平成26年度 修士学位論文

ATLAS 実験 RUN2 に向けた ハドロンカロリメータを用いる レベル1ミューオントリガーの性能評価

神戸大学大学院理学研究科 物理学専攻

矢ヶ部 遼太

指導教員: 藏重 久弥 教授

概要

欧州合同原子核研究機構 (CERN) において大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) を用いて 行われているアトラス実験は、ヒッグス粒子の性質や、標準模型を超えた物理の探索を 行っており、2015 年から始まる Run2 に向けてアップグレードがなされている。

2012年までの Run1 において、レベル 1 ミューオントリガーでは、衝突点由来でない 粒子によるフェイクトリガーが大量に発行されていた。そこでミューオン検出器よりも 衝突点に近いハドロンカロリメータとのコインシデンスをとることにより、フェイクト リガーの削減を目的として研究を行った。本論文では、ミューオン検出器にヒットがあっ た場合に、タイルカロリメー タに要求するコインシデンス条件の最適化を行い、実デー タとシミュレーションにおけるトリガー効率の評価を行った。その結果、シミュレーショ ンから得 られたトリガー効率は実データでの結果を再現していることを確認し、トリガ ー効率のロスの詳細についても評価をすることができた。さらに、これらのコ インシデ ンスを用いたときに予想されるトリガーレートの削減率も計算し、 Run2 において有効 であることを確かめた。

目 次

第 1章	序論	1
第2章	ATLAS 実験	3
2.1	LHC 加速器	3
2.2	ATLAS 実験の目指す物理 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
	2.2.1 標準模型における Higgs 粒子	5
	2.2.2 Higgs 粒子の崩壊	6
	2.2.3 Higgs 粒子の探索結果	7
2.3	ATLAS 検出器	9
	2.3.1 検出器における座標系	9
	2.3.2 超伝導磁石	10
	2.3.3 内部飛跡検出器	11
	2.3.4 カロリメータ	12
	2.3.5 ミューオンスペクトロメータ	14
第3章	レベル1ミューオントリガーシステム	16
3.1	レベル1トリガー	16
3.2	レベル1エンドキャップミューオントリガー	18
	3.2.1 Thin Gap Chamber (TGC)	18
	3.2.2 TGC トリガーシステム	21
	3.2.3 TGC システムの読み出し構造	23
	3.2.4 TGC エレクトロニクス	25
3.3	レベル1タイルミューオントリガー	28
	3.3.1 Extended Barrel Tile Calorimeter	28
	3.3.2 Tile Calorimeter–SL 間の信号伝達処理	29
	3.3.3 Tile Calorimeter-SL間のコインシデンスロジック	31
第4章	Run2 へ向けたアップグレード	32
4.1	Run1 におけるトリガー性能	32
	4.1.1 トリガー効率	32
	4.1.2 トリガーレート	36
	4.1.3 フェイクトリガー	36
4.2	Run2 へ向けての改良	38
	4.2.1 概要	38
	4.2.2 レベル1ミューオントリガーの変更	38
4.3	Inner Coincidence	38
第5章	モンテカルロシミュレーション	40
5.1	モンテカルロサンプルの作成	40
5.2	Inner Coincidence の実装	42

	5.2.1	Tile Calorimeter に関する実装.....................	42
	5.2.2	TGCに関する実装	44
第6章	Inner	· Coincidence 導入に向けた最適化と性能評価	46
6.1	コイン	シデンスの最適化	46
	6.1.1	エネルギー閾値.............................	46
	6.1.2	Tile Calorimeter Cell におけるエネルギー損失とηの関係.....	47
	6.1.3	Trigger Sector と TMDB Module の位置関係	49
	6.1.4	η と RoI の対応関係	50
	6.1.5	RoI 毎のトリガー効率	51
6.2	Inner	Coincidence の性能評価	53
	6.2.1	実データを用いた性能評価...................	53
	6.2.2	シミュレーションによる評価	54
	6.2.3	トリガー効率のロスの評価......................	57
	6.2.4	全体のトリガーレート削減率	58
第7章	結論		60
謝辞			61

-			-	

62

参考文献

第1章 序論

物質を構成するミクロな要素はどのようなものか、またそれらの間にはどのような相 互作用が働き、自然界のどのような法則に支配されているのか?素粒子物理学は、これら の問いに対する答えを求めるべく研究されてきた学問である。この素粒子物理学の世界 において、幾多もの実験によって検証され、目を見張るほどの精度で成功を収めてきた 理論が素粒子標準模型である。この素粒子標準模型は、重力相互作用を除く3つの基本的 な相互作用 (強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用)を記述する理論である。標準 模型では、対称性を自発的に破る作用を持つ、Higgs 場とよばれるモデルが導入されてい る。このモデルを用いることで、物質粒子 (レプトン、クォーク)や弱い相互作用を媒介 する W 粒子、Z 粒子が質量を獲得するが、電磁相互作用を媒介する光子は質量を持たな いことを明らかにした。1980 年代にこのZ 粒子と W 粒子が発見されたが、それに続く実 験においても、Higgs 粒子は長らく発見されなかった。1990 年代には、レプトンの第3世 代であるトップクォークが発見され、標準模型はまた一歩完成に近づいたが、なお Higgs 粒子は発見されず探索が進められていた。

スイス・ジュネーブ近郊に建設された Large Hadron Collider(LHC)を用いた実験でも、 この Higgs 粒子の探索を主な目的の1つとして進められてきた。LHC は、周長 27 [km] で重心系エネルギー14 [TeV]、ルミノシティ10³⁴ [cm⁻²sec⁻¹] を実現できるようにデザイ ンされた陽子・陽子衝突型円形加速器であり、2010 年 4 月から本格的に運転を開始した (2010 年の運転開始から 2013 年のシャットダウンまでの期間を Run1 という)。LHC に複 数ある衝突点の1つに設置された ATLAS 検出器も LHC の稼働と共にデータの取得を開 始し、2012 年には、21.7 [fb⁻¹] で重心系エネルギー8 [TeV] の陽子・陽子衝突のデータの 取得に成功した。また、そのデータを解析した結果、同年7月に Higgs 粒子と思われる新 粒子を発見した。その後も、データの取得・解析が続けられ、2013 年 10 月に前年に発見 した粒子がスピン0の Higgs 粒子であることが確定した。なお、LHC は現在シャットダ ウン期間中であり、2015 年からの Run2 に向けて、重心系エネルギーや、ルミノシティ を増強するための様々な改良が行われている。

上記の Higgs 粒子の探索において、ミューオントリガーは重要な役割を担ってきた。 Higgs 粒子は、その崩壊に伴う粒子を観測し、崩壊前の粒子を同定することで探索され るが、その崩壊モードとして、*H→ ZZ*→ 4ℓ や H→ WW*→ℓvℓv* など終状態にミュー オンを含む場合が存在するからである。そのためミューオンを観測することで、膨大な 背景事象の中から目的とする物理事象を選別することができる。2015年の Run2 からは、 Higgs 粒子の性質の精密検証も進められるので、ミューオントリガーの性能は重要であ る。ATLAS 実験では、3 段階のトリガーシステムが採用されており、本研究で対象とす るレベル1ミューオントリガーは、その第1段階に属する。 Run1におけるこれまでの研究で、レベル1ミューオントリガーで発行されるトリガー の大半は、陽子・陽子衝突由来でない粒子によるものであることが判明している (このよ うなトリガーをフェイクトリガーという)[1]。これは検出器内を漂う陽子や中性子が磁石 等の物質と相互作用することで発生した荷電粒子が磁場で曲げられ、結果として真に捉 えたい粒子と似た飛跡で検出器に入射し、トリガーが発行されることが原因だと考えら れている。これらの問題を解決するため、問題となる磁場が存在する場所よりも衝突点 に近い別のミューオン検出器 (Inner Station)の Hit 位置情報を用いてコインシデンスを とることにより、フェイクトリガーを削減することが考えられた。しかし、Inner Station にはコインシデンスに使用できない領域が存在したため、その領域においては、より衝 突点の近くに設置されているハドロンカロリメータでのミューオンのエネルギーと位置 情報を用いてコインシデンスをとることになった。この手法において、コインシデンス で要求する条件の最適化を行い、トリガー効率を維持しつつ、フェイクトリガーの削減 を図った。

本論文は以下のように構成される。

- 第2章:LHC Run1 での運転状況及び ATLAS 実験の概要を述べる。
- 第3章:ATLAS実験におけるトリガーシステム、特に、TGCと呼ばれるミューオントリガーチェンバーを用いたトリガーの仕組みを説明する。
- 第4章:Run1におけるレベル1ミューオントリガーの性能評価と問題点、またRun2 へ向けてのその解決策である InnerCoincidence に関して説明する。
- 第5章:InnerCoincidenceの実装と、本研究で用いたモンテカルロシミュレーションでのサンプルの作成について説明する。
- 第6章: Run2に向けて新たに導入される InnerCoincidence に関して、その最適化 と性能評価について述べる。
- 第7章:本論文のまとめとする。

第2章 ATLAS実験

2.1 LHC加速器

LHC(Large Hadron Collider)は、スイス・ジュ ネーブ近郊にある欧州原子核研機構(CERN)の 地下約 100m に建設された世界最大の陽子・陽 子衝突型加速器である。衝突による重心系のエ ネルギーは 14 [TeV]、最高ルミノシティは 10³⁴ [cm⁻²sec⁻¹] に達する。陽子の質量は電子の約 1800 倍と大きいため、加速器によって生じるシ ンクロトロン放射によるエネルギー損失が少な い。そのため、LHC では 14 [TeV] という世界最 高エネルギーでの衝突を再現することが可能と なっている。

表 2.1 に 2012 年の稼働状況における主要パラ メータを示す。なお、現在 (2013 年 ~2014 年) は シャットダウン期間中であり重心系エネルギー 及びルミノシティ増強のため改良が行われてい る。



図 2.1: LHC の概観図 [2]

$26.7 \; [\rm km]$
8 [TeV]
$0.7 \times 10^{34} \ [\mathrm{cm}^{-2} \mathrm{sec}^{-1}]$
1380 [個]
25 [ns]
1.4×10^{11} [個]
$23 \; [\mu m]$

表 2.1: LHC の主要なパラメータ

図 2.2 に 2012 年に取得されたデータの積分ルミノシティの推移を示す。緑が LHC 全体、黄色が ATLAS 検出器で取得されたデータを表しており、それぞれ 23.3 [fb⁻¹]、21.7 [fb⁻¹] に相当するデータ取得に成功した。



図 2.2: 積分ルミノシティの推移 [3]

また、LHC実験では衝突点が4カ所あり、それぞれ次の4種類の実験が行われている。

- ATLAS(A Toroidal LHC Apparatus) Higgs 粒子や超対称性粒子 (SUSY)の探索を 主な目的とした実験。詳細は後述する。
- CMS(Compact Muon Solenoid) ATLAS 実験と同じく Higgs 粒子や超対称性粒子 (SUSY)の探索を主な目的とする。検出は、ATLAS 検出器よりも小型で、より強い ソレノイド磁場を持つ。
- ALICE(A Large Ion Collider Experiment) 重イオン同士を衝突させることにより、 クォーク・グルーオンプラズマ (QGP)の解析を目的とする。
- LHCb(Large Hadron Collider beauty) b クォークを用いた CP 対称性の破れを観測 することにより、標準模型を超える物理事象の探索を目的とする実験である。



図 2.3: (左)CMS 検出器 [4] (中央)LHCb 検出器 [5] (右)ALICE 検出器 [6]

2.2 ATLAS 実験の目指す物理

ATLAS 実験は、これまで Higgs 粒子の探索及び精密測定を主目的としてきた。以下に 標準模型における Higgs 粒子について簡単に述べる。

2.2.1 標準模型における Higgs 粒子

Higgs 粒子は素粒子の基本的な振る舞いを記述する標準模型において粒子に質量を与えるとされ、その存在が予想されてから様々な実験で探索が続けられてきた。そして、2012年7月、ATLAS(及び)CMSでは、新たな粒子を発見し、その後もさらに多くのデータを解析した結果、2013年10月のその新たな粒子がスピン0のHiggs粒子であると確定した。

