミュオントリガー、 $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルに対してはトリミュオントリガーを対象としている。誤差は統計誤差のみを考慮している。

全体の傾向として、重複判定条件に p_T 閾値を含めない場合に除去率が高くなる。重複判定条件がより厳しくなることで、除去率が抑制される。また、いずれの物理サンプルにおいても $\langle\mu\rangle = 0$ と 200 の間で物理事象保持率に有意な差は見られず、Overlap Removal による物理事象の損失はパイルアップ条件に強く依存しないことが確認された。

ダークフォトンサンプルに対しては、パイルアップ条件および Overlap Removal の重複判定条件として p_T 閾値を含めるか否かに依らず、物理事象の除去率は 1% 未満であり、Overlap Removal の適用による影響は小さいことが確認された。

一方、 $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルに対しては、ダークフォトンサンプルより除去されやすく、2%程度の除去率が確認された。 $\tau \rightarrow 3\mu$ 事象では、3つのミュオンが生成されるために重複判定の対象となる組み合わせが3通りに増加する。また、図 6.4(c) および図 6.6(c) のそれぞれの物理サンプルの ΔR 分布を比較すると、 $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルのほうが ΔR が小さくなりやすい傾向が確認できる。これらの結果として、ダークフォトン事象と比較して除去率が高くなると考えられる。

6.3.4 複数の初段ミュオントリガー条件を併用したトリガー効率

前小節までの評価から、Overlap Removal の適用によりマルチミュオントリガーで一部の物理事象が除去されることが確認された。一方で、初段ミュオントリガーでは複数のミュオントリガー条件が並列に評価されており、いずれかの条件を満たした場合にその事象に対してトリガー判定がなされる。したがって、特定のトリガー条件において事象が取得されなかった場合であっても、他の

6.3. マルチミュオン事象への影響

表 6.3: ダークフォトンサンプルおよび $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプル に対する Overlap Removal の適用による物理事象を除去してしまう割合。ダークフォトンサンプルに対してはダイミュオントリガー、 $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルではトリミュオントリガーを対象としている。重複判定条件に p_T 閾値を含めなかった場合を p_T 閾値なし、含めた場合を p_T 閾値ありと表記している。

物理サンプルおよびトリガー		除去率	
		p_T 閾値なし	p_T 閾値あり
ダークフォトン (ダイミュオントリガー)	$\langle\mu\rangle = 0$	$0.5^{+0.1}_{-0.1} \%$	$0.3^{+0.1}_{-0.1} \%$
	$\langle\mu\rangle = 200$	$0.5^{+0.1}_{-0.1} \%$	$0.3^{+0.1}_{-0.1} \%$
$\tau \rightarrow 3\mu$ (トリミュオントリガー)	$\langle\mu\rangle = 0$	$2.3^{+0.1}_{-0.1} \%$	$1.3^{+0.1}_{-0.1} \%$
	$\langle\mu\rangle = 200$	$2.2^{+0.1}_{-0.1} \%$	$1.3^{+0.1}_{-0.1} \%$

ミュオントリガー条件を満たしていれば、初段トリガー段階においては事象が保持される。そこで本小節では、Overlap Removal 適用後のマルチミュオントリガーとシングルミュオントリガーを併用した場合の初段ミュオントリガーにおけるトリガー効率を評価する。

本評価では、より本番環境に近い環境で評価を行うために $\langle\mu\rangle = 200$ におけるシミュレーションサンプルを使用する。また、Overlap Removal の重複判定条件には p_T 閾値を含めない設定を用いる。この設定は、重複したミュオン候補をより広く除去するため、物理事象が失われやすい条件に相当する。Overlap Removal による影響を過小評価しない保守的な条件に基づいて検証を行う。

6.3.4.1 ダークフォトンサンプルに対する評価

まず、ダークフォトンサンプルに対して評価する。ダイミュオントリガーとシングルミュオントリガーを併用し、それらの論理和としてトリガー効率を算出する。このとき、シングルミュオントリガーには p_T 閾値として 20 GeV を要求する。いずれかのトリガー条件を満たした場合に、当該事象はトリガー判定されるものと仮定する。

算出したトリガー効率を図 6.12 に示す。いずれの結果からも、トリガー効率が高く維持できていることが分かる。

leading p_T および sub-leading p_T に対するトリガー効率では、シングルミュオントリガーによって高いトリガー効率が保たれている。シングルミュオントリガーでは、2つのミュオン事象のうちいずれか一方がトリガー条件を満たせばよいので、その効率は 0.95 程度と高い値を示す。

対して、leading p_T に対するトリガー効率の 20 GeV 付近において、ダイミュオントリガーの効率が一時的に低下している。この p_T 領域では、sub-leading p_T がダイミュオントリガーの p_T 閾値である 10 GeV を超える事象が相対的に少なくなっていることが確認されている。このため、当該領域においてダイミュオントリガーの対象となる事象が減少し、結果としてトリガー効率が低下しているものと考えられる。

ΔR に対するトリガー効率では、 ΔR が大きい領域においてダイミュオントリガーが支配的となる。 ΔR が大きい領域では、ミュオンの p_T が比較的低くなり、その結果としてシングルミュオン

6.3. マルチミューオン事象への影響

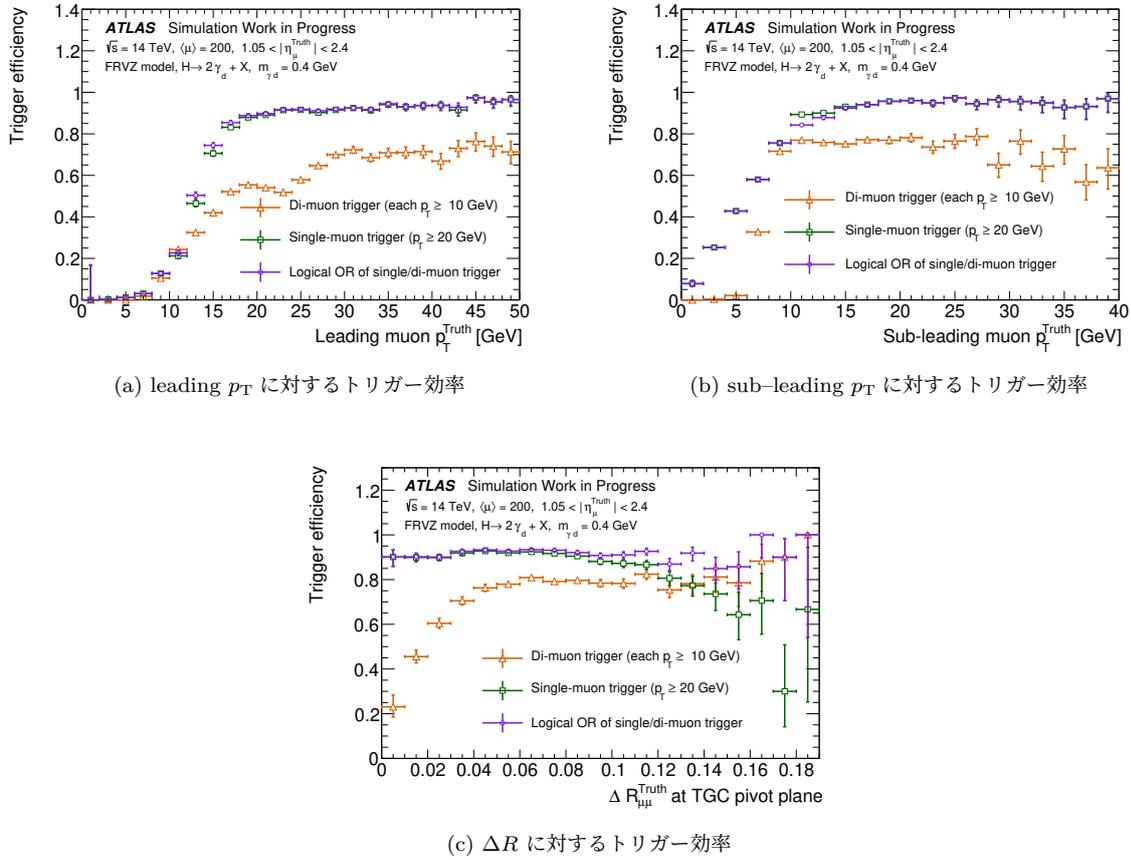


図 6.12: 論理和を取った際のダークフォトンサンプルに対するトリガー効率。(a) p_T に対する効率、(b) sub-leading p_T に対する効率、(c) ΔR に対する効率を示している。オレンジ色はダイミュオントリガー、緑色はシングルミュオントリガー、紫色はその論理和をとった値を示している。