Higgs 粒子の生成

Higgs 粒子は、トップクォークや、W[±]、Z粒子などの質量の大きな粒子と結合しやすいため、LHC では主に以下の4つの生成過程が考えられる。図 2.4 にそのファインマン ダイアグラムを、図 2.5 に生成断面積を示す。



図 2.4: Higgs 粒子の生成過程

 gg→H (gluon fusion(a))
 グルーオン同士の反応によって生じるトップクォークやボトムクォークのループを 介した生成過程であり、生成断面積が最も大きい。しかし Higgs 粒子の崩壊により 生成される粒子以外に反応を特徴づける粒子が存在しないため、背景事象との選別 が難しい。

- qq → qqH (vector boson fusion(b))
 クォークから放出されたゲージボソン (W/Z) から Higgs 粒子が生成される過程である。生成断面積が比較的大きく、終状態に2本のジェットを含むため、事象の選別が行いやすい。
- qq→ (W/Z)H (W/Z associate production(c))
 クォークの対消滅によって生成されたゲージボソンから Higgs 粒子が生成される過程である。生成断面積は小さいが、終状態にゲージボソンが観測されるため事象の選別が行いやすい。
- gg→ t̄H (top associate production(d))
 対生成されたトップクォークから Higgs 粒子が生成される過程である。生成断面積 は小さいが、終状態にトップクォークを含むため事象の選別が行いやすい。



2.2.2 Higgs 粒子の崩壊

以下に予測されている Higgs 粒子の主な崩壊モードを示す。Higgs 粒子の崩壊分岐比の 質量依存性を図 2.6 に示す。

• $H \rightarrow \gamma \gamma$

Higgs 粒子が2つの光子に崩壊する過程。光子は質量が0であり Higgs 粒子と結合 できないので、トップクォークやボトムクォーク、W粒子などのループを介するこ とで光子を放出する。Higgs 粒子は $b\bar{b} \leftrightarrow c\bar{c}$ への崩壊が支配的であるが、これらは QCD 背景事象との区別が困難である。そのためこの崩壊過程が主な探索チャンネ ルとなる。 $H \rightarrow \gamma\gamma$ を観測することで不変質量 $M_{\gamma\gamma}$ を見積もり探索を行うため、電 磁カロリメータの高い精度が要求される。

• $H \rightarrow \tau \tau$

Higgs 粒子が2つの τ に崩壊する過程である。 $\gamma\gamma$ よりも崩壊分岐比が高く、vector boson fusion との組み合わせで背景事象と区別することができる。 τ の崩壊にニュートリノを伴うため、横消失エネルギー E_T^{miss} の精密な測定が要求される。

• $H \rightarrow WW^* \rightarrow \ell \nu \ell \nu$

Higgs 粒子が2つの W に崩壊し、それぞれが $\ell\nu(\ell: \mu, e)$ に崩壊する過程である。崩壊分岐比は高いが、この過程は終状態に2つのニュートリノを含むため Higgs 粒子の質量を再構成することは困難であり、 2γ 事象や4ℓ事象のように鋭い Higgs 粒子の質量ピークが観測できない。そのため、2つのレプトンの横方向運動量 p_T と2つのニュートリノに由来する E_T^{miss} から横方向質量を算出し探索を行う。

• $H \to ZZ^* \to \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$

Higgs 粒子が2つの Zに崩壊し、それぞれが $\ell^+\ell^-$ に崩壊する過程である。これらの 4 ℓ は Zの崩壊により生成されるため、高い横方向運動量 p_T を持つ。崩壊分岐比は 小さいが、終状態の 4 ℓ を全て捉えられるため、Higgs 粒子を完全に再構成できる。

2.2.3 Higgs 粒子の探索結果

2012 年 7 月、CERN では Higgs 粒子と思われる新粒子を発見したと報告した [8]。図 2.7 及び図 2.8 はその結果である。



図 2.7: Higgs 粒子生成に対する制限 [8]



図 2.8: 背景事象が信号に見える確率 [8]

図 2.7 は 110~600 [GeV/ c^2] の質量範囲における、標準模型を仮定した Higgs 粒子生成 に対する制限である。横軸は Higgs 粒子の質量、縦軸は Higgs 粒子の生成断面積を標準模 型で予想される Higgs 粒子の生成断面積で割った値を表す。実線は実験で得られた制限 で、この値が1よりも小さくなる質量の領域では、95 [%] の信頼度で Higgs 粒子の存在が 棄却される。破線で示された曲線は Higgs 粒子が存在しない場合に得られると期待され る制限をシミュレーションで評価した結果の中心値である。緑と黄色のバンドはそれぞ れ評価値の ±1 σ 、±2 σ の統計揺らぎの範囲を示す。この図から質量が 500 [GeV/ c^2] 以下 の領域においては、123~130 [GeV/ c^2] の範囲以外は 95 [%] の信頼度で棄却されること が分かる。また図 2.8 は、背景事象のみの状態で偶然に信号があるかのようにみえる確率 (local p-value : p_0)を Higgs 粒子の質量の関数 (検査をした全ての質量範囲) で表したもの である。ほとんど全ての仮定した質量に対して、その確率 (実線) はせいぜい数 [%] であ るが、 $m_H = 126.5$ [GeV/ c^2] では確率が 10⁻⁹(赤の破線の 6 σ) まで到達している。新粒子 の発見を表すのに使用される標準が 5 σ の超過であることから、新粒子が存在すると結論 づけられた。



図 2.9: 各 J^p 仮説である確率 [9]

その後、発見された粒子の質量や結合定数、スピン・パリティの測定が行われ、標準模型の Higgs 粒子と無矛盾であることが分かった。図 2.9 は、発見された粒子のスピン・パリティの測定結果である [9]。 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 、 $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ 、 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$ に崩壊する過程を利用し、 $J^P($ スピン・パリティ)=0⁺という標準模型に対して、 $J^P = 0^-$ 、1[±]、2⁺という仮定をデータがどれだけ嗜好しているかを表す度合い (CL_s(J_{alt}^P))を縦軸で表している。また、黒の実線とそれに従った点は実データを、青の破線とそれに沿った点がシミュレーションで評価した値を表し、緑のバンドは評価値の±1 σ の統計揺らぎの範囲を示す。この結果から、新粒子のスピン・パリティが0⁺以外である仮説は2または 3 σ で棄却され、新粒子はスピン0の Higgs 粒子であると確定した。

2.3 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は直径 22 [m]、長さ 44 [m]、総重量 7000 [t] の大型汎用検出器である。 衝突点に近い位置から順に、内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメー タ、ミューオンスペクトロメータと設置されている。内部飛跡検出器とカロリメータの間 にはソレノイド磁石、カロリメータとミューオンスペクトロメーターの間には、トロイ ド磁石が存在する。ATLAS 検出器の全体像を図 2.10 に示す。



図 2.10: ATLAS 検出器の全体像 [2]

2.3.1 検出器における座標系

ATLAS 検出器の座標系を図 2.11 に示す。衝突点を原点とし、LHC のビーム軸方向を z 軸とする。z 軸と直交する面内で、LHC のビームリングの中心方向を x 軸、天頂方向を y 軸とする。このとき衝突点に対して+z 方向を A-side、-z 方向を C-side と呼ぶ。また極 座標 r、 θ 、 ϕ を定義する ($0 \le \theta < \pi$ 、 $0 \le \phi < 2\pi$)。さらに擬ラピディティ η を

$$\eta \equiv -\mathrm{lntan}(\frac{\theta}{2})$$

で定義する。 η を用いるのは、ハドロンコライダーでは、生成される粒子の η 分布 (Δ N/ $\Delta\eta$)がほぼ一定になるためである。円筒形の ATLAS 検出器はこの η の範囲によっ て区切られており、それぞれバレル部 ($|\eta| < 1.0$:円筒形の側面部)とエンドキャップ部 ($1.0 < |\eta|$)に分けられる。また、エンドキャップ部はさらに、 $1.0 < |\eta| < 1.9$ の領域をエ ンドキャップ領域、 $1.9 < |\eta|$ の領域をフォワード領域と分けて呼ぶこともある。



図 2.11: ATLAS 検出器の座標系

超伝導磁石 2.3.2

ATLAS 検出器のマグネットシステムは4つの超伝導磁石で構成される(図 2.12)。中央 に設置されている超伝導ソレノイド磁石は、内部飛跡検出器での運動量測定を目的とし ており、バレル部及びエンドキャップ部に設置されている超伝導トロイド磁石はミューオ ンスペクトロメータでのミューオンの運動量測定を主な目的としている。



図 2.12: 超伝導磁石全体の構造 [10] 図 2.13: 超伝導ソレノイド磁石 [2]

超伝導ソレノイド磁石 (図 2.13) は長さ 5.3 [m]、直径 2.4 [m]、径方向の厚さ 45 [mm] の円筒形をしており、z方向に約2[T]の磁場を発生させる。超伝導トロイド磁石は8つ のコイルがビーム軸に対して8回対称となるように、バレル部(図2.14)に1つ、エンド キャップ部 (図 2.15) に 2 つ設置されている。バレル部は長さ 25.3 [m]、内径 9.4 [m]、外 径 20.1 [m] で積分磁場強度は 2~6 [Tm] であり、エンドキャップ部は長さ5 [m]、内径 1.7 [m]、外径 10.7 [m] で積分磁場強度は 4~8 [Tm] である。





図 2.14: 超伝導トロイド磁石 (バレル)[2]

図 2.15: 超伝導トロイド磁石 (エンドキャップ)[2]

2.3.3 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は衝突点の最近接に設置されており、超伝導ソレノイド磁石の作る約2 [T]の磁場によって運動量の測定を行う。内部飛跡検出器は、ピクセル検出器、シリコン 検出器、遷移輻射検出器の3つで構成されている。

ピクセル検出器 (Pixel: Silicon-pixel vertex detector)

最も衝突点に近い領域に設置されている半導体検出器で、 $|\eta| < 2.5$ の領域をカバーし、高い位置分解能 (r- ϕ 方向: 10 [μ m]、z 方向: 115 [μ m]) を持つ。バレル部、エンドキャップ部共に、3 層構造になっており、総チャンネル数は 8040 万チャンネルとなる。

シリコン検出器 (SCT: Semi-Conductor Tracker)

細長い有感領域を平行に並べた半導体検出器である。1 枚のシリコンセンサーは 6.4 [cm]×6.4 [cm] で、読み出しストリップの間隔は 80 [μ m] である。各モジュールは 4 枚の シリコンセンサーで構成される。2 層を 40 [mrad] 傾けることで 2 次元での位置検出を可 能にしている。位置分解能は r- ϕ 方向で、16 [μ m]、z 方向で 580 [μ m] である。

遷移輻射検出器 (TRT: Transition Radiation Tracker)

直径 4 [mm]、位置分解能 130 [µm] を持つカーボンファイバー製のドリフトストロー チューブ検出器を積層したガス増幅検出器である。ストローチューブは、バレル部に 73 層、エンドキャップ部に160層積み重ねて設置されており、r-φ方向の位置測定を行う。電子の識別や飛跡の検出に使われる。



図 2.16: 内部飛跡検出器の全体像 [2]

図 2.17: 内部飛跡検出器の断面図 [2]

2.3.4 カロリメータ

カロリメータの全体像を図 2.18 に示す。カロリメータは、全体で |η| < 4.9 の領域をカ バーし、ηの範囲によって放射線量や対象とする粒子が違うため電磁カロリメータとハド ロンカロリメータに分けられる。電子/光子とハドロンの区別、ジェットの識別、粒子の エネルギーや位置の測定を目的としている。



図 2.18: カロリメータの全体図 [2]

電磁カロリメータ

LAr(液体アルゴン)と鉛のアブソーバ (吸収体)で構成される。アブソーバをアコーディ オン構造にすることで ϕ 方向の不感領域がなくなるように設計されている。超伝導ソレ ノイド磁石の外側のバレル部 ($|\eta| < 1.5$)とエンドキャップ部 ($1.4 < |\eta| < 3.2$)の両領域に 設置されており、主に電子と光子のエネルギーの測定に用いられる。電子/光子とジェッ トの識別は電磁カロリメータの外側に存在するハドロンカロリメータへのエネルギーの 漏れだしによって行われる。また、電子と光子の区別は、内部飛跡検出器中の飛跡によっ て行われる。エネルギー分解能は、

$$\frac{\Delta\sigma_{\rm E}}{\rm E} = \frac{9.5[\%]}{\sqrt{\rm E}} \oplus 0.7[\%] \qquad (\rm E: GeV)$$

と表される。第1項目は電子数をエネルギーに換算する際の統計的な揺らぎによる項 であり、第2項は較正の精度や温度の揺らぎによる項である。

ハドロンカロリメータ

バレル部 ($|\eta| < 1.7$) では、Tile Calorimeter、エンドキャップ部 ($1.5 < |\eta| < 3.2$) では、 LAr Hadronic Endcap Calorimeter (HEC) が使用されている。

• Tile Calorimeter

 $|\eta| < 1.0$ をカバーする Central Barrel と $0.8 < |\eta| < 1.7$ をカバーする Extended Barrel からなり、鉄のアブソーバとタイル状のシンチレータで構成される。シンチ レータタイルの両端に波長変換ファイバーがつながれており、2つの光電子増倍管 から読み出しを行う。本研究では、この Extended Barrel Tile Calorimeter とミュー オンスペクトロメータを用いてコインシデンスをとる。

 LAr Hadronic Endcap Calorimeter (HEC) 電磁カロリメータと同じく LAr を用い たカロリメータである。ただしアブソーバに銅を使用している。32 個の同一な形状 のくさび形モジュールを組み合わせて円板状になっている。

単一のハドロン粒子に対するエネルギー分解能は以下のように表される。

$$\frac{\Delta\sigma_{\rm E}}{\rm E} = \frac{52.3[\%]}{\sqrt{\rm E}} \oplus 1.7[\%] \quad (バレル部), \quad \frac{62.4[\%]}{\sqrt{\rm E}} \oplus 3.6[\%] \quad (\texttt{エンドキャップ部})$$

2.3.5 ミューオンスペクトロメータ

ATLAS 検出器の最も外側に位置しており、ミューオンの測定を目的とする。ミューオ ンは 2.2 [μ sec] と比較的長寿命であり、物質の透過率も高いことからミューオンスペクト ロメータまで到達することができる。ミューオンスペクトロメータは位置の精密測定を 行う Monitored Drift Tube (MDT) と Cathode Strip Chamber (CSC)、トリガー発行を 担う Resistive Plate Camber (RPC) と Thin Gap Chamber (TGC) から構成されている。



図 2.19: ミューオンスペクトロメータ全体図 [2]

Monitored Drift Tube (MDT)

MDT はバレル・エンドキャップ両領域の広い部分をカバーし、ミューオンの飛跡の r-z 方向成分を精密に測定する。直径 30 [mm](ワイヤー径 50 [µm])のドリフトチューブを積 層し、フレームに固定した構造を持つ。粒子の通過位置をドリフト時間によって算出す る。位置分解能は 60 [µm] で、総チャンネル数は約 30 万チャンネルである。

Cathode Strip Chamber (CSC)

CSC は運動量精密測定用のカソードストリップ読み出し MWPC (Multi-Wire Proportional Chamber) であり、放射線強度の高い 2.0 < $|\eta|$ < 2.7 の領域に設置されている。ワイヤー間隔が 2.5 [mm]、ストリップ間隔が 5.3 [mm] と 5.6 [mm] の 2 種類の構造を持つものが存在する。電離電子が電子雪崩を起こしアノードワイヤーに到達する時間は 30 [nsec] 以下で、位置分解能は 60 [μ m] である。

Resistive Plate Camber (RPC)

RPC は $|\eta| < 1.0$ のバレル部に設置されているトリガー用検出器であり、MDT では測定されない ϕ 方向の位置測定も行う。アノードワイヤーを使用せず、平行電極板を用いたストリップによって読み出しを行うガスチェンバーである。電極間には 4.9 [kV/mm] の高電圧が印加され、荷電粒子が通過するとそのトラックに沿って雪崩増幅が起きてアノードまで達する。 ϕ 方向の位置分解能は 5~10 [mm] 程度であり、反応時間が短いという特徴を持つ。

Thin Gap Chamber (TGC)

次章で詳細を述べる。

第3章 レベル1ミューオントリガーシス テム

3.1 レベル1トリガー

ATLAS 実験ではバンチ衝突間隔は 40.8 [MHz] であり、衝突点での陽子の非弾性衝突 事象頻度は 1 [GHz] を超える。これらの膨大なイベントを全て保存することは不可能な ため、ATLAS 実験では目的とする物理事象のみを効率良く選別するためにトリガーシス テムが用いられる。

ATLAS 実験におけるトリガーシステムの概要を図 3.1 に示す。トリガーシステムはレベ ル1 (LVL1)、レベル2 (LVL2)、イベントフィルター (EF)の3段階で構成されており、最 終的にイベントレートを1 [kHz] 程度にまで落とす。レベル1トリガーではカロリメータ とミューオンシステムにより事象選別を行う。カロリメータあるいはミューオンシステ ムにおいてトリガーの対象となる信号が観測された領域を RoI (Region of Interest) と呼 ぶ。レベル2トリガーでは RoI の検出器情報を用いてイベントの精密な選別を行い、イ ベントフィルターでは全検出器の情報を用いてイベントの選別を行う。



図 3.1: トリガーシステムの概要

レベル1トリガーでは、衝突点で発生した1 [GHz] のイベントレートを75 [kHz] 程度 にまで落とすことを目的としている。レベル1トリガーの処理の流れを図3.2 に示す。レ ベル1トリガーの判定には、カロリメータとミューオンスペクトロメータ (RPC と TGC) の情報が用いられる。カロリメータでは E_T^{miss} 、 $e/\gamma,\tau$ 、Jets のエネルギーなどに対する 閾値が設定されており、ミューオンスペクトロメータでは横方向運動量 p_T に対する閾値 が設定されている。トリガーの閾値を超えたイベントのトリガー情報は Central Trigger Processor (CTP) に送られ、最終的なレベル1トリガーの判定を行う。



図 3.2: レベル1トリガーシステム

レベル2トリガー

レベル2トリガーでは、イベントレートを75 [kHz] から2 [kHz] 程度にまで落とすこと を目的としている。レベル1トリガーにより選定された RoI の情報を元にカロリメータ、 MDT、内部飛跡検出器からの位置情報を利用してより精度の高い選別を行う。(RoI 付近 の情報のみを対象とすることで計算の効率化を図っている)。

イベントフィルター

イベントフィルターではイベントレートを 200 [Hz] にまで落とすことを目的としてい る。ここでは全ての検出器の情報を用いて粒子を再構成・識別し、トリガーの判定を行 う。最終的にトリガーと判定されたイベントはオフライン解析のためにデータストレー ジに書き込まれる。

3.2 レベル1エンドキャップミューオントリガー

3.2.1 Thin Gap Chamber (TGC)

TGCは高エネルギー実験ではよく使用される MWPC (Multi-Wire Proportional Chamber)の一種であり、ATLAS検出器ではエンドキャップ部に設置されている。TGC はミュー オントリガーの発行と MDT では測定されない φ 方向の位置情報を取得することを目的 としている。チェンバーは台形で、その大きさは一辺が 1~2[m] 程度である。(配置場所 によって異なる)。図 3.3 に TGC の配置とその構造を示す (赤く示された両サイドの円形 部分が TGC を表している)。



図 3.3: TGC の配置と構造

図 3.4: TGC の断面図 [10]

TGCの構造と検出原理

TGCのチェンバーの断面図を図 3.4 に示す。TGCは、アノードとして直径 50 [µm] の 金メッキを施したタングステンワイヤーが 1.8 [µm] の間隔で台形の上底・下底に平行に 張られている。カソードとしては 1.6 [µm] または 1.8 [µm] のガラスエポキシ樹脂を基板 とし、表面にカーボンを塗装することでカソード面を形成している。ガラスエポキシ板 を挟んだ反対面には、1 面を 32 分割した扇形の銅のストリップがワイヤーに直交して並 べてあり、r-φ平面の 2 次元読み出しを行う (図 3.3)。ワイヤーには約 30 [cm] 毎にワイヤ サポートがあり (図 3.5)、ワイヤーのたるみを防ぐとともにガスの流路の形成と TGC の 歪みを防いでいる。ワイヤー 6~20 本をまとめて 1 つのチャンネルとし、R 方向の位置情 報を読み出す。ストリップは 32 本あり、それぞれが 1 つのチャンネルとして φ 方向の位 置情報を読み出す。また TGC 内部は CO₂/n-pentan(55/45) 混合ガスで満たされている。 荷電粒子によって励起状態にされた分子が、基底状態に戻る際に発生する紫外線による ガス分子の電離や、この紫外線がカソード面に衝突することで発生する電子が自己放電 を引き起こす可能性があり、紫外線を吸収し放電を抑えるため、クエンチ効果を持つこ のガスが封入されている。



図 3.6: doublet(右) と triplet(左) の構造 [10]

TGCのワイヤーは 2.9 [kV] 程度の高電圧が印加されている。そのため、TGC に入射し た荷電粒子はその飛跡に沿ってガス中の分子と多数衝突し電離され、電子・陽イオン対を 作る。電離された電子 (一次電子) はアノードに移動しながら電場によって加速され、運 動エネルギーを持つ。電子のエネルギーがガス中の分子の電離エネルギーを超えるとガ ス分子がイオン化され、二次電子が生成される。二次電子も同様に電場によって加速さ れ、次々と衝突・電離を繰り返して電子雪崩を起こし、信号として読み出される。一方、 電離によって生じた陽イオンはカーボン面に向かって移動する。カーボン面は高抵抗で あるため瞬間的には電流は流れず、時間とともにカーボン面には負の電荷が、ストリップ には正の電荷が局所的に誘起され、信号として読み出される。また、TGC のアノードと カソードの間隔は、1.4 [mm] と一般的な MWPC に比べ狭くなっており (図 3.4)、陽イオ ンがカソードに早く到達する。このことから TGC は粒子の高レート入射に耐性を持ち、 高ルミノシティ環境に対応できる。

ATLAS 実験では TGC は 2 層 (doublet) または 3 層 (triplet) を重ねた構造にして用いられる (図 3.6)。doublet の場合は、2 層のワイヤー面と 2 層のストリップ面から読み出しが行

われる。triplet の場合は、2層目にはストリップがなく、3層のワイヤー層と2層のスト リップ面から読み出しが行われる。多層構造にすることで、各層のコインシデンスをとっ てバックグラウンドによる信号の影響を減らすだけでなく、ワイヤーサポートによる不感 領域の影響を減らしている。また、機械的強度を保つため、ハニカムが接着されている。

TGC の配置

TGC の配置図を図 3.7 に示す。図 3.7 は r-z 平面における断面図で、横軸が z、縦軸が r である。(単位は共に [mm])。TGC システムは M1 (triplet)、M2 (middle)、M3 (pivot) の 3 つの station と Endcap Inner (EI)、Forward Inner (FI)の 5 つから構成され、エンド キャップ部において円盤状に配置されている。M1 は 3 層、M2・M3・EI・FI は 2 層のチェ ンバーからなり、M1・M2・M3の計 7 層でトリガー判定を行う。



図 3.7: r-z 断面での TGC の配置



TGC は 1/12 円を 1 つの単位とする (図 3.8 の赤く囲まれた領域)。レベル 1 トリガーで は、この 1/12 円をさらに Sector と呼ばれる単位に分割する。 1.0 < $|\eta|$ < 1.9 のエンド キャップ領域では ϕ 方向に 4 分割した領域を、 1.9 < $|\eta|$ のフォワード領域では ϕ 方向に 2 分割した領域を Trigger Sector と呼ぶ。さらに、 Trigger Sector は図 3.9 のようにエンド キャップでは η 方向に 37 分割、 ϕ 方向に 4 分割され、フォワードでは η 方向に 16 分割、 ϕ 方向に 4 分割される。この分割された領域は SubSector と呼ばれ、トリガー処理の最小単 位となる RoI に対応している。 ATLAS 検出器に設置されている TGC の総数は、約 3700 枚あり、全チャンネル数は R 方向で約 22 万、 ϕ 方向で約 10 万に及ぶ。



図 3.9: SubSector のナンバリング

3.2.2 TGC トリガーシステム

TGC で発行されるレベル1ミューオントリガーでは、検出されたミューオンの p_T を もとにトリガー判定を行う。 p_T はミューオンの磁場による曲がりから概算される。以下 に p_T の概算方法及びトリガー判定について述べる。