トリガーのトリガー条件を満たしにくくなるためであると考えられる。ダイミュオントリガーとシングルミュオントリガーの補完関係により、全体としてトリガー効率を高く保つことができていることが分かる。

以上より、Overlap Removal 適用後においても、ダイミュオントリガーとシングルミュオントリガーを併用することで、ダークフォトンに対する初段ミュオントリガーの効率を高く維持できることが示された。

6.3.4.2 $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルに対する評価

次に、 $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルに対するトリガー効率を評価する。トリミュオントリガーとダイミュオントリガー、およびシングルミュオントリガーを併用し、それらの論理和としてトリガー効率を算出する。各トリガーの p_T 閾値はダークフォトンサンプルと同一であり、いずれかのトリガー条件を満たしたときに当該事象がトリガー判定されるものと仮定する。

算出したトリガー効率を図 6.13 に示す。 $\tau \rightarrow 3\mu$ においても、論理和を取ることで高いトリガー効率が維持できていることが分かる。

6.3. マルチミュオン事象への影響

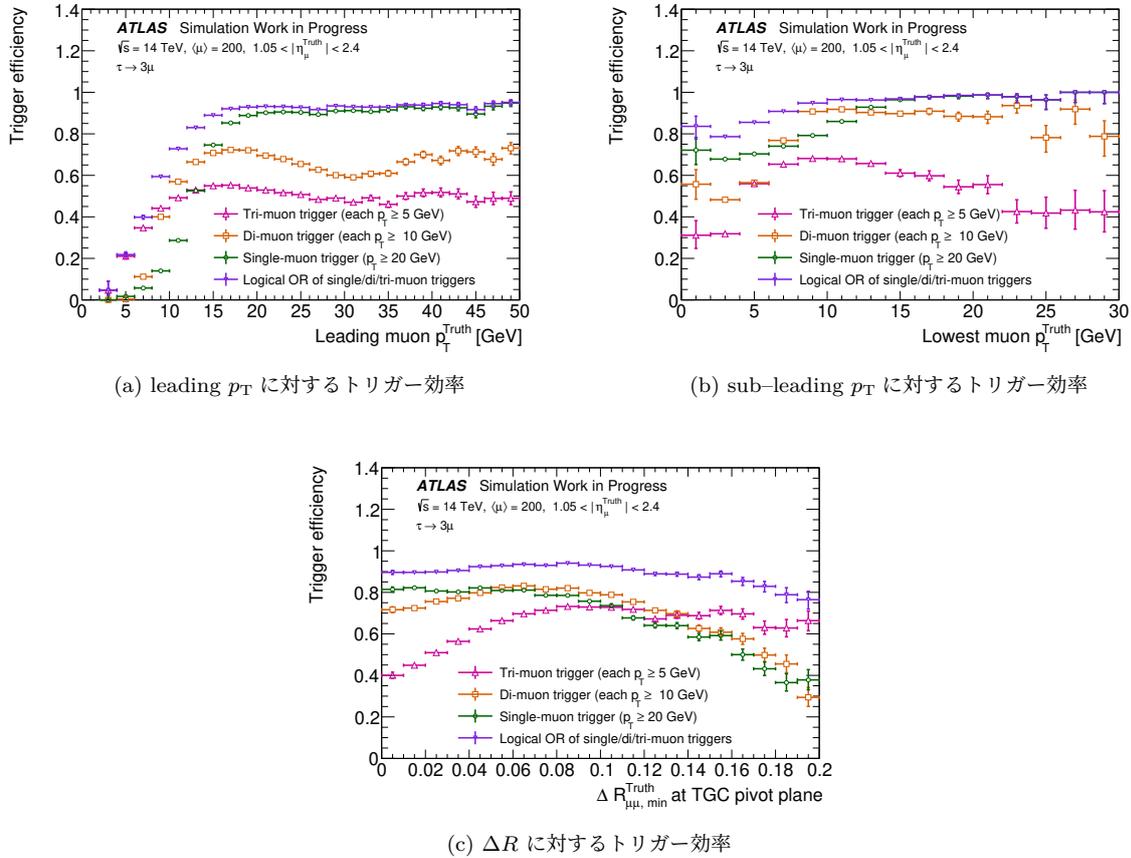


図 6.13: 論理和を取った際の $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルに対するトリガー効率。(a) p_T に対する効率、(b) sub-leading p_T に対する効率、(c) ΔR に対する効率を示している。ピンク色はトリミュオントリガー、オレンジ色はダイミュオントリガー、緑色はシングルミュオントリガー、紫色はその論理和をとった値を示している。

leading p_T および sub-leading p_T に対するトリガー効率では、シングルミュオントリガーが支配的であり、一方で ΔR が大きい領域ではトリミュオントリガーが支配的となる。これは、各トリガーが異なる事象トポロジーに対して補完的に機能していることを示している。

以上より、 $\tau \rightarrow 3\mu$ においても、マルチミュオントリガーとシングルミュオントリガーを併用することで、Overlap Removal 適用後においても初段ミュオントリガーの効率を高く維持できることが示された。

6.3.4.3 併用したトリガー効率における Overlap Removal の影響

前小節では、Overlap Removal 適用後においてもマルチミュオントリガーおよびシングルミュオントリガーを併用することで、各物理サンプルに対して高いトリガー効率が維持されることを示した。しかしながら、これらの結果はあくまで Overlap Removal を適用した条件下でのトリガー効率を示したものであり、Overlap Removal の適用そのものが複数の初段ミュオントリガー条件を併用した場合の挙動にどのような影響を与えるのかを評価したのではない。Overlap Removal は、空間的に近接した複数のミュオン候補を1つに集約するロジックであるが、マルチミュオントリガーの

6.3. マルチミュオン事象への影響

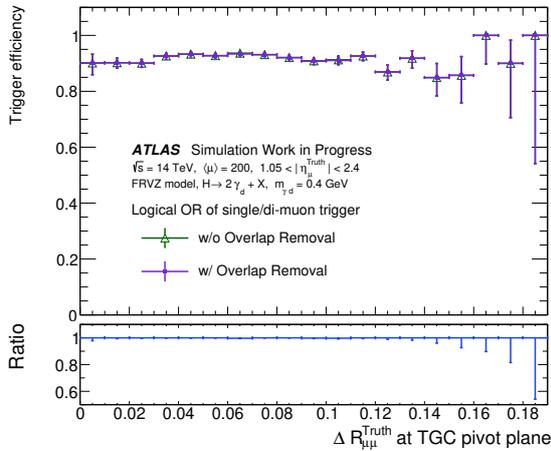


図 6.14: ダークフォトンサンプルに対する初段ミュオントリガーの論理和におけるトリガー効率の比較。緑色は Overlap Removal を適用していない場合、紫色は適用した場合を示す。下段は両者の比を示している。

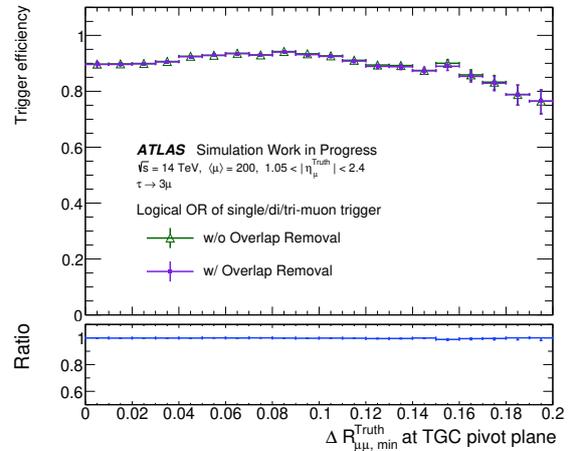


図 6.15: $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルに対する初段ミュオントリガーの論理和におけるトリガー効率の比較。緑色は Overlap Removal を適用していない場合、紫色は適用した場合を示す。下段は両者の比を示している。

みならずシングルミュオントリガーを含めた複数のトリガー条件に対しても、何かしらの影響を及ぼしている可能性は否定できない。したがって、単一のトリガー効率のみならず、複数のトリガー条件を論理和により併用した場合のトリガー効率が、Overlap Removal の適用によって低下していないかを確認する必要がある。