横方向運動量 p_T の概算方法

陽子・陽子衝突により生じたミューオンはトロイド磁場によって曲げられた後、TGCの 各層で検出される (図 3.10 の赤線)。最外層の TGC (M3: Pivot) での検出点とビームの 衝突点を結ぶ直線を無限運動量を持つミューオンのトラックと仮定する (図 3.10 の青線)。



図 3.10: p_T 測定の原理

M1 (triplet) 及び M2 (doublet) での検出点と無限運動量トラックの通過点の差を R、 ϕ それぞれの方向について測定し、その差を ΔR 、 $\Delta \phi$ とする。この ΔR 、 $\Delta \phi$ を用いて p_T を概算する。

M1 及び M2 ではそれぞれ ΔR 、 $\Delta \phi$ の絶対値に上限が設定されている。この上限の ΔR 、 $\Delta \phi$ で形成される領域をウィンドウと呼び、M1・M2 共に p_T が6 [Gev/c] 以上のミューオ ンがほぼ通過できる範囲に設定されている。

トリガー判定の流れを図 3.11 に示す。ミューオントリガーシステムではまず、M2、M3 の Hit 情報に対して R 方向、 ϕ 方向独立にコインシデンス処理が施され low- p_T 判定が行 われる (2–Station Coincidence)。さらに 2–Station Coincidence の条件に M1 の Hit 情報 を加えたコインシデンス処理が施され high- p_T 判定が行われる (3–Station Coincidence)。 最後にこれまで独立で処理されてきた R 方向、 ϕ 方向それぞれの情報が統合される。この コインシデンス情報 (Δ R、 $\Delta \phi$)を用いて Coincidence Window (CW) と呼ばれる参照表 (Look Up Table : LUT)を参照することでトリガーを発行する。また low- p_T トリガーが 設定されてある場合、3–Station Coincidence の条件を満たさなくても M2 での Δ R、 $\Delta \phi$ 情報を用いることでトリガーが発行される。



図 3.11: TGC トリガーの判定方法

3.2.3 TGC システムの読み出し構造

TGCエレクトロニクスの概要を図 3.12 に示す。



図 3.12: TGC エレクトロニクスの概要

TGC システムのデータの流れは、

- トリガー系
 レベル1トリガー判定のためのデータを渡す。図3.12の赤線で表される。
- リードアウト系
 レベル1トリガーの発行に応じてデータを渡す。図3.12の青線で表される。
- コントロール系 TGCエレクトロニクスの各モジュールをコントロールする。図 3.12の緑線で表される。

の3つがある。

トリガー系

トリガー系では、Amplifier Shaper Discriminator Board (ASD)、Patch Panel ASIC (PP ASIC)、Slave Board ASIC (SLB ASIC)、High-Pt Board (HPT)、Sector Logic (SL)の 順に信号が処理される (図 3.13)。TGC から出力されるアナログ信号は ASD に送られ、信 号の増幅・整形・デジタル化が行われた後、PP ASIC に送られる。PP AISIC では、各 チャンネルへ粒子が到達するまでの飛行時間 (Time of Flight : TOF) やケーブル遅延な どから生じるタイミングのズレを調整し、バンチ識別 (信号を LHC クロックに同期させ る) を行う。SLB ASIC は PP ASIC からの情報を受け取り、M2 及び M3 の 4 層からの信 号を元にコインシデンス処理が行われ、トリガーが判定される (low- p_T トリガー)。また M1 からの信号についてもコインシデンス処理が行われる。HPT では SLB ASIC で行わ れたコインシデンス処理の結果を元に high- p_T コインシデンス情報が生成される。SL で は、ここまで独立して扱われていたワイヤーとストリップの情報を統合し、コインシデン ス処理及び横方向運動量 p_T の概算が行われる。そして、TGC トリガー系の最終的な情 報として p_T の大きな 2 つのトラックを Trigger Sector 毎に選別する。この結果は Muon CTP Interface(MUCTPI) に送られ、RPC の情報と共に、ミューオンの最終的なトリガー 判定に用いられる。



図 3.13: レベル1におけるトリガー系の流れ

リードアウト系

PP ASIC から送られてきたデータは、SLB ASIC の中にあるレベル1バッファに蓄えら れる。このバッファの保持時間は 2.5 [μ sec] であり、保持時間内に蓄えられたデータの内、 L1A(トリガー判定) 信号を受けたデータのみが Star Switch (SSW) へ送られる。SSW で はデータの圧縮を行い、規格フォーマットにデータを変換する。またトリガー情報 (コイ ンシデンス処理の結果) は SL に搭載された SLB ASIC から同様に SSW へ送られる。SSW で変換されたデータは Read Out Driver (ROD) に送られ、Timing, Trigger and Control (TTC) の情報との整合性が確認される。データが正しければ、要求されるフォーマット へ変換し、Read Out Buffer (ROB) へ送られる (図 3.14)。



図 3.14: レベル1におけるリードアウト系の流れ

コントロール系

コントロール系では各検出器の制御と監視を統一的な方法で行うために DCS (Detector Control System) が使用される。DCS にはプロセッサーである eLMB (embedded Local Monitor Box) などが搭載され PS Board 上に設置される。HPT/SSW が搭載される VME クレート5は実験室外の CCI (Control Configuration Interface Board) から HSC (High-pT Star-switch Controller Board) を介してコントロールされ、PS Board 上の PP ASIC/SLB ASIC の設定は SSW から行われる。TGC の DCS は主に温度状態の管理や供給電源の 監視を行う (図 3.15)。



図 3.15: レベル1におけるコントロール系の流れ

3.2.4 TGC エレクトロニクス

トリガー系、リードアウト系の読み出しに用いられる各モジュールについて概要を述べる。

Amplifier Shaper Discriminator Board (ASD)

ASD Board は、4 チャンネル分の処理を行う ASD ASIC が 4 つ搭載されており、1 つの ボードにつき 16 チャンネルを処理する。ASD ASIC は、TGC からのアナログ信号を増 幅・整形し、閾値を超えた信号のみを Low Voltage Differential Signal (LVDS:低電圧作 動信号) レベルの信号で出力する。

Patch Panel ASIC (PP ASIC)

ASDから送られてくる信号の TOF やケーブル遅延によるタイミングのズレを調整し、バンチ識別を行う。さらに TGC の重なった部分での2重カウントを防ぐため、その部分に対しては OR ロジックを通して信号を出力する。

Slave Board ASIC (SLB ASIC)

トリガー部では、TGC からの入力信号に対してコインシデンス処理を行う。SLB ASIC

の段階ではワイヤーとストリップ、doublet と triplet は別々に扱うため、5 種類のコイン シデンス処理 (wire-doublet、strip-doublet、wire-triplet、strip-triplet、FI) の設定を切り 替えることが可能である。

リードアウト部では、レベル1トリガーの判定を受けたデータの読み出しを行う。デー タは CTP からの L1A が与えられるまで保持され、L1A が与えられると該当データとそ の前後1バンチずつのデータを SSW に送る。

High-Pt Board (HPT)

SLB ASIC まで独立に処理されてきた M2・M3 と M1 のデータを統合して HPT コインシ デンス情報を生成する。HPT ではワイヤーとストリップは独立して処理され、最終的な ミューオンの p_T 判定に用いる ΔR 、 $\Delta \phi$ を出力する。ただし、HPT でコインシデンスが とれなかった場合、SLB のコインシデンス処理の結果 (low- p_T) が代わりに出力される。 出力データは光ファイバーによって SL へ送信される。

Sector Logic (SL)

TGC エレクトロニクスにおけるトリガーのデータが最終的に集められるモジュールであ り、2 Trigger Sector 分の信号を処理する。SL は主に R-φ コインシデンス、プレトラッ クセレクター、ファイナルトラックセレクターから構成される。

 $R-\phi$ コインシデンスでは、HPT まで独立に処理されてきた R 方向 (ワイヤー) と ϕ 方向 (ストリップ)の信号から両者のコインシデンスをとることにより、6 段階の p_T 閾値で ミューオンを分類する。 p_T 判定には各閾値に対応した参照表 CW が用いられる。この CW は ΔR 、 $\Delta \phi$ の組み合わせに応じた p_T 閾値が記述してあり、実験状況に臨時対応で きるように書き換え可能な集積回路に実装されている。

プレトラックセレクターでは、各閾値毎に p_T の大きい順に2つのトラックを選択し、計 12トラックがファイナルトラックセレクターに送られる。

ファイナルトラックセレクターでは、プレトラックセレクターから送られた 1Trigger Sector 分のトラックから p_T の大きいものを 2 つ選択し、それらに対応する 6 段階の p_T 判定と 位置情報を MUCTPI に送る。SL が処理した際に使用した HPT からのデータと SL での 処理結果は USA15 に設置された SSW に送られる。 図 3.16 には、L1 トリガーメニューと、 p_T の関係を表す。また、図 3.17 には、コイン シデンスウィンドウの一例を示す。色ごとに p_T の値が違う。

L1 menu	pt1 \sim 6	condition
L1_MU0	pt1	$p_{\rm T}$ 6 GeV 未満
$L1_MU6$	pt2	p_{T} 6 GeV 以上
$L1_MU10$	pt3	現在使用されていない
$L1_MU11$	pt4	$p_{\rm T}$ 11 GeV 以上
$L1_MU15$	pt5	$p_{\rm T}$ 15 GeV 以上
$L1_MU20$	pt6	$p_{\rm T}$ 20 GeV 以上



図 3.16: L1 トリガーメニューと *p*_T の関係

図 3.17: CWの一例

Star Switch (SSW)

SLB AISC のリードアウト情報を収集・圧縮し、規定のフォーマットへ変換し ROD へ送る。1つの SSW で最大 23 個の SLB ASIC のデータを受け取る。

Read Out Driver (ROD)

TGC エレクトロニクスにおけるリードアウトシステムにおけるリード合おうとのデータ が最終的に集まるモジュールで、複数の SSW からのデータをトリガー情報をもとに同じ イベント毎にまとめ ROB に送る。

3.3 レベル1タイルミューオントリガー

3.3.1 Extended Barrel Tile Calorimeter

Extended Barel Tile Calorimeter は、鉄 (吸収体) とプラスチックシンチレーター (体積 比は約4.7:1)を用いた、サンプリング型ハドロンカロリメータであり、LAr 電磁カロリ メータの外側に設置されている。 $0.8 < |\eta| < 1.7$ 、 $-\pi < \phi < \pi を カバーしており、 \phi 方$ 向には、64 分割 ($\Delta \phi \sim 0.1$)されている。内径、外径はそれぞれ 2.28 [m]、4.25 [m]、z 方 向の長さは 2.6 [m] である。主に、ハドロン、ジェットに対して、エネルギーや消失横運 動量を測定し再構成する。透過性の高いミューオンは、このハドロンカロリメータ中で は MIP として振る舞うため、走った経路に沿ってエネルギーを落とす。

図 3.18 にカロリメーターの全体図を示す。図中で「Tile extended barrel」と書いてある 部分がこの節で説明しているカロリメータに対応する。



図 3.18: カロリメータの全体図 [2]

読み出しは、シンチレーターから波長変換ファイバーを通して、光電子増倍管 (Photomultiplier tube : PMT) に入力される。PMT とフロントエンドエレクトロニクスは、 drawer と呼ばれるアルミニウムの箱状の容器に収められており、drawer は Module の 背後に設置されているガーダ (support girder) の中に挿入されている。図 3.19 は、Tile Calorimeter の構造と信号の読み出しを示している。

図 3.20 は、この Tile Calorimeter の r-z 断面図である。1 つの Module もいくつかの Cell に分けられており、粒子が落としたエネルギーは Cell 単位で再構成される (図中の D5 や B11 などで区切られている区域が1 つの Cell に対応する)。



図 3.19: カロリメータからの信号の読み出し [10]

図 3.20: Tile Calorimeter の r-z 断面図 [10]

3.3.2 Tile Calorimeter-SL間の信号伝達処理

レベル1タイルミューオントリガーは、Extended Barrel Tile Calorimeter と TGC BW のコインシデンスに関するトリガーである。Run1において、レベル1ミューオントリガー で問題になっていたフェイクトリガー (第4章で述べる)を削減するために導入されたもので、1.05 < |n| < 1.3の領域において BW とのコインシデンスがとられる。

図 3.20 に示しているように η 毎に 1 つの Module を区切ると、複数の Cell にまたがった タワー (これを Trigger Tower という) ができるが、実際のコインシデンスに用いるのは、 1.05< $|\eta| < 1.3$ に対応する最外層の D5、D6 Cell である。これは、もともと D5、6 Cell には、レベル1トリガー用の信号の読み出しが用意されており、使用可能だったことによ るものである。また、これらの Cell における S/N 比 (ミューオンの信号とノイズの大き さの比) は、エネルギー閾値を設定して、コインシデンスを課すことが十分できる程大き い。**3.3.1** でも述べたように、ミューオンはカロリメータ中でエネルギーを落とすので、 そのエネルギー損失の情報を使ってコインシデンスをとる。

Tile Calorimeter からのアナログ信号は、Tile Muon Digitizer Board(以下、TMDB) に集 められ、そこでデジタル信号に変換されて Sector Logic に入力される。Sector Logic への 入力は、G-link Merger Board を通して行われるが、現在、1 Merger Board に対して、1 G-link を Tile Calorimeter と BW のコインシデンスに使用することになっている。1G-link は、40MHz で 17bit の情報の転送が可能である。一方これに対応して、Tile Calorimeter からの情報は、4(Tile Module) × (2–threshold) × (2–type-of-sum)=16bit の入力がなさ れるため、1 Sector Logic は、4 つの Tile Calorimeter Module(以下本論文では、TMDB Module という)を処理できる。



🗵 3.21: Tile Muon Digitizer Board

図 3.21 は、信号が TMDB Module から、TMDB に渡り、Sector Logic に渡されるま でのダイアグラムを示す。1 TMDB には、8 つの TMDB Module から信号が入力され、 TMDB で処理されたのち、デジタル信号が3 つの Sector Logic に入力されるようになっ ている。

	increase in Φ														
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Module3 Module2 Module1 Module0															
H L			-	H L			H L			н			-		
5+6	6	5+6	6	5+6	6	5+6	6	5+6	6	5+6	6	5+6	6	5+6	6
								0	0	1	1	0	0	1	0

図 3.22: 1 Sector Logic に渡される情報の形式

図 3.22 は、TMDBから Sector Logic に渡される情報の形式を示している。上記 16bit のうち、2-threshold は、Tile Calorimeter と BW とのコインシデンスにおいて要求されるエネルギー閾値に対応しており L、H はそれぞれ Low-threshold(500 [MeV])、High-threshold(600 [MeV])を表す。また、5+6 と書いてあるのは、D5、6 Cell においてそれぞれ再構成されたエネルギーの和という意味であり、6 と書いてあるのは D6 Cell で再構成されたエネルギーを意味している。一番下の段の0、1 に関しては、1 であればそのエネルギー閾値を超えた Hit があり、0 であれば閾値を超えた Hit はなかったということを意味している。例えば、Module0 の場合、D5、6 Cell で再構成されたエネルギーの和が 500 [MeV] 以上

で 600 [MeV] より小さいが、D6 Cell のみで再構成されたエネルギーは、500 [MeV] の閾 値を超えなかったことを意味している。2-threshold は、コインシデンスにおけるエネル ギー閾値のオプションであり、D5+6 と D6 Cell に分ける理由を含めて、コインシデンス 条件の最適化、トリガー効率やトリガーレート削減率の性能評価は第6章で詳しく解説 する。

3.3.3 Tile Calorimeter-SL 間のコインシデンスロジック

図 3.23 は、Tile Calorimeter と SL のコインシデンスロジックのブロックダイアグラムを 示している。TGC BW の信号を使って、 $r-\phi$ コインシデンスがとられた後、CW の LUT を参照して、Hit があったトラックの PT を決定する。一方、それとは別に Tile Calorimeter と BW とのコインシデンスにおける LUT(コインシデンスを要求する RoI、PT flag、エ ネルギー閾値、Tile Calorimeter Module の番号が指定されている)を作成しておき、それ を参照して、Tile Calorimeter からの情報がその条件を満たしていれば、トリガー系での 流れにしたがって、MUCTPI にトリガーが送られるようになっている。



図 3.23: Tile Calorimeter と SL のコインシデンスのブロックダイアグラム

第4章 Run2へ向けたアップグレード

4.1 Run1におけるトリガー性能

レベル1ミューオントリガーの性能はトリガー効率とトリガーレートの2点で評価する。以下ではその2点について定義と測定方法を述べる。

4.1.1 トリガー効率

レベル1トリガーにおけるトリガー効率 ε を以下の式で定義する。

$$\varepsilon = \frac{\nu \prec \nu 1 \, \mathbb{I} \, \mathbb{I$$

トリガー効率 ε は、Tag and Probe法と呼ばれる手法を用いて測定する。

• Tag and Probe 法

Tag and Probe 法とは、J/ ψ やZなどのダイミューオン崩壊から生成されたミューオンを選び出し、トリガー効率を測定する手法のことである。この手法によりイベントトリガーとは独立なミューオンを用いることが可能となり、ミューオンの同定及び運動量測定の確実性を高めることができる。本研究では、 $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ 事象 (図 4.1)を用いた Tag and Probe 法によりトリガー効率を算出する。以下にその手順を述べる。



1. Z boson mass(m_Z)の再構成

ATLAS 実験でのミューオンの飛跡再構成の1つとして、内部飛跡検出器とミューオン スペクトロメータでそれぞれ独立に再構成されたトラックにおいて、互いに適合するもの を選び出すアルゴリズムが存在する。このようにしてミューオンの飛跡を再構成するアル ゴリズムを staco と呼び、staco によって選ばれたミューオンの飛跡を staco muon と呼ぶ。 まず、1回のバンチ衝突でこの staco muon が2つ以上あるイベントを選ぶ。そのイベント の中で異符号の電荷を持つ2つの staco muon を選び出し、不変質量 $M_{\mu\mu}$ を算出する。こ の算出した $M_{\mu\mu}$ が m_z - 10 [GeV/c²] $\leq M_{\mu\mu} \leq m_z$ + 10 [GeV/c²]($m_z = 91.1876$ [GeV/c²]) を満たすとき、これらのミューオンは Z の崩壊から発生したものとみなす。図 4.2 に $M_{\mu\mu}$ の分布図を示す。



図 4.2: M_{µµ}の分布

2. Tag muon の選択

次に、選別した 2 つの staco muon のうち任意の片方を選ぶ。この staco muon の衝突 点での運動量方向を η_{μ} 、 ϕ_{μ} と表す。また、EF(イベントフィルター)で再構成され、かつ EF_mu24i_tight というトリガーが発行された飛跡の衝突点での運動量方向を η_{EF} 、 ϕ_{EF} と 表す (EF_mu24i_tight トリガーは、EF で $p_T > 25$ [GeV] と判定されたミューオン候補に 対して、ジェットに付随しない (isolated な) トラックであることを要求するトリガーの一 種である)。このとき、 $\Delta \eta = \eta_{\mu} - \eta_{EF}$ 、 $\Delta \phi = \phi_{\mu} - \phi_{EF}$ として、2 つの飛跡の衝突点で の運動量方向の差 ΔR を次のように定義する。

$$\Delta R = \sqrt{\Delta \eta^2 + \Delta \phi^2} \tag{4.2}$$

このときの ΔR の分布を図 4.3 に示す。

ここで $\Delta R \leq 0.01$ を満たす場合 (図 4.3 の黒の破線で区切られた左側の領域)、この staco muon に対して EF トリガーが発行されていると判断し、Tag muon とする。EF トリガー が発行されている場合、同イベント内に含まれる他の staco muon は発行されているトリ

ガーに関係なく保存されるため、Tag muon と対になるもう一方の staco muon は、イベ ントフィルターによるトリガーとは独立なミューオンサンプルだとみなせる。



3. Probe muon の選択

Tag muon と不変質量を組んだもう一方の staco muon を Probe muon と呼ぶ。Probe muon の方向が、TGC の設置されている向き (1.05 $\leq |\eta| \leq 2.42$) であれば式 (4.1) の分 母に加える。さらに、Probe muon に対してレベル 1 トリガーが発行された RoI との距 離を計算する。RoI の方向を η_{RoI} 、 ϕ_{RoI} と表し、 $\Delta \eta = \eta_{\mu} - \eta_{RoI}$ 、 $\Delta \phi = \phi_{\mu} - \phi_{RoI}$ と して式 (4.2) に代入して ΔR を計算する (このときの ΔR の分布を図 4.4 に示す)。ここで $\Delta R \leq 0.2$ を満たす場合 (図 4.4 の黒の破線で区切られた左側)、式 (4.1) の分子に加える。



1~3の手順でデータからミューオンを選び出し、トリガー効率を算出する。図 4.5 は 2012年のデータを用いて算出した $PT6(p_T \ge 20 [GeV/c]$ と判定されたトリガー)のトリ ガー効率である。

ここで、トリガー効率を次のように定義したフェルミ関数によってフィットした。

$$F(p_T) = \frac{P}{1 + \exp\{-(p_T - T)/R\}}$$
(4.3)

式 (4.3) において、P、R、T はそれぞれ Plateau efficiency、Resolution、Threshold を表 す。Plateau efficiency とは $p_T \ge 20$ [GeV/c] の平坦な部分を指し、Threshold はトリガー 効率の閾値を指す。また、Resolution は立ち上がりの鋭さを指す。



4.1.2 トリガーレート

トリガーレートとは、実データにおける時間あたり (ルミノシティあたり) のトリガー が発行された事象数である。図 4.6 は 2012 年の Run1 で取得されたデータを用いて算出 したトリガーである。白色のヒストグラムは L1_MU20 が発行されたイベント、青色のヒ ストグラムはオフラインミューオンの飛跡とマッチングのとれた L1_MU20 のイベント、 黄色のヒストグラムは $p_T \ge 20$ [GeV/c] と判定されたオフラインミューオンの飛跡とマッ チングのとれた L1_MU20 のイベントを表している。



4.1.3 フェイクトリガー

図 4.6 から分かるように、レベル1ミューオントリガーにおいて L1_MU20(PT6) と判定されたイベントを解析した結果、ミューオン由来でない信号によってトリガーが発行されていることが分かる。このようなトリガーはフェイクトリガーと呼ばれる。このトリガーの多くの割合を占めるフェイクトリガーを削減することが課題になっている。このフェイクトリガーの原因に次の2つが考えられる。

• 2次生成粒子

陽子陽子衝突後に ATLAS 検出器内を漂う陽子や中性子が、磁場領域付近のビーム パイプや磁石といった物質に衝突することで荷電粒子が生じる。この衝突点由来で はない 2 次生成粒子と pT の高い衝突点由来の粒子の飛跡が似ている場合、フェイ クトリガーが発生する。図 4.7 は衝突点由来の粒子を表し、B 及び C は 2 次生成粒 子を表す [11]。また、図 4.8 に磁場領域付近で生成された 2 次粒子がフェイクトリ ガーを発生させる様子を示す。赤線は磁場によって曲げられた 2 次生成粒子を表す。



図 4.7: 衝突点由来の粒子と2次生成粒子 [11] 図 4.8: 磁場領域付近で生成された荷電粒子

• ビームパイプから飛来する粒子

図 4.9 は、シミュレーションによって作成されたバレル部最内層の MDT(Barerel Inner:BI)におけるヒットのヒストグラムである。赤線のヒストグラムが光子、青線が中性子のヒットを表している。このヒストグラムから z~ 700 [cm] で粒子の量が増加していることが分かる。これはビームパイプがシールドされていない領域から飛来してきたためだと考えられている。これらの粒子が高い p_T を持つ衝突点由来のミューオンと似た飛跡を作る様子を図 4.10 に示す。赤の曲線が、ビームパイプがシールドされていない部分から飛来してきた光子や中性子によって生成された荷電粒子の飛跡を表している。



図 4.9: BIの Hit グラフ



1100

図 4.10: ビームパイプから飛来する粒子

現在のレベル1ミューオントリガーでは、上述の原因で生じた粒子がTGCに残す情報 とトリガーを発行したいイベント (p_T の高い衝突点由来の粒子)を区別できない。そのため、Run2からはこれらを区別してフェイクトリガーを削減することが必要となる。