そこで本小節では、Overlap Removal の適用の有無による初段ミュオントリガー条件の論理和に対するトリガー効率を比較し、Overlap Removal が複数のトリガー条件を併用した際のトリガー効率に与える影響を評価する。特に、マルチミュオントリガーの性能差が最も顕著に現れる指標である ΔR に対するトリガー効率に着目して評価を行う。

ダークフォトンサンプルおよび $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルに対する比較結果をそれぞれ図 6.14 および図 6.15 に示す。いずれの物理サンプルにおいても、Overlap Removal 適用前後でのトリガー効率の比は、全ての ΔR 領域において概ね 1 に一致していることが確認された。Overlap Removal の適用が、初段ミュオントリガー条件を論理和で併用した場合のトリガー効率に対して有意な影響を与えていないことを示している。

以上より、Overlap Removal の適用は複数の初段ミュオントリガー条件を論理和で併用した場合においても、トリガー効率を有意に低下させないことが示された。

6.3.5 シミュレーション評価のまとめ

本節では、シミュレーションサンプルを用いて Overlap Removal を適用した初段エンドキャップミュオントリガーの性能評価を行った。

ダークフォトンサンプルおよび $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルのいずれにおいても、Overlap Removal の適用によるマルチミュオントリガー効率への影響は小さく、パイラアップ条件によらずトリガー効率は安定していることが確認された。一方で、 $\tau \rightarrow 3\mu$ サンプルでは物理事象の除去率が相対的に高くなる傾向

6.4. 実データを用いた性能評価

が見られた。これは、トリミュオン事象においてミュオン候補の数が増加することから、重複判定が行われる組み合わせが多くなるためであると考えられる。

さらに、マルチミュオントリガーとシングルミュオントリガーの論理和を取ることで、初段ミュオントリガー全体として高いトリガー効率が維持されることが確認された。Overlap Removal の適用の有無に依らず高いトリガー効率であり、Overlap Removal によって有意な影響を与えないことが示された。以上より、Overlap Removal の適用により重複したミュオン候補を除去しつつも、複数のトリガー条件を併用することで物理事象のトリガー効率を高く維持可能な、有用なロジックであることが示唆される。

次節では、これらのシミュレーションサンプルにおける結果を踏まえ、実データを用いた評価を行い、Overlap Removal の性能をより現実的な条件下で評価する。

6.4 実データを用いた性能評価

前節までに、シミュレーションサンプルを用いた評価を行った。しかし、シミュレーション評価には限界があることから、検出器応答や背景事象を含む実際のデータ取得環境における挙動についても検証する必要がある。

そこで本節では、2024 年の Run 3 において実際に取得された陽子-陽子衝突データを用いて、Overlap Removal の性能評価を行う。Run 3 における実データを高輝度 LHC-ATLAS 実験に向け開発が進められている初段エンドキャップミュオントリガーのトリガーロジックに適用することで、実運転条件下における Overlap Removal の挙動およびトリガー性能への影響を検証する。

本節では、Overlap Removal の重複判定条件に p_T 閾値を含めた設定を用いる。前節までのシミュレーション評価により、 p_T 閾値を重複判定条件に含めることで物理事象の除去が抑制されることが示されている。Overlap Removal は重複したミュオン候補というトリガー処理における冗長性を低減することを目的とするが、物理的に重要な事象を除去することは望ましくないため、より保守的な条件を採用する。

本解析で使用した実データの主なデータ取得条件を表 6.4 に示す。重心系エネルギー 13.6 TeV であり、ピーク瞬間ルミノシティは $\sim 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、積分ルミノシティは 8.07 fb^{-1} である。

表 6.4: 本解析で使用した実データの主なデータ取得条件

パラメータ	値
データ取得年 (Run)	2024 年 (Run 3)
使用 Run number	476760-486224 (非連続)
重心系エネルギー	13.6 TeV
積分ルミノシティ	8.07 fb^{-1}
平均衝突数 $\langle \mu \rangle$	55
ピーク瞬間ルミノシティ	$2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

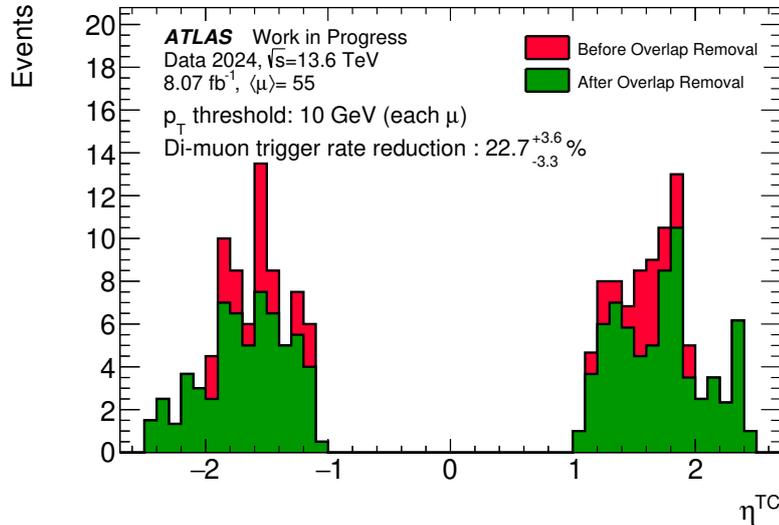


図 6.16: Run 3 の実データを用いたダイミュオントリガーのトリガー発行数の変化。赤色は Overlap Removal 適用前、緑色は適用後においてダイミュオントリガーが発行されたイベント数を示す。

6.4.1 トリガーレートへの影響

Overlap Removal の適用によるトリガーレート削減効果を評価し、どの程度のレート低減が見込めるのかを見積もった。トリガーレートを概算するにあたり、トリガーバイアスの影響を排除するため、 p_T 閾値が 3 GeV に設定されたバイアスのないトリガーである HLT_noalg_L1MU3V が発行されたイベントのみを解析対象とした。これらのイベントのうち、2つ以上のミュオン候補が再構成された場合にダイミュオントリガーが発行されたと定義し、Overlap Removal 適用前後でのトリガー発行数を比較した。なお、本評価では各ミュオン候補に対する p_T 閾値として 10 GeV を要求している。

Overlap Removal 適用前後におけるダイミュオントリガーの発行数を図 6.16 に示す。Overlap Removal の適用することで、ダイミュオントリガーの発行数が減少していることが分かる。これらの発行数の比較から、トリガーレートは $22.7^{+3.6}_{-3.3}$ % 低減されると見積もられる。ここで示す誤差は、統計誤差のみを考慮したものである。また、本解析はエンドキャップ領域に限定して行った結果である。

以上より、Overlap Removal の導入によって、初段エンドキャップミュオントリガーにおけるトリガーレートを有意に削減できることが期待される。

6.4.2 $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ を用いた物理損失の評価

次に、マルチミュオン事象が Overlap Removal によって誤って除去される割合を評価した。本解析では、代表的なダイミュオン事象として $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ 事象を用いた。

TGC 検出器のヒット情報から再構成されたダイミュオン事象のうち、オフライン再構成情報とのマッチングを行い、 $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ 由来であると考えられる事象を選択した。オフラインミュオンには、物理解析での使用を想定して定義されたミュオン選別基準 (MCP recommendation) を満たし、かつ

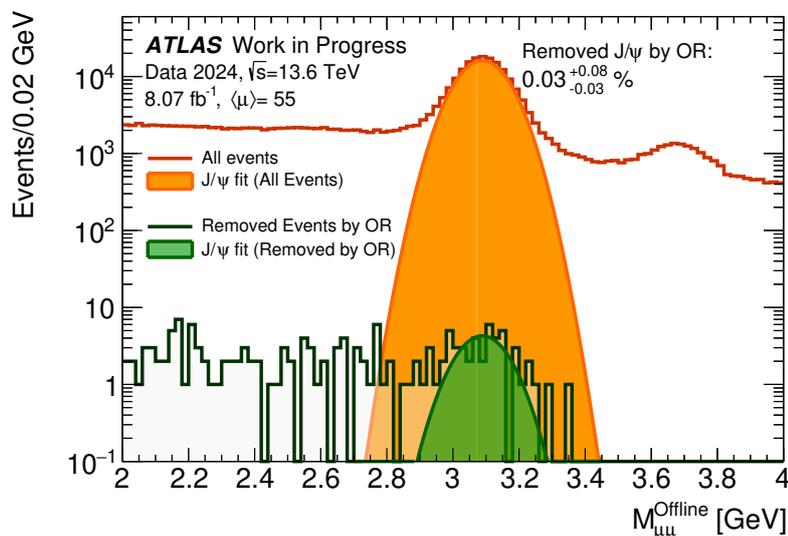


図 6.17: Run 3 のデータを用いて評価した Overlap Removal による $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ 除去率。オレンジ色の領域が初段エンドキャップミュオントリガーによって再構成された J/ψ の質量を持つ事象であり、緑色の領域がそのうち Overlap Removal によって除去された事象である。

内部飛跡検出器とミュオンスペクトロメータの情報を組み合わせて再構成された Combined Muon であることを要求した。また、ダイミュオンの不変質量 $M_{\mu\mu}$ が $2.7 \text{ GeV} < M_{\mu\mu} < 3.45 \text{ GeV}$ の範囲にある場合に J/ψ 候補事象であると定義した。

選択された J/ψ 候補事象に対して、Overlap Removal により除去されるイベント数を評価した結果を図 6.17 に示す。図中のオレンジ色の領域は再構成された J/ψ 候補事象全体を示し、緑色の領域はそのうち Overlap Removal によって除去された事象を表している。質量分布のフィッティングでは、サイドバンド領域に対して指数関数を用い、 J/ψ 信号領域に対しては double-sided Crystal Ball 関数を用いた。

その結果、Overlap Removal によって誤って除去される J/ψ 事象の割合は $0.03^{+0.08}_{-0.03} \%$ と見積もられた。ここで示す誤差は、統計誤差のみを考慮したものである。

先行研究における検証として、Run 3 における従来の Overlap Removal では、 J/ψ 事象の除去割合は約 0.2 % と報告されている [46]。この値と比較して、本研究で開発した Overlap Removal は、ダイミュオン事象の誤った除去をより低く抑えていることが示された。

6.5 性能評価のまとめと今後の改善点

以上の評価から、本研究で開発した重複ミュオン候補除去ロジック Overlap Removal は、シミュレーションサンプルおよび実データの双方において、重複したミュオン候補を除去できることが確認された。

シミュレーションサンプルを用いた評価では、ダークフォトン事象および $\tau \rightarrow 3\mu$ 事象に対して、Overlap Removal の適用によるマルチミュオントリガー効率への影響が全体として小さいことが示

6.5. 性能評価のまとめと今後の改善点

された。また、Overlap Removal によって一部の物理事象が除去されることが確認され、特に $\tau \rightarrow 3\mu$ 事象に対しては除去率が相対的に高くなる傾向が見られた。これは、3つのミュオンが生成されることから、重複判定の対象となる組み合わせが増加するためであると考えられる。一部の物理事象が除去されてしまう効果が見えた一方で、シングルミュオントリガーとの併用により、初段ミュオントリガー全体としては高いトリガー効率が維持されることを確認することができた。

さらに、実データを用いた評価においては、Overlap Removal の適用によりダイミュオントリガーのトリガーレートが有意に削減できることが確認された。Overlap Removal が実運転条件下においてもトリガーロジックの冗長性を低減可能であることを示すことができた。

重複判定条件として p_T 閾値を含めることで物理事象の除去率を抑制できることが確認されたが、重複したミュオン候補の除去性能との間にはトレードオフの関係が存在することも示唆された。また、本研究では4段階の p_T 閾値を用いて評価を行ったが、実運用では16段階の p_T 閾値が実装される予定である。 p_T 閾値の段階数が増加することで重複判定条件の設定自由度は高まるが、それがOverlap Removal の性能にどのような影響を与えるかについては、現時点では定量的な評価が十分ではない。今後、 p_T 閾値の段階数増加によって、重複除去性能および物理事象保持に及ぼす影響を検証し、その結果から重複判定条件を決定していく必要がある。

さらに、現状では全ての $1/24$ セクターに対して共通の重複判定条件を適用しているが、TGC 検出器には理想配置からのずれが存在することが報告されている [50]。このような配置ずれは、トリガーセクター間のオーバーラップ領域の形状や大きさに影響を与え、Overlap Removal の判定性能に影響を及ぼす可能性がある。したがって、検出器配置のずれがオーバーラップ領域および重複判定性能に与える影響をケーススタディとして評価し、 $1/24$ セクターごとに最適化が必要かどうかを検討することが今後の重要な課題である。

第 7 章

結論と展望

本研究では、2030 年より運転開始が予定されている高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けて、初段エンドキャップミュオントリガーにおける重複ミュオン候補除去ロジック Overlap Removal の開発を行い、実運用を見据えたトリガーロジックであることを示した。

初段エンドキャップミュオントリガーでは、TGC BW 検出器の幾何構造およびトリガー処理単位に起因して、単一のミュオンが複数のトリガーセクターで独立に再構成されることにより、ミュオン候補が重複して生成されてしまう。これらの重複したミュオン候補の持つ特徴を明らかにし、トリガーで利用可能な情報である、各候補が持つ位置情報 (η, ϕ) および運動量閾値の情報を用いることで重複判定が可能であることを示した。この結果に基づき、重複ミュオン候補を排除するための判定アルゴリズムを構築した。

次に、開発したアルゴリズムを初段エンドキャップミュオントリガーに実装するため、FPGA 上で動作可能なファームウェアを開発した。重複判定に必要な演算を、複雑な演算処理や大容量メモリを用いることなく実現し、トリガー要件を満たす設計とした。Vivado を用いた合成およびタイミング解析、ならびにテストベンチによる検証を通じて、リソース量およびタイミング制約の観点から実装可能であることを確認した。

さらに、シミュレーションサンプルおよび実データを用いて Overlap Removal の性能評価を行った。シングルミュオン事象を用いた評価により、重複したミュオン候補を高い効率で除去可能であることを示した。また、マルチミュオン事象を含むサンプルを用いた評価により、物理事象に対するトリガー効率への影響が小さいことを確認した。一方で、空間的に近接したマルチミュオン事象においては、一部が重複判定される可能性があることも明らかになった。ただし、トリガー効率への影響は小さくとどまっており、トリガー性能の有意な低下は見られなかった。実データを用いた評価では、Overlap Removal の実装によりトリガーレートの削減が見込めること、ならびに J/ψ 事象に対する損失が小さいことを示した。これらの結果から、Overlap Removal が初段エンドキャップミュオントリガーにおける重複ミュオン候補除去ロジックとして有効に機能することを示した。本解析においては、高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けて開発が進められている初段エンドキャップミュオントリガーのマルチミュオントリガーに対する性能を初めて定量的に示した。

今後の展望として、重複判定条件に p_T 閾値をどのように組み込むかについて詳細な検討を行う必要がある。本研究では 4 段階の p_T 閾値を用いたが、実際の運用では 16 段階の p_T 閾値が実装される予定であり、閾値の細分化に伴う重複判定性能およびマルチミュオン事象への影響を系統的に評価する必要がある。また、TGC BW 検出器の理想的な配置とのずれが Overlap Removal の性能に与える影響を評価し、1/24 セクターごとに重複判定条件を最適化する必要性についても検討が求められる。

加えて、初段エンドキャップミュオントリガー以外の領域への Overlap Removal の適用も今後の課題である。1/24 セクター間のオーバーラップ領域や、TGC 検出器と RPC 検出器のオーバーラッ

領域においても重複したミュオン候補が生成されるため、本研究で確立した重複判定の考え方を基にしつつ、MUCTPI の入力情報および処理単位に適した新たなロジック設計を行う必要がある。これらの重複除去ロジックを MUCTPI に実装することで、初段ミュオントリガー全体としての重複除去性能の向上が期待される。

本研究を通じて、初段エンドキャップミュオントリガーにおける重複したミュオン候補除去ロジックの設計から実装、性能評価までを一貫して行い、トリガーロジックとして成立することを示した。本研究で得られた知見は、高輝度 LHC-ATLAS 実験における初段エンドキャップミュオントリガーの高精度化に貢献するものである。