4.2 Run2へ向けての改良

4.2.1 概要

LHC のアップグレード

LHC では重心系のエネルギーとルミノシティ増強のため、2013~2014 年のシャットダウン期間中に次の変更が計画されている。

- 超伝導マグネットの修理
 現在の超伝導マグネットは一部で接合部の電気抵抗が大きく、大きな電流を流すことが出来なくなっている。その超伝導マグネットを修理・交換し、内部抵抗をより小さくする。
- ビームパイプ内の真空度の向上
 空気が漏れている箇所を交換することで、ビームパイプ内の真空度を向上させる。

ATLAS 検出器のアップグレード

ATLAS 検出器では、Run2 に向けて次の変更が計画されている。

- Pixel 検出器の増設
 b クォーク同定の効率向上のために、最内層に新たな Pixel 検出器 (Insertable Blayer:IBL) が挿入される。
- ビームパイプの交換とシールドの追加 フェイクトリガーを抑えるため、ビームパイプを現在のステンレスからより質量数 の小さいアルミニウムへ交換する。これによって2次生成粒子との相互作用を抑え る。また、ビームパイプから飛来する粒子を止めるため、シールドを追加する。

4.2.2 レベル1ミューオントリガーの変更

レベル1ミューオントリガーにおいて、Run2からはこれまで使用されていなかった TGC Inner Station と Tile Calorimeter のコインシデンスが導入される。この新たに導 入されるコインシデンスを Inner Coincidence という。Inner Coincidence の導入によって フェイクトリガーの削減が期待される。これについては 4.3 節で説明する。

4.3 Inner Coincidence

Inner Coincidence は、TGC Big Wheel(M1、M2、M3) と Inner Station(FIのみ)、TileCalorimeter との間でとられるコインシデンスで、エンドキャップ部の RoI でトリガーが発行され たイベントに対し、ワイヤー (R 方向) とストリップ (ϕ 方向) のコインシデンスが取られ た後に要求される。

FI とのコインシデンス

TGC の配置と形状を図 4.11 に示す。EI が設置されている位置とバレルトロイド磁石が 設置されている位置には重なる部分が存在し (図 2.15)、EI は全 ϕ 領域の約 60%しか占め ていないため、EI は Inner Coincidence においては使われない。FI を要求する領域は、 $1.3 < |\eta| < 1.9$ に対応する。



図 4.11: TGC の配置と形状 [19]

Inner Coincidence は全ての RoI に対して要求されるのではなく予め Inner Coincidence を要求する RoI を決定し、それ以外の RoI には現行のトリガーを用いる。これは、図 4.11 のように FI は Big Wheel と比ベカバーする領域 ($\eta - \phi$ 平面) が小さく、全ての RoI に Inner Coincidence を要求することは出来ないからである。FI とのコインシデンスは RoI を 8 つまとめたサブセクタークラスター (Sub Sector Cluster:SSC) 毎に、FI のどのチャ ンネル (ワイヤー、ストリップそれぞれ) にヒットを要求するかを決める。また、SL で発 行されるどの p_T 閾値に対してコインシデンスを要求するかも決める [18]。

Tile Calorimeter とのコインシデンス

FIとのコインシデンスで述べたように、 $1.05 < |\eta| < 1.3$ では、EIが全 ϕ 領域をカバーで きていない。そこで Inner Station よりもさらに内側に設置されている Tile Calorimeter と BW とのコインシデンスをとる [12]。図 4.12 は ATLAS 検出器の r-z 平面におけるクォー ターカットを表しており、赤点線で η の範囲を区切っている。 $\eta \simeq 1.3$ は、Inner Station との境界だが、できる限り TileCalorimeter とのコインシデンスの領域とする。



図 4.12: InnerStation、Tile Calorimeterの配置

第5章 モンテカルロシミュレーション

5.1 モンテカルロサンプルの作成

ATLAS 実験におけるデータの処理・解析は Athena と呼ばれるソフトウェアフレーム ワークに従って行われる。Athena によるシミュレーションは大別して4つのプロセスか ら構成されている。以下に、その流れを説明する。

イベント生成 (Event generation)

検出器に入射させるための物理事象そのもののシミュレーションを行う。理論によって 予測される陽子陽子衝突で起こる物理事象をモデル化し、モンテカルロシミュレーショ ンを用いて再現する。例えば、検出器の性能評価のためのシングルミューオンや、陽子 陽子衝突における $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ 、 $Z \rightarrow e^+e^-$ 、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ などの様々なイベントを生成させるこ とができる。

検出器シミュレーション (Simulation)

Genat4というシミュレータを用いて測定器の詳細な形状と磁場分布に応じて粒子がどのような飛跡をたどるかを再現する。イベント生成のプロセスによって生成された事象 情報を受け取り、衝突点付近から発生した粒子の測定器や構造体中での相互作用をシミュ レートし、飛跡を求める。ミューオンが検出器の有感領域に作ったヒットはエネルギー や時間、位置などの情報を持つ。その結果は Hit と呼ばれるデータとして出力される。

デジタイゼーション (Digitization)

ヒットに対する検出器の反応のシミュレーションを行い(検出器の振る舞いを再現し)、実際の測定器の出力に変換する。ビームテストや実データの解析による結果から各検出器 の検出効率や信号の時間差といったパラメータを設定する(特にクロストークの効果を 含むパラメータ)。また、各検出器のトリガーシミュレーションはこの段階で行われるた め、本研究の対象である Tile Calorimeter と TGC BW とのコインシデンスを処理し、ト リガーを発行するシミュレーションもここで実装される。これらの過程を経て、シミュ レーションデータは実際の ATLAS 検出器で得られる測定データと等価な情報となる。そ の結果は、RDO(Raw Data Object)と呼ばれるデータとして出力される。

*クロストーク

図 5.1 は、ミューオンが TGC を通過する様子を表した模式図である。赤色の丸がミュー

オン、矢印がミューオンの飛跡を表している。また縦に並べた長方形がTGCのストリッ プを表し、黄色く塗られた長方形は信号を出力していることを表す。図5.1の右側のよう に、ミューオンが通過したストリップのみでなく、その近傍のストリップも信号を出力 することをクロストークと呼ぶ。これは、荷電粒子が通過したストリップが近傍のスト リップにも電荷を誘起し、複数のストリップで信号が生じてしまうためである。この信 号が ASD の閾値を超えた場合、偽のヒット情報として記録されクロストークとなる。



図 5.1: クロストークの模式図

リコンストラクション (Reconstruction)

検出器で読み出された信号から、荷電粒子の飛跡、運動量、エネルギーなど解析に必要 な情報を再構成し、計算する。

実データから得られる結果を解析する場合、結果として何かしらのトリガーが発行さ れたイベントのみを使って解析を行うので、イベント全体におけるそれ以外の(トリガー されなかった)イベントの振る舞いまでは分からない。一方シミュレーションを用いると、 初期値を自分で設定し、それらのイベント全体が検出器中でどのように振る舞ったかを 解析することができる。またその各段階でシミュレートされる検出器やエレクトロニク ス単位での情報も抜き出すことができる。つまり、実データから得られる結果が妥当かど うかを判断する材料となるだけでなく、それらを用いることにより実データからは得る ことができないような情報を含めて、より詳細な解析を行うことができる。これが、実 データの解析とともに、モンテカルロシミュレーションを行うモチベーションとなる。

*本研究では、2015年からのRun2用の改良を施したシミュレーション全体が完成して いなかったため、この正規の手順を経て得られる形式のファイルを用いての解析ができ なかった。そのため、シミュレーションの各段階で必要な情報をテキストファイルとし てダンプし、シミュレーションから得られる結果の解析を行った。

5.2 Inner Coincidence の実装

この節では、 **5.1** 節で説明したシミュレーションへの、Tile Calorimeter と TGC に関 する Inner Coincidence の実装について説明する。

5.2.1 Tile Calorimeter に関する実装

Tile Calorimeter に関する実装は、Tile Calorimeter グループによって行われた。5.1 節 での Geant4 によるシミュレーションにおいて、実際の Tile Calorimeter を構成する物質 と入射粒子との相互作用がシミュレートされる。この Hit 情報には荷電粒子のエネルギー 損失、通過位置、また、その時間情報が含まれており、デジタイゼーションに渡される。 デジタイゼーションでは、二段階のアルゴリズムが適用され、第1段階ではまず、Pulse Simulation が行われる。ここでは、Geant4 から得られた情報をもとにして、0.5 [ns] の bin 幅で足し合わされた波形のデータがテキストファイル形式でデータベースに記録され、そ の波形データを7つの Digit 情報 (その bin に対応する ADC 値) に変換する。次に整合フィ ルター (Matched Filter) で、この7つの Digit 情報を受け取り、検出器中や読み出し経路等 のノイズを考慮した上でフィットを行い、荷電粒子が落としたエネルギー (E) やその時間 (t) が再構成される (図 5.2 の ALGORITHM1 での QF(Quality factor) は、 χ^2 に対応する 量である)[15]。そして、第2段階のアルゴリズム (TileCal trigger decision) には、この再 構成された情報が渡され、Tile Calorimeter Cell 毎のエネルギー情報は 4bit の情報に変換 される。これが、最終的に TGC に渡すデータの形式となり、TileMuonReceiverContainer というコンテナに保存される。図 5.2 に、この流れの概要図を示す。



図 5.2: Tile Calorimeter に関する実装

図 5.3 には、デジタイゼーションにおけるデータの形式を各段階毎に示している。一番 左の図は、Geant4 Simulation から受け取る波形データを表している。これが第1段階の Palse Simulation によって中央の図中の7つの bin でデジタル化されたパルスの波形に変 換される。次いで、Matched filter においてノイズを考慮した上で、このデジタル化され たパルスを黒の実線で表されているようにフィットを行い、エネルギー情報などを再構成 する。この再構成されたエネルギー情報は、一番右の4つの bit 情報のように変換されコ ンテナに記録される。1 Sector Logic に渡される情報の形式は、**3.3.2**の図 3.22 の通りで ある。



図 5.3: シミュレーション中でのデータ形式の流れ (各段階毎のデータ形式の概念図であ り、同一の波形の情報を表しているわけではない)

5.2.2 TGC に関する実装

TGC トリガーシミュレーションは、検出器のシミュレーションである TGC Digitization とトリガーエレクトロニクスのシミュレーションである TGC Trigger Simulation からな る。レベル1タイルミューオントリガーの処理が行われるのは TGC Trigger Simulation においてであり、これは TrigT1TGC というツールが担っている。TrigT1TGC は、TGC システムのトリガー系のハードウェアの動作をエミュレートするものである。そのため、 TGC Digitization から渡された RDO から Sector Logic のデータを作り出し、ハードウェ アの実機の評価などを行うことができる。このトリガーシミュレーションを行うことで、 本研究においては、レベル1タイルミューオントリガーの性能評価や、実データから得 られたトリガー効率のロスなどについて調べている。

本来この処理は、デジタイゼーションの段階で行われるべきだが、Tile Calorimeter の デジタイゼーションが終わった後に情報を引き出すので、再構成の初期の段階でおこな われる。

Tile Calorimeter の場合と同じく、**5.1**節でのGeant4によるシミュレーション (TGCG4) において、実際のTGC 中での物質と入射粒子との相互作用がシミュレートされ、TGC に おける Hit 情報として TGC Digitization に渡される。ここで検出器のシミュレーションが 行われた後に、トリガーシミュレーションのために TrigT1TGC に渡される。TrigT1TGC の核となるアルゴリズムは、LVL1TGCTrigger クラスであり、SL から Trigger までの操 作を行う [16]。

Sector Logic において、 $r-\phi$ コインシデンスが取られた後、StoreGate と呼ばれる Athenaの 記憶領域にアクセスし、そこで TileMuonRecieverContainer から情報を引き出す (retrieve する)。これを行うのは、LVL1TGCTrigger クラスの fillTMDB Method である。retrieve された情報は、Hit があった TMDB Module の Side と Module#、Cell 中での Hit(0 また は 1) に関して適切な単位に変換され、TMDB クラスのオブジェクトにその情報が格納さ れる。

一方、Sector Logic クラスから、Tile Calorimeter の情報について、TMDB クラスに要求 があると、TMDB クラスが TMDBOut というクラスに指令を出し、Tile Calorimeter の 情報を格納していたオブジェクトの情報を Sector Logic に渡すようになっている。