付録 A

重複したミュオン候補の傾向

重複ミュオンの傾向を確認する際、最初は物理量を実数表現のまま確認していた。その場合における、Endcap-Endcap 領域と Endcap-Forward 領域における $\Delta\eta^{\text{TC}}$ および $\Delta\phi^{\text{TC}}$ の分布をそれぞれ図 A.1、図 A.2 に示す。bit 表現で確認した際の結果と大きく異なるのは、図 A.1(b) の Endcap-Endcap 領域における $\Delta\phi$ の分布である。イベントが集中しているピンは大きく 2 箇所あり、その境界はトリガーチェンバーの境界上であることが確認できる。ここから、トリガーチェンバーによって重なり具合が異なることが分かる。bit 表現した際には見えない傾向が実数表現で見ただけには観測することができる。

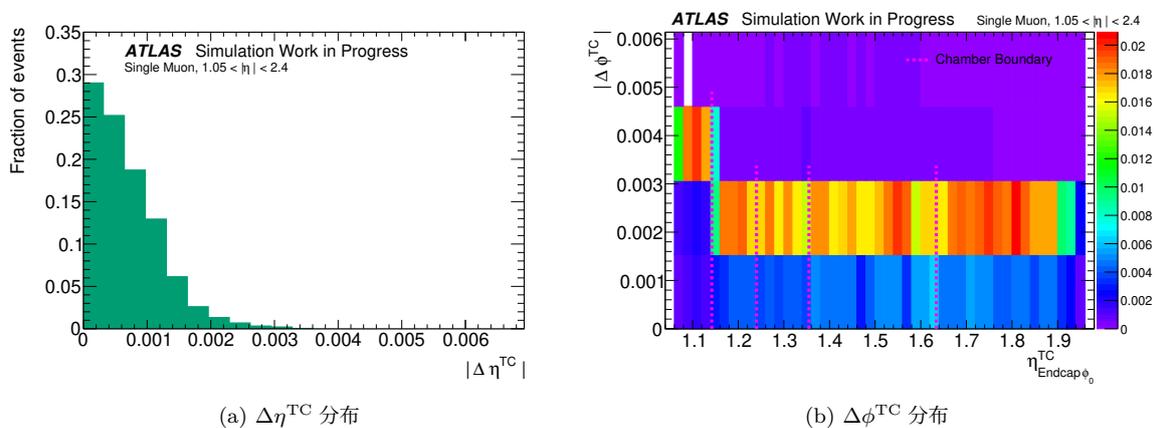


図 A.1: Endcap-Endcap 領域における重複ミュオン候補の $\Delta\eta$ と $\Delta\phi$ 、 p_T 閾値の差の分布

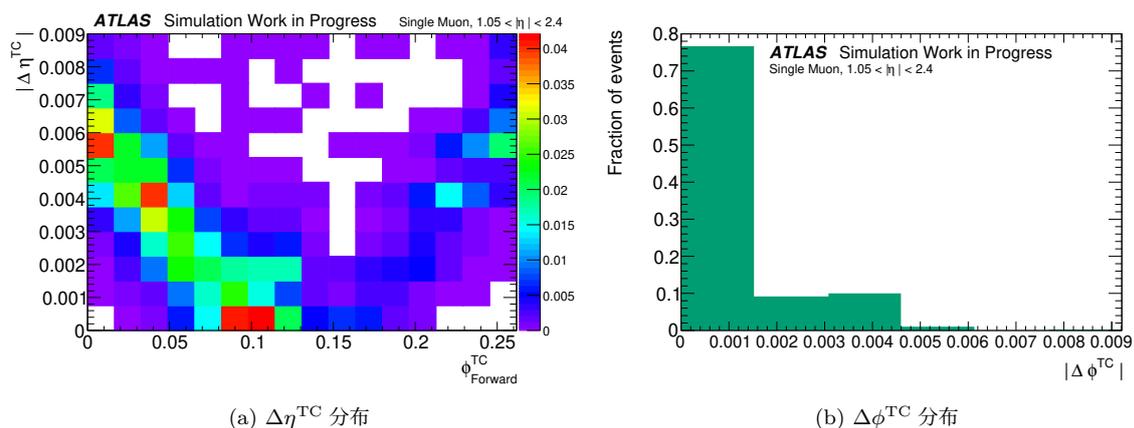


図 A.2: Endcap-Forward 領域における重複ミュオン候補の $\Delta\eta$ と $\Delta\phi$ 、 p_T 閾値の差の分布

付録 B

TGC BW の幾何構造

TGC BW のトリガーセクターは、不感領域が生じないように一部が互いに重なる幾何構造を持つ。本研究で評価した重複したミュオン候補の分布に見られる非対称性は、この幾何構造に強く依存している。本付録では、TGC BW におけるトリガーセクターの配置と重なり方を整理し、本文で示した分布の特徴を理解するための幾何学的背景を示す。

TGC 検出器は隣り合うトリガーセクターを z 方向にずらすことで重なる配置をとる。エンドキャップセクターは 48 枚、フォワードセクターは 24 枚存在し、1/24 セクターを単位とするとトリガーセクターの配置のされ方は 2 通り存在する。図 B.1 に示すように、フォワードセクターの z 方向の位置エンドキャップセクターに対して

- 内側に位置する場合
- エンドキャップセクター間に位置する場合

である。本付録では、これら 2 通りの配置を便宜的に A01/C01 型および A02/C02 型と呼ぶ。これらの違いによって、TGC BW の M1、M2 および M3 におけるトリガーセクター同士の重なり方に違いが生じる。以下では、それぞれの型の特徴を説明する。

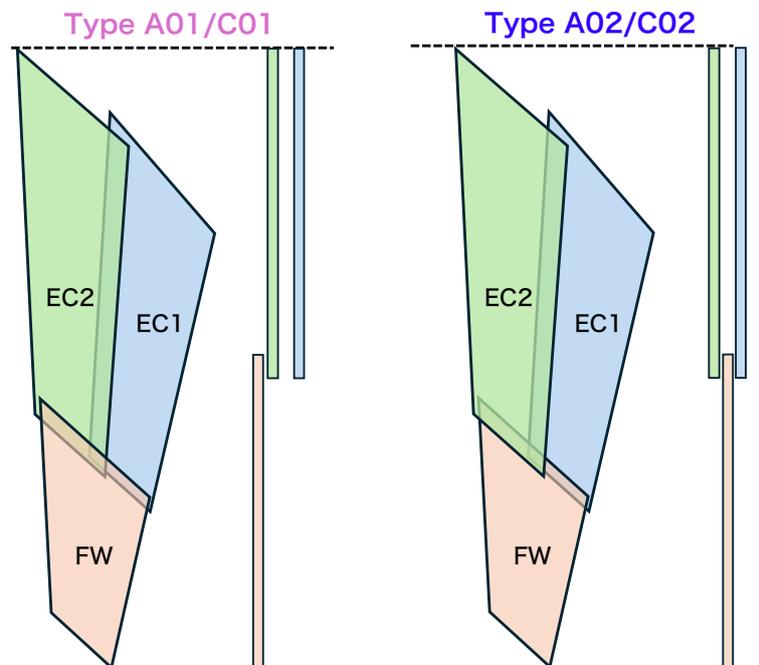


図 B.1: 1/24 セクター単位で見たときのトリガーセクターの重なり方。ここでは識別のため、A01/C01 型と A02/C02 型と呼ぶ。

まず、図 B.2 に $R-z$ 平面で見たときに、各トリガーセクターが z 方向にどの程度離れているのか、 R 方向にどの程度重なっているのかを表した図を示す。どちらの型においても R 方向の重なりは同一である一方、トリガーセクター間の z 方向の相対位置が型によって異なることが分かる。

続いて、それぞれの型において、この z 方向のずれがどのような影響を及ぼすのかを確認する。エンドキャップチェンバーとフォワードセクターが M1 から M3 ステーションにかけてどの程度 η 方向に重なっているのかを示す。本付録では、エンドキャップセクターとフォワードセクターが全ステーションにわたって共通に覆う η 方向の範囲を、 η 方向の重なりと定義する。図 B.3 および図 B.4 に A01/C01 型および A02/C02 型における η 方向の重なりを表した図を、表 B.1 それぞれの η 方向の重なりをまとめたものを示す。