ここであらかじめ定めておいた、Tile Calorimeter と BW とのコインシデンスにおける LUT(適用する RoI や、Hit した荷電粒子の PT Flag、エネルギー閾値) を参照して比較 し、コインシデンスの条件を満たしていたらトリガーが発行される。 図 5.4 に、データの流れを表す。赤線、青線はそれぞれ TGC と Tile Calorimeter にお けるデータの流れを表す。また、Sector Logic クラス内で参照される LUT の一例を図 5.5 に示す。#がついた行から 2 行が 8 つの Rol 毎でまとめたコインシデンスの条件が指定さ れている。例えば、# 0 0 1 の行の最初の 3 つの数字はそれぞれ、Side、Trigger Sector#、 SSC#を表し、次の 6 つの数字は、コインシデンスを要求する PT Flag を、その次の 8 つ の数字は、コインシデンスにおいて使用する Rol の Flag を表している。2 行目の 4 つの 数字は、4 つの TMDB Module に対応しており、それぞれ要求されるエネルギー閾値が 設定されている。



図 5.4: TGC に関する実装

#	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	3	3	0														
#	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	3	3	0														
#	0	0	2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	3	3	0														
#	0	0	3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	3	3	0														

図 5.5: LUT の例

第6章 Inner Coincidence導入に向け た最適化と性能評価

6.1 コインシデンスの最適化

6.1.1 エネルギー閾値

図 6.1 に、実データにおいて Tile Calorimeter Cell で再構成されたエネルギー分布の一例 を示す。縦軸はエントリー数、横軸は再構成されたエネルギー [MeV] である。0 [MeV] 付 近のピークはペデスタルであり、500 [MeV] より大きいエネルギー範囲での分布はミュー オンによるものである。

水色のヒストグラムは、TGC において $p_T \ge 20$ [GeV/c] と判定されたトラックのうち、 オフラインで再構成されたミューオンとマッチングがとれたイベントの Cell 中でのエネ ルギー損失を表す。紫色のヒストグラムは、読み出し経路の電気ノイズを考慮して Cell で再構成されたエネルギーを平均にとり、1 $\sigma = 200$ [MeV] の Gauss 分布で振った分布を 表し、実際の TMDB Module をエミュレートしたものである。



図 6.1: D5+6 Cell (C-side, TMDB#60) で再構成されたエネルギー分布

これから Inner Coincidence に用いるエネルギー閾値として 500 [MeV] 付近に設定する とよいことが分かる。トリガー効率とレート削減率のエネルギー閾値依存性については 6.2 節で述べるが、実際に用いるエネルギー閾値は 500 [MeV] に設定されている。

6.1.2 Tile Calorimeter Cell におけるエネルギー損失と η の関係

 η に関してどの Tile Calorimeter Cell の情報を用いるかについて述べる。図 6.2 に Tile Calorimeter Cell(A-side) において再構成された平均のエネルギー損失の $|\eta|$ 依存性 を示 す。赤丸、青丸はそれぞれ D5、D6Cell 中でのエネルギー損失で、黒丸は D5 Cell と D6 Cell のエネルギー損失の和を表している [14]。

 $1.05 < |\eta| < 1.2$ では D5 と D6 Cell のエネルギー損失の和が安定してほぼ一定の値をとり、一方 $1.2 < |\eta| < 1.3$ では D5 Cell のエネルギー損失はほとんど無く、D6 Cell のエネルギー損失のみとなっていることが分かる。 $|\eta| \simeq 1.24$ からグラフが落ち始めているのは、粒子が D6 Cell 中を通る平均距離が短くなっていることによる影響である。

これから、 $1.05 < |\eta| < 1.2$ では D5 と D6 Cell のエネルギー損失の和を、 $1.2 < |\eta| < 1.3$ では D6 Cell のみのエネルギー損失の情報を用いるべきであることが分かる。



図 6.2: Tile Calorimeter Cell で再構成された平均エネルギーと |η| の関係 [14]

図 6.3 は、Tile Calorimeter Cell (D5, D6 Cell)で再構成されたエネルギーの |η| 依存 性を示している。縦軸は以下の式で定義される。

Energy Deposit Asymmetry (EDA)



図 6.3: D5、D6 Cell で再構成されたエネルギーの |η| 依存性

図 6.3 から分かるように、ミューオンは、 $1.05 < |\eta| < 1.2$ では D5 Cell と D6 Cell どち らにもエネルギーを落とし ($|\eta|$ が増加するにしたがって EDA が1から0を横切り –1ま で減少しながら分布している)、 $1.2 < |\eta| < 1.3$ では D6 Cell のみにエネルギーを落とす ことが分かる。($|\eta|$ が増加しても、EDA は –1 で一定の分布をしている。)

これは先の議論を裏付けており、TGC と Tile Calorimeter のコインシデンスをとる場合、 TGC の 1.05 < $|\eta|$ < 1.2 の範囲に Hit があった場合は、D5 Cell と D6 Cell で再構成さ れたエネルギーの和を、ミューオンが Tile Calorimeter に落としたエネルギーとして用 い、1.2 < $|\eta|$ < 1.3 では D6 Cell で再構成されたエネルギーのみをミューオンが Tile Calorimeter に落としたエネルギーとして用いる。

6.1.3 Trigger Sector と TMDB Module の位置関係

Inner Coincidence における Trigger Sector と TMDB Module の対応関係について述べる。図 6.4 はレベル 1 トリガーが発行されたときの Trigger Sector の番号($\#0 \sim \#47$) を横軸に、そのトリガーに対応するイベントが 500 [MeV] 以上のエネルギーを落とした TMDB Module の番号($\#0 \sim \#63$)を縦軸にとったものである。マス目の色はエント リー数を表している。



図 6.4: TMDB Module と Trigger Sector の位置関係

対角線上のエントリー数が高い2つのマス目は、Trigger Sector と TMDB Module 間 のジオメトリ関係を明確に表しているが、レベル1トリガーが発行された1つの Trigger Sector に対して、荷電粒子がエネルギーを落とした TMDB Module の数は1つではなく、 複数に渡って広がっていることが分かる。これは、飛来する荷電粒子が Tile Calorimeter から TGC に到達するまでに (p_T が高い粒子であっても) 磁場によって多少曲げられたり、 TileCalorimeter 中で多重クーロン散乱を起こすことにより元々の方向とは異なる方向に 曲げられてしまうことよるものと考えられる。

Sector Logic の処理の制限から1つの Trigger Sector に対して、4つの TMDB Module の情報が利用できるように設定されてあるが、デフォルトではコインシデンスを要求す

る TMDB Module の数は 2 つに設定してある (対角線状に色がついたマス 2 つに対応している)。例えば、Trigger Sector #2 中の RoI に Hit があった場合は、コインシデンスを要求する TMDB Module は (デフォルトでは)#0 と#1 である。一方で、オプション指定により、その 2 つの Module に隣接した Module にもコインシデンスを要求できるようになっている。

図 6.4 を拡大して、1Sector Logic 毎に処理できる Trigger Sector と TMDB Module の範 囲を表したものを図 6.5 に示す (赤点線枠で囲まれた 4 × 2 の 1 ブロックが Sector Logic 単 位で処理できる Trigger Sector と TMDB Module を表している)。



また、この対応関係を表としてまとめたものを付録に載せている。

図 6.5: Sector Logic への入力を意識した図 6.4 の拡大図。デフォルトでは、1 つの Trigger Sector に対して対角線上に色のついた 2 つの TMDB Module にコインシデンスを要求す るが、(赤点線枠内の)隣接した Module にも要求できるように設定されてある。1 Sector Logic においてコインシデンスを要求できる隣接した Module が図のような配置になって いるのは、TMDB Module や Trigger Sector からの双方の入力に対して、Sector Logic が 処理できる範囲に制限がかかるためである。

6.1.4 η と RoI の対応関係

図 6.6 に η と RoI の対応関係を示す。縦軸は RoI の番号で、横軸は対応する $|\eta|$ である。 TGC と Tile Calorimeter とのコインシデンスにおいては、RoI#0 ~ 27 には 1.05 < $|\eta| \le$ 1.2 を対応させ、RoI#28 ~ 39 には 1.2 < $|\eta| < 1.3$ を対応させている。



6.1.1からここまでに述べたことを使って、TGCのRoIに対して参照するTile Calorimeter Cellを特定し、コインシデンスを課す条件を指定できる。

例えば、TGC の Trigger Sector#2 の RoI#0 に Hit があった場合、TMDB Module#0 ま たは1 (図 6.4 より)の D5+6 Cell(図 6.6 と図 6.3 より) に閾値以上のエネルギーが落とさ れていることを要求する。

6.1.5 RoI 毎のトリガー効率

次に、RoI 毎のトリガー効率について説明する。図 6.7 の上の図において縦軸はエント リー数、横軸は RoI の番号である。青色のヒストグラムは、TGC で $p_T \ge 20$ [GeV/c](PT6) と判定された track(L1_MU20)のうち、オフラインによって衝突点由来を確認されたミュー オンとマッチングがとれたイベントである。赤色のヒストグラムは、前述したイベント のうち、エネルギー閾値を 500 [MeV] として Inner Coincidence を課して残ったイベント を表す。図 6.7 の下のトリガー効率のグラフは上の赤色のヒストグラムを青色のヒストグ ラムで割って得られるものである。RoI#~40 はちょうど $|\eta| = 1.3$ の境界付近に位置して いるので、トリガー効率が急激に落ちはじめている。また、RoI 4 つを 1 組として中央 2 つがエントリー数が高く、両端の 2 つが低い規則的な形状が表れている。これは、隣り合 う Trigger Sector にはオーバーラップがあり、このオーバーラップの領域 (Trigger Sector の両端)に位置する RoI に起因するものである。TGC BW のエンドキャップ部では、1つ の Trigger Sector は ϕ 方向に4つの RoIを持ち、中央2つの RoI がエントリー数が高い RoI、両端2つの RoI がエントリー数が低い RoI に対応している。この両端の RoI が隣り 合う Trigger Sector の片端の RoI とそれぞれ重なり合う。そこでこれらの RoI では、粒 子のダブルカウントを防ぐために RoI 内の全てのストリップは使用しておらず、一部の ストリップのみを使用している。一方中央2つの RoI では全てのストリップを使うため、 両端の RoI は有効なストリップの数が中央2つの RoI に比べ相対的に少なくなる。これ がヒストグラムにおいて、RoI4 つ分の規則的な形状として反映されている。 TGC と Tile Calorimeter とのコインシデンスには RoI#0~39 を使う。



図 6.7: RoI 毎のトリガー効率

6.2 Inner Coincidenceの性能評価

6.1 節で得られたことを用いることにより、TGC と Tile Calorimeter のコインシデンス において、TGC のある RoI(1.05 < $|\eta| < 1.3$)に Hit があった場合、その $|\eta|$ の範囲によっ て Tile Calorimeter のどの Cell の情報を使い、Hit があった RoI が属する Trigger Sector の番号から、Tile Calorimeter のどの Module の情報を使えばよいかが分かった。 6.2 節では、実データ、シミュレーション双方における Inner Coincidence の性能評価に ついて述べる。

6.2.1 実データを用いた性能評価

図 6.8 に、トリガー効率とトリガーレート削減率それぞれにおけるエネルギー閾値依存 性を示す。縦軸はトリガー効率及びトリガーレート削減率 (軸の目盛りは共通)、横軸は エネルギー閾値である。Cell で再構成されたエネルギーを smear した場合と、していな い場合それぞれプロットしている。表 6.1 にこれらの具体的な数字を示している。



図 6.8: Efficienecy(赤) とレート削減率 (青) のエネルギー閾値依存性

	;	Smear	No smear				
Energy threshold [MeV]	Efficiency	Rate reduction	Efficiency	Rate reduction			
100	99.1	61.4	98.4	13.3			
200	98.6	44.5	98.0	12.4			
300	98.2	30.8	97.8	12.1			
400	97.7	21.5	97.7	11.9			
500	97.1	16.2	97.5	11.7			
600	96.4	13.5	97.2	11.6			
700	95.3	12.1	96.7	11.4			
800	93.6	11.3	95.8	11.3			
900	91.1	10.7	94.2	11.0			
1000	87.4	10.2	91.7	10.7			
1100	82.7	9.5	87.5	10.1			

表 6.1: トリガー効率及びトリガーレート削減率

エネルギー閾値が 500 [MeV] では、エネルギーを smear した場合のトリガー効率は約 97 %、トリガーレート削減率は約 16 %となり、トリガー効率を保ちつつ、トリガーレー トを削減できることが期待される。実際のエネルギー閾値のデフォルトは 500 [MeV] に 設定してあるが、オプションとして 600 [MeV] に切り替えて設定できるようにもなって いる。

約3%のトリガー効率のロスの詳細については、シミュレーションを用いて **6.2.3** で評価 する。

6.2.2 シミュレーションによる評価

6.2.1では、実データを用いてのトリガー効率とトリガーレート削減率を評価したが、 この節ではシミュレーションを用いてトリガー効率を評価する。実データでは、衝突点 由来を確認された (tracking された) ミューオンとマッチングのとれたイベントに対して のみしか評価ができなかったのに対して、シミュレーションを用いると衝突点における ミューオンの (η, ϕ) 方向と TGC の Hit 位置における (η, ϕ) 方向が必ずしもそろっていな いイベントに対しても評価を行うことができる (作成したサンプルは真のミューオンだけ だからである)。これにより、磁場による影響 (ミューオンの軌道がどれだけ曲げられた か)、TMDB Module 間の間隙を通ってくるイベントはどれだけか、TMDB Moudule で のノイズがどれだけの影響を及ぼすか、などの詳細な評価を行うことができる。 シミュレーションで用いたミューオンサンプルとコインシデンスの条件は以下に示す。

- シングルミューオン $(p_T : 20 \sim 50 \; [\text{GeV/c}])$
- $1.05 < |\eta| < 1.3, 0 < \phi < 2\pi$
- エネルギー閾値 500 [MeV] (TGC の Hit に対して要求する Tile Calorimeter Cell の情報は、6.1 節の内容に基づいて得る)

図 6.9 に、RoI 毎のトリガー効率を示す。縦軸はエントリー数、横軸は RoI の番号を表 しており、6.1.5 の図 6.7 の上のヒストグラムと対応している。青色で表されたヒストグ ラムは、TGC において $p_T \ge 20$ [GeV/c] と判定されたシングルミューオン、赤色で表され たヒストグラムは、それらのミューオンのうち Inner Coincidence を課して残ったミュー オンである。一方図 6.10 は RoI 毎のトリガー効率であり、図 6.7 の下のグラフと対応し ている。このグラフは、図 6.9 の赤色のヒストグラムを青色のヒストグラムで割って得ら れるものである。



図 6.9: シミュレーションによる RoI 毎のトリガー効率のヒストグラム



図 6.10: シミュレーションによる RoI 毎のトリガー効率のグラフ



トリガー効率は、20 [GeV/c]< p_T <25 [GeV/c] では96.6 %、25 [GeV/c]< p_T <30 [GeV/c] では97.0 %、30 [GeV/c]< p_T <50 [GeV/c] では97.6 %であった。 20 [GeV/c]< p_T <50 [GeV/c] の全ての範囲においては97.1 %で、実データによる結果と 無矛盾で再現できているといえる。

6.2.3 トリガー効率のロスの評価

いる。

6.2.1 の実データの解析では、500 [MeV] のエネルギー閾値を設定したときのトリガー 効率は約97%であったが、そのロス (~3%)の詳細については分からなかった。これは、 オフラインミューオンとのマッチングがとれたイベントに対してしか評価ができないた めである。6.2.2において、シミュレーションにより真のミューオンのみを生成し、それ らイベント全体に対して解析をすることによりトリガー効率は約97%と実データを再現 していることが分かった。この節では、その残りの約3%のトリガー効率のロスの詳細 について述べる。以下にその概要を示す。

- TGC の Hit があった RoI に対応する Tile Calorimeter Cell において、 エネルギー閾値を超えるエネルギー損失があったが、コインシデンスがとれていな いイベント:
 0%
 → TGC においてトリガーシミュレーションが正しく行われていることを示して
- Tile Calorimeter から TGC に到達するまでに磁場によってη方向に曲げられ、TGC には Hit があるが、対応する Cell には Hit がないと考えられるイベント:
 0.07 %
- Tile Calorimeter から TGC に到達するまでに磁場によってφ方向に曲げられ、 要求する TMDB Module に隣接した Module に Hit があったと考えられるイベント: 0.99 %
 → このうち、約0.4 %は、コインシデンスにおいて要求する TMDB Moduleの数 を2つから3つに変更することでコインシデンスをとることができる
- どの Cell にも Hit がない、または要求する TMDB Module とは離れた場所に Hit が あったと考えられるイベント:
 1.94 %
 → これらのイベントは、TMDB Module 間の間隙を通って TGC に到達したイベ ントと考えられる。
 (したがって、Cell 中でのエネルギー損失量がエネルギー閾値を超えない)

6.2.4 全体のトリガーレート削減率

最後に、 $|\eta| < 2.5$ の領域において、Inner Coincidence (Tile+FI)を課した場合のトリ ガーレート削減率について述べる。このヒストグラムを図 6.12 に示す (縦軸エントリー 数、横軸 η)。青色のヒストグラムは L1_MU_20、赤色のヒストグラムは、これらのイベ ントのうち Inner Coincidence を課して残ったイベント、黄色のヒストグラムはオフライ ンで $p_T \ge 20$ [GeV/c] と判定されたミューオンのイベントである。



|η| < 2.5 の領域におけるトリガーレート削減率は、56.9 %であった。 図 6.13 は、2012年のデータを使った、レベル1トリガーのルミノシティ当たりのトリガー レートである [13]。ルミノシティが7×10³³ [cm⁻²sec⁻¹] では、L1_MU20 のトリガーレー トは約 5.7 [kHz] 程度であることが分かる。



 \boxtimes 6.13: L1 muon trigger rate[13]

図 6.14: 50 [ns] と 25 [ns] の比較 [19]

図 6.14 は、2011 年の Run において、バンチ衝突間隔 50 [ns] で取得されたデータをル ミノシティで規格化することで比較したトリガーレートである。青色のヒストグラムが バンチ衝突間隔 50 [ns] で取得されたデータを表し、赤線が 25 [ns] で取得されたデータ を表す。トリガー発行回数は、 $|\eta| < 2.42$ では 1.3 倍になっている (エンドキャップ領域で は、約 1.6 倍)[19]。

これらのことから、Run2においての、L1_MU20のトリガーレートを簡単に概算すると、 5.7 [kHz] × 1.3 × (13 [TeV] / 8 [TeV]) × (2.0× 10³⁴ [cm⁻²s⁻¹] / 0.7 × 10³⁴ [cm⁻²s⁻¹])≃ 34.4 [kHz] 程度になると予想される。これに、Inner Coincidece を用いることによりトリ ガー効率を保ちつつ、トリガーレートを 34.4×0.569 ≃ 19 [kHz] 程度まで落とすことがで きると考えられる。

第7章 結論

本研究では、Run2においてレベル1タイルミューオントリガーを用いる際のコインシ デンス条件の最適化と、トリガー効率の評価、そしてトリガーレートの削減率について 評価を行った。トリガー効率は、実データとシミュレーション双方においても約97%と いう無矛盾な結果を得た。また、約3%のロスのうち、2%は TMDB Module 間の間隙を 通って TGC に飛来したミューオンによるものであり、1%は、Tile Calorimeter から TGC に到達するまでに磁場によって ϕ 方向に曲げられたミューオンによるものだということ がシミュレーションを用いた解析から分かった。

Inner Coincidence を用いた時のトリガーレートの削減率は、Tile Calorimeter の情報を用いる $1.05 < |\eta| < 1.3$ の領域では約 16%、 $1.05 < |\eta| < 2.4$ の TGC がカバーする全 η 領域 においては約 56.9%であり、トリガー効率を保ちつつ、効果的にトリガーレートを削減で きる。

レベル1タイルミューオントリガーは、Run2の途中から導入される予定である。

謝辞

本研究はたくさんの方々に支えられて進めることができました。まず初めに指導教官 の藏重久弥教授には、このような研究の機会を与えて頂き深く感謝致します。私は幾分 マイペースな所がありますが、辛抱強く見守って頂きありがとうございました。また、私 が研究で困難に直面したときには幾度となく適切な助言を賜りました。真に有り難うご ざいました。

山崎祐司教授、清水志真氏、前田順平氏には、多くのご指導を頂き、研究に対する理 解が深まりました。また、石野雅也氏、隅田土詞氏をはじめとする ATLAS JAPAN トリ ガーグループの方々にはミーティングやメールを通じて数々の助言を頂きました。大変 有り難うございました。

秘書の横山有美様には出張などの手続きをはじめ、私の研究活動をサポートして頂き ました。真に有り難うございました。

岸本巴氏、稲丸由夫輝氏、来見田吏恵氏には、研究を進める上で様々な助言を頂きま した。皆様の適切かつ丁寧なアドバイスに助けられることが多々ありました。深く感謝 しております。

そして、ともに修士2年間の研究生活を送ってきた、長谷川誠氏、陳叶氏、竹本強志 氏、山口祐史郎氏、山根史弥氏に感謝します。有意義で楽しい研究生活を送ることがで きました。ありがとうございました。

研究室の先輩である、細川圭志氏、岡直哉氏、大西洋輔氏、後輩である、木戸将吾君、 橋本隆君、藤田黎君、山内悟君、B4の学生や素粒子物理学研究室の皆様には日々の研究 生活の中で、様々な刺激をもらいました。皆様のおかげで日々楽しく過ごすことができ ました。心より感謝致します。

最後に、私を励まし支え続けてくれた家族に対して感謝の意を述べて謝辞とさせて頂 きます。真に有り難うございました。

参考文献

- [1] Yu Suzuki, "Upgrade of the ATLAS Level-1 Muon Trigger for the High Luminosity LHC", 総合研究大学院大学博士論文, 2013.
- [2] ATLAS EXPERIMENT, http://atlas.ch
- [3] ATLAS EXPERIMENT Public Results, https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic
- [4] CMS EXPERIMENT, http://cms.web.cern.ch
- [5] The LHCb collaboration, http://lhcb.web.cern.ch/lhcb
- [6] LHC ALICE PROJECT, http://alice-j.org/alice_a.html
- [7] Michael Spira, Peter M.Zerwas, "Electroweak Symmetry Breaking and Higgs Physics", arXiv:hep-ph/9803257v2, Mar 6 1998.
- [8] The ATLAS Collaboration, "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC", Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29,31 July 2012.", Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29, 31 July 2012.
- [9] The ATLAS Collaboration, "Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data", Phys. Lett. B 726 (2013) 120-144, 7 October 2013.
- [10] The ATLAS Collaboration, "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider", 2008 JINST 3 S08003.
- [11] The ATLAS Collaboration, "Letter of Intent for the Phase-I Upgrade of the ATLAS Experiment", CERN- LHCC-2011-012, January 2012.
- The ATLAS Collaboration, "Technical Design Report for the Phase-I Upgrade of the ATLAS TDAQ System", CERN-LHCC-2013-018 ATLAS-TDR-023, November 30 2013.
- [13] The ATLAS Collaboration, "Performance of the ATLAS muon trigger in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV", ATL-COM-DAQ-2013-147, February 27, 2014.
- [14] Marco van Woerden, "Average energy response versus η and $\Delta \phi$ in TileCal D5 and D6 cells ($\eta > 0$), using collision muons in 2012 data.", ATLAS-PLOT-TILECAL-2013-009.

- [15] J M Seixas, "Quality Factor for the Hadronic Calorimeter in High Luminosity Conditions", ATL-TILECAL-PROC-2014-024.
- [16] 吹田航一, "ATLAS 実験前後方部レベル1 ミューオントリガーシステムの動作検 証", 神戸大学修士学位論文, February 12 2011.
- [17] 岸本巴, "ATLAS 実験におけるミューオントリガー効率の評価",神戸大学修士 学位論文, 神戸大学修士学位論文, February 24 2012.
- [18] 谷和俊, "アトラス実験 Phase0 アップグレードに向けたレベル 1 ミューオントリ ガーの改良",神戸大学修士学位論文, February 22 2013.
- [19] 稲丸由夫輝, "ATLAS 実験 Run2 に向けたレベル1ミューオントリガーの改良", 神戸大学修士学位論文, February 7 2014.