表 B.1 に示すように、A01/C01 型および A02/C02 型それぞれにおいて、エンドキャップセクターとフォワードセクターの η 方向の重なりは異なる。特に、A02/C02 型のエンドキャップセクター 2 とフォワードセクターの組み合わせでは、 η 方向の重なりが 0.001 と極めて小さい。このような場合、オーバーラップ領域も小さくなることから、重複したミュオン候補が生じにくくなる。第 4.2 節における図 4.5 において、 $\Delta\eta^{\text{TC}}$ 分布のイベント数に差が生じているのは、この幾何学的な重なりの違いに起因するものである。

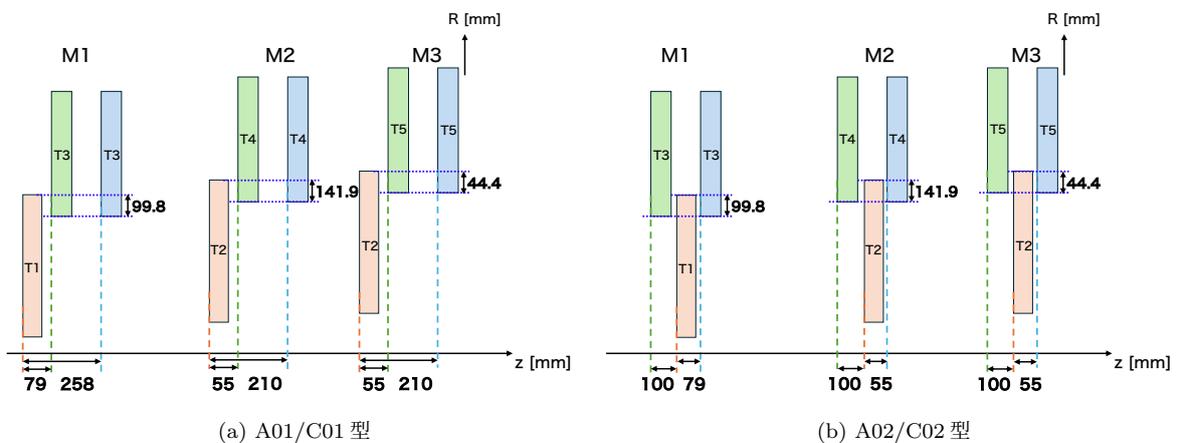


図 B.2: それぞれの型における $R-z$ 平面図。

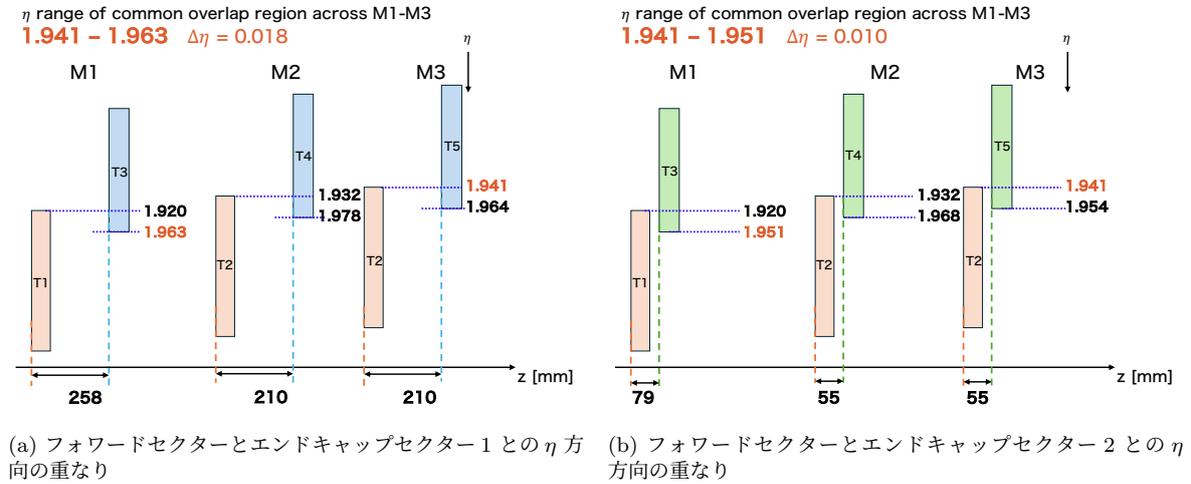


図 B.3: A01/C01 型における η 方向の重なり。

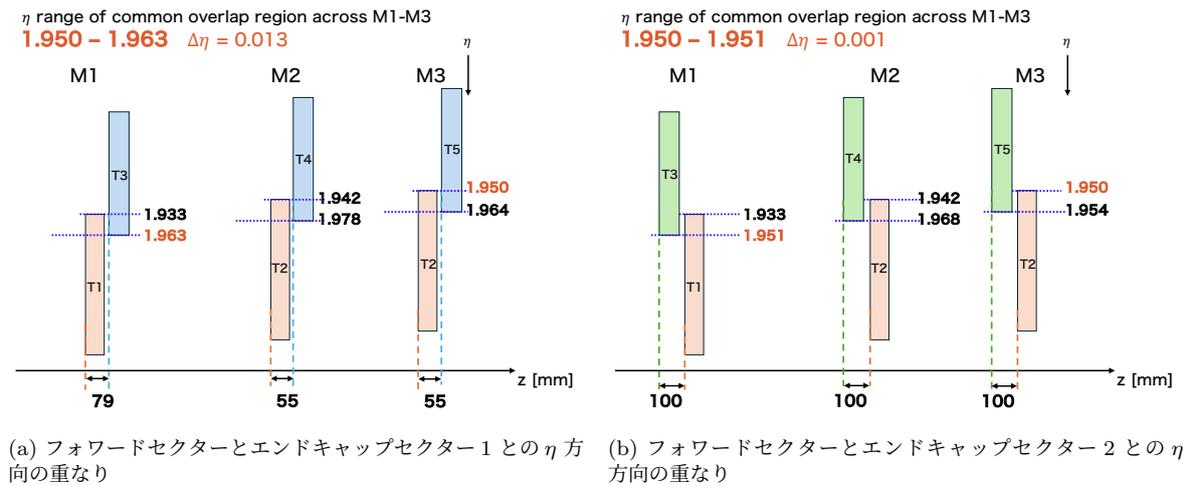


図 B.4: A02/C02 型における η 方向の重なり。

表 B.1: それぞれの型のフォワードセクターとエンドキャップセクターの η 方向の重なり。

型	η の重なり幅	
A01/C01 型	EC1-FW	0.018
	EC2-FW	0.010
A02/C02 型	EC1-FW	0.013
	EC2-FW	0.001

付録 C

シングルミュオントリガーのトリガー効率

マルチミュオントリガーのトリガー効率を評価する際には、シングルミュオントリガーの性能を参考にすることが有用であると考えられる。マルチミュオン事象において、各ミュオンが独立にトリガー条件を満たすと仮定した場合、シングルミュオントリガーの効率からマルチミュオントリガーの効率を概算することができる。この期待値との比較により、マルチミュオン事象であることに起因した効率低下の有無を評価することが可能である。

本研究では参考値として、Run 4 環境におけるパイルアップなしのシングルミュオンサンプルを使用して、シングルミュオントリガーのトリガー効率を評価した。この際、Overlap Removal は適用していない。

それぞれの p_T 閾値におけるシングルミュオントリガーのトリガー効率を図 C.1 に示す。全ての p_T 閾値において、プラトー領域におけるトリガー効率は 0.9 程度であることが確認できる。また、各 p_T 閾値付近で効率が立ち上がる挙動が確認できるが、 p_T 閾値が 5 GeV の場合には、5 GeV 付近で十分に立ち上がらず、10 GeV 付近でプラトーに達していることが分かる。

マルチミュオントリガーのトリガー効率は、このようなシングルミュオントリガーの効率特性が反映された結果であると理解できる。

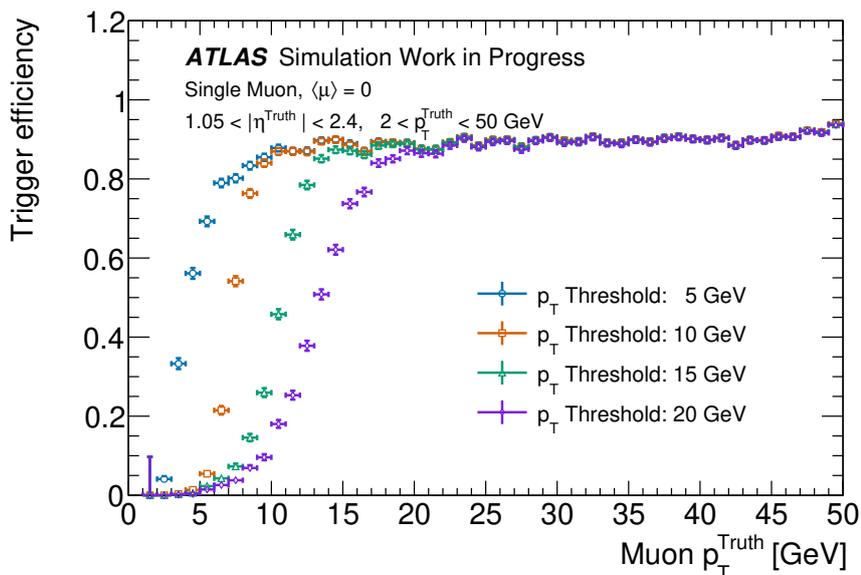


図 C.1: シングルミュオントリガーのトリガー効率。それぞれの p_T 閾値について、青色が 5 GeV、オレンジ色が 10 GeV、緑色が 15 GeV、紫色が 20 GeV を示している。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にお世話になりました。はじめに、外部からの大学院進学である私を快く受け入れてくださった粒子物理学研究室の皆さまに、深く感謝いたします。

指導教員である前田順平准教授には、本研究を通じて多大なるご指導を賜りました。研究内容に関する助言にとどまらず、日々のミーティングや発表資料の作成に至るまで、丁寧にご指導いただきました。夜遅くまで議論を重ねることや、休日に相談をさせていただくこともありましたが、博士課程前期課程の二年間を通じて、研究者として多くの学びを得ることができました。また、CERN への出張の機会を与えていただき、国際共同実験の現場を経験できたことは、本研究を進めるうえでも非常に貴重な経験となりました。心より感謝申し上げます。

また、神戸 ATLAS グループの藏重久弥教授、山崎祐司教授には、研究方針に関する助言をはじめ、ミーティングの場において多くのご指摘をいただきました。研究の方向性に迷った際にも適切な助言をいただき、それを基に研究を進めることができました。藏重久弥教授には、入学当初より外部入学である私を気にかけていただき、研究生生活を進めるうえで大きな支えとなりました。山崎祐司教授には、KEK サマーチャレンジにおけるアシスタントの機会をいただき、自身の経験を広げる貴重な機会となりました。あわせて、同研究室の竹内康雄教授、身内賢太郎教授、鈴木州講師、伊藤博士講師、東野聡特命助教にもお世話になりました。コロキウムや研究室生活を通じて、様々なご指導とお力添えをいただきました。秘書の北川順子様には、出張申請等の事務手続きを丁寧かつ迅速にご対応いただき、円滑に研究活動を行うことができました。深く御礼申し上げます。

ATLAS Japan グループに所属する、奥村泰幸准教授、齋藤智之助教、堀井泰之准教授、青木雅人研究機関講師、須江祐貴博士研究員、山口洋平助教をはじめとした多くの皆様にも、大変お世話になりました。定例ミーティングや学会発表レビューの場において、私の研究発表に対して多くのご指摘・ご提案をいただきました。それらは、自身では気づくことのできなかつた多くの視点を与えてくださり、研究を進めるうえで大きな助けとなりました。皆様の多大なるご支援に感謝申し上げます。

研究室の同期および同実験の先輩方にも、多くの感謝を申し上げます。博士課程前期課程を通じて、研究に関する議論から日常の何気ない会話まで、多くの時間を共有しました。それぞれの存在が、研究生生活を続けるうえで大きな支えとなっていました。張力君、佐倉慶汰君、佐野友麻君、山口凜太郎君、浅見優輝君、笹田真宏君とは、同じ ATLAS グループとして研究に取り組み、共に成長することができたと感じております。張力君は、日本や CERN での生活において高い適応力とコミュニケーション能力を発揮しており、その姿勢に対して見習いたいと常々感じておりました。佐倉慶汰君は、学会発表前や修論執筆などで忙しくなる時期においても、粘り強く研究に取り組む姿が印象的であり、その姿勢に刺激を受け、自身の気持ちを奮い立たせることができました。佐野友麻君からは、日常のやり取りを通じて多くの場面で笑顔をもらいました。また、シミュレーションサンプルの作成方法について相談に乗っていただき、その助言のおかげで修論提出に間に合わせることができました。山口凜太郎君は、研究室内の雰囲気をも明るくする存在であり、また、同じ TGC グループとして共に学び合うことができたと感じております。浅見優輝君は、休日にも研究室に足を運び研究に取り組む姿が印象的であり、自身の研究への意欲を高める大きな刺激となりました。笹田真宏君は、ソフトウェア分

野において高い技術力を有しており、多くの点で見習うべき存在でした。私自身もソフトウェア分野に強い関心を持っているため、今後もご助言をいただきたいです。皆さまとは時に貶し合い、時に競い合い、非常に充実した時間を過ごせたと思います。また、他実験ではありましたが、同研究室の同期である和田伸一郎君、曾根貴将君、谷口紘大君、鈴木啓司君にも感謝申し上げます。ソフトボール大会や講義、飲み会などを通じて、多くの時間を共有することができました。和田伸一郎君は、常に元気に研究室生活を送っており、その様子から自身も多くの活力をもらいました。曾根貴将君は、日常のやり取りを通じて研究室の雰囲気明るくしてくれる存在であり、多くの場面で笑顔をもらいました。谷口紘大君は、独自の視点や言葉選びが印象的でした。そのセンスは失わないでください。鈴木啓司君は、常に優秀な成績であり、研究に対する真摯な姿勢から、多くを学ばせていただきました。皆さまと同期として同じ研究室で過ごすことができたことを、心より感謝しております。さらに、他大学ではありますが、ATLAS 実験 TGC グループの同期である田上理沙子さん、水落永遠君、大坪航君、牧和真君、糺翔太君、千葉公太郎君、間仁田省吾君にも感謝申し上げます。同じ実験グループに所属する同期の存在は、大変心強いものでした。改めまして皆さまに感謝の意を表します。

また、同研究室の先輩方には、多くの場面でお世話になりました。水引龍吾さんには、ファームウェアに関する技術的な助言をはじめとした研究での支援、加えて CERN 滞在中のサポートに至るまで、大変お世話になりました。この二年間、非常に心強い存在でした。高橋真斗さんには、研究や進学に関する相談を通じて多くの助言をいただきました。外部入学の私を気にかけてくださりたくさん話しかけていただいことも、嬉しかったです。博士課程前期課程の初めの一年間ではありますが、村田優衣さんにも多くの面で支えていただきました。その研究への姿勢は、同じ実験に参加する者として大いに学ぶべきものでした。

CERN 滞在時には、多くの先輩方およびスタッフの皆様にお世話になりました。古川真林さん、山下恵理香さん、長坂錬さん、成川佳史さん、牧田藍瑠さん、近藤翔太さん、伊藤紘貴さん、泉山将大さん、大隅悠矢さん、橋本大輔さん、和田有咲さん、河本地弘さん、中川徹郎さんをはじめ、多くのご支援をいただきました。皆様のご助言やご配慮のおかげで、貴重な滞在期間を研究・生活の両面において充実したものにすることができました。ハイキングやバーベキュー、そして共に見上げた満天の夜空は今でも強く印象に残っています。多くの方々とは来年度以降も研究を通じて関わっていくことになると思います。今後とも何卒よろしくお願い申し上げます。

最後に、これまでの人生を通じて私を支えてくれた家族に感謝いたします。学部から修士、そして博士課程への進学に至るまで私の選択を尊重し、変わらず支えてくれました。ここに感謝の意を表して、謝辞といたします。

参考文献

- [1] I. Neutelings, Standard Model Particles (TikZ figure) Accessed: 2025-11-20.
https://tikz.net/sm_particles/.
- [2] Particle Data Group, Review of particle physics *Phys. Rev. D* **110** No. 3(2024) 030001.
- [3] ATLAS Collaboration, Evidence for the Dimuon Decay of the Higgs Boson in pp Collisions with the ATLAS Detector *Phys. Rev. Lett.* **135** (2025) 231802.
- [4] ATLAS Collaboration, Combined measurements of Higgs boson production and decay using up to 139 fb^{-1} of proton-proton collision data at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ collected with the ATLAS experiment ATLAS-CONF-2021-053, CERN, 2021.
- [5] A. J. Buras, Flavour Changing Neutral Current Processes 1996.
<https://arxiv.org/abs/hep-ph/9610461>.
- [6] Particle Data Group, Review of Particle Physics *Phys. Rev. D* **98** (2018) 030001.
- [7] ATLAS Collaboration, Study of the rare decays of B_s^0 and B^0 mesons into muon pairs using data collected during 2015 and 2016 with the ATLAS detector *J. High Energy Phys.* **2019** No. 4(2019) 98.
- [8] CMS Collaboration, Measurement of properties of $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decays and search for $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ with the CMS experiment *J. High Energy Phys.* **2020** No. 4(2020).
- [9] LHCb Collaboration, Measurement of the $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ Branching Fraction and Effective Lifetime and Search for $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ Decays *Phys. Rev. Lett.* **118** (2017) 191801.
- [10] ATLAS, CMS and LHCb Collaborations, Combination of the ATLAS, CMS and LHCb results on the $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decays CMS-PAS-BPH-20-003, LHCb-CONF-2020-002, ATLAS-CONF-2020-049, CERN, 2020.
- [11] CMS Collaboration, Measurement of the $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decay properties and search for the $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decay in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ *Phys. Lett. B* **842** (2023) 137955.
- [12] LHCb Collaboration, Measurement of the $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decay properties and search for the $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ and $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$ decays *Phys. Rev. D* **105** No. 1(2022) 012010, [arXiv:2108.09283](https://arxiv.org/abs/2108.09283).
- [13] Kamiokande-II Collaboration, Experimental Study of the Atmospheric Neutrino Flux *Phys. Lett. B* **205** (1988) 416.
- [14] P. Blackstone, M. Fael, E. Passemar, $\tau \rightarrow \mu\mu\mu$ at a rate of one out of 10^{14} tau decays? *Eur. Phys. J. C* **80** No. 6(2020) 506.
- [15] ATLAS Collaboration, Probing lepton flavour violation via neutrinoless $\tau \rightarrow 3\mu$ decays with the ATLAS detector *Eur. Phys. J. C* **76** No. 5(2016) 232, [arXiv:1601.03567](https://arxiv.org/abs/1601.03567).
- [16] CMS Collaboration, Search for the lepton flavor violating $\tau \rightarrow 3\mu$ decay in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ *Phys. Lett. B* **853** (2024) 138633, [arXiv:2312.02371](https://arxiv.org/abs/2312.02371).

-
- [17] Belle-II Collaboration, Search for lepton-flavor-violating $\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-$ decays at Belle II *J. High Energy Phys.* **09** (2024) 062, [arXiv:2405.07386](https://arxiv.org/abs/2405.07386) [hep-ex].
- [18] ATLAS Collaboration, Identification of very-low transverse momentum muons in the ATLAS experiment *PoS ICHEP2018* (2019) 857.
- [19] CERN, High Luminosity LHC Project. <https://hilumilhc.web.cern.ch/content/hl-lhc-project>.
- [20] O. Brüning and M. Zerlauth, LHC operation and the High-Luminosity LHC upgrade project 2025. <https://arxiv.org/abs/2505.03535>.
- [21] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the Phase-II Upgrade of the ATLAS TDAQ System CERN-LHCC-2017-020, ATLAS-TDR-029, CERN, 2017.
- [22] ATLAS Collaboration, Phase-1 ATLAS Level-1 Trigger in Run-3 ATL-DAQ-PROC-2024-013, CERN, 2024.
- [23] ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider *JINST* **3** (2008) S08003.
- [24] ATLAS Collaboration, The ATLAS experiment at the CERN Large Hadron Collider: a description of the detector configuration for Run 3 *JINST* **19** No. 05(2024) P05063, [arXiv:2305.16623](https://arxiv.org/abs/2305.16623).
- [25] ATLAS Collaboration, ATLAS Open Data: Introduction Accessed: 2026-01-20. https://opendata.atlas.cern/docs/documentation/introduction/introductory_page.
- [26] O. Brüning, H. Burkhardt, and S. Myers, The Large Hadron Collider *Prog. Part. Nucl. Phys.* **67** (2012) 705–734.
- [27] ATLAS Collaboration, ATLAS experiment schematic or layout illustration 2022. <https://cds.cern.ch/record/2837191>.
- [28] ATLAS Collaboration, Event Cross Section in a computer generated image of the ATLAS detector. 2008. <https://cds.cern.ch/record/1096081>.
- [29] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Muon Spectrometer CERN-LHCC-2017-017, ATLAS-TDR-026, CERN, 2017.
- [30] ATLAS Collaboration, ATLAS level-1 trigger CERN-LHCC-98-014 ; ATLAS-TDR-12, CERN, 1998.
- [31] ATLAS Collaboration, Installation of the first of the big wheels of the ATLAS muon spectrometer, a thin gap chamber (TGC) wheel 2006. <https://cds.cern.ch/record/986163>.
- [32] AMD, AMD Virtex™ UltraScale+™ FPGA. Accessed: 2026-01-20. <https://www.amd.com/ja/products/adaptive-socs-and-fpgas/fpga/virtex-ultrascale-plus.html>.
- [33] ATLAS Collaboration, PS Board. Accessed: 2026-01-20. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/Ph2TgcPsb>.
- [34] ATLAS Collaboration, Sector Logic Board. Accessed: 2026-01-20. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/Ph2TgcSectorLogic>.

- [35] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Trigger and Data Acquisition System - Event Filter Tracking Amendment CERN-LHCC-2022-004, ATLAS-TDR-029-ADD-1, CERN, 2022.
- [36] ATLAS Collaboration, ATLAS Software and Computing HL-LHC Roadmap CERN-LHCC-2022-005, LHCC-G-182, CERN, 2022.
- [37] ATLAS Collaboration, ATLAS level-1 muon endcap trigger performance plots in 2025 ATL-COM-DAQ-2025-050, CERN, 2025. <https://cds.cern.ch/record/2938778>.
- [38] 河本 地弘, 高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた初段ミュオントリガーアルゴリズムの実装と検出器全体への拡張 修士論文, 京都大学大学院理学研究科, 2023.
- [39] 三野 裕哉, 高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた初段ミュオントリガーアルゴリズムの開発およびハードウェアへの実装 修士論文, 京都大学大学院理学研究科, 2020.
- [40] 山下 恵理香, 高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた初段ミュオントリガーの開発と検証 修士論文, 東京大学理学系研究科物理学専攻, 2023.
- [41] ATLAS Collaboration, Endcap Sector Logic: PBS/WBS 1.1.5.1 CERN, 2025.
- [42] 水引 龍吾, 高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた初段エンドキャップミュオントリガーのファームウェア開発と検証 修士論文, 神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程, 2024.
- [43] K. E. Batcher, Sorting networks and their application in *Proceedings of the AFIPS Spring Joint Computer Conference*, pp. , 307–314. 1968.
- [44] 鍋山 友希, HL-LHC ATLAS 実験に向けたミュオン飛跡検出・選別回路の開発とパイラアップ耐性評価 修士論文, 名古屋大学大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻, 2023.
- [45] 門田 隆太郎, ATLAS 実験におけるフェイク 2 ミュオンの除去による高効率・低バックグラウンドなミュオントリガーアルゴリズムの研究 修士論文, 京都大学大学院理学研究科, 2016.
- [46] 塩見 崇宏, LHC-ATLAS 実験における第三期運転に向けた初段ミュオントリガーアルゴリズムの開発 修士論文, 神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程, 2021.
- [47] ATLAS Collaboration, Installation of the first of the big wheels of the ATLAS muon spectrometer, a thin gap chamber (TGC) wheel Cern photolab, 2006. <https://cds.cern.ch/record/986163>.
- [48] AMD, Vivado Design Suite. Accessed: 2026-01-17, <https://www.amd.com/ja/products/software/adaptive-socs-and-fpgas/vivado.html>.
- [49] ATLAS Collaboration, Search for light long-lived neutral particles that decay to collimated pairs of leptons or light hadrons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector *J. High Energy Phys.* **2023** No. 6(2023).
- [50] 山内 克弥, LHC-ATLAS 実験ミュオン粒子検出器の精密アライメントによるトリガー効率の改善 修士論文, 名古屋大学大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻, 2013.