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草	<b>序</b> 論
第2章	ATLAS 実験
2.1	LHC 加速器
2.2	ATLAS 実験の目指す物理
	2.2.1 標準模型における Higgs 粒子
	2.2.2 Higgs 粒子の崩壊
	2.2.3 Higgs 粒子の探索結果
2.3	ATLAS 検出器
	2.3.1 検出器における座標系
	2.3.2 超伝導磁石
	2.3.3 内部飛跡検出器
	2.3.4 カロリメータ
	2.3.5 ミューオンスペクトロメータ
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
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)
	3.2.2 TGC トリガーシステム
	3.2.3 TGC システムの読み出し構造
	3.2.4 TGC エレクトロニクス
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
	3.3.2 Tile Calorimeter—SL 間の信号伝達処理
	3.3.3 Tile Calorimeter—SL 間のコインシデンスロジック
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
	4.1.1 トリガー効率
	4.1.2 トリガーレート
	4.1.3 フェイクトリガー
4.2	Run2 へ向けての改良
	4.2.1 概要
	4.2.2 レベル1ミューオントリガーの変更
4.3	Inner Coincidence
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
5.2	Inner Coincidence の実装

	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
参考文献	肰		62

# 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 $10^{34}$  [cm $^{-2}$ sec $^{-1}$ ] 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 10 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、10 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、 $H \to ZZ^* \to 4\ell$  や  $H \to WW^* \to \ell v \ell v$  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。

Rum1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  $10^{34}$  [cm $^{-2}$ sec $^{-1}$ ] 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。

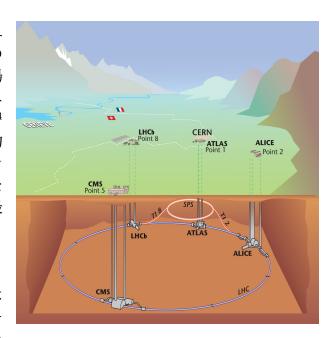


図 2.1: LHC の概観図 [2]

表 2.1: LHC の主要なパラメータ

主リング周長	26.7 [km]
重心系エネルギー (陽子・陽子)	8 [TeV]
瞬間最高ルミノシティ	$0.7 \times 10^{34}  [\mathrm{cm}^{-2} \mathrm{sec}^{-1}]$
バンチ数	1380 [個]
バンチ間隔	25 [ns]
1バンチ当たりの陽子数	1.4×10 <sup>11</sup> [個]
衝突点のビーム半径	$23 \ [\mu m]$

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<sup>-1</sup>]、21.7 [fb<sup>-1</sup>] に相当するデータ取得に成功した。

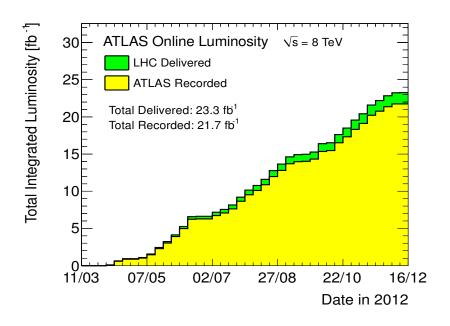


図 2.2: 積分ルミノシティの推移 [3]

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。

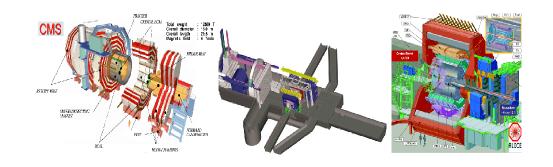


図 2.3: (左)CMS 検出器 [4] (中央)LHCb 検出器 [5] (右)ALICE 検出器 [6]

## 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、 $W^{\pm}$ 、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。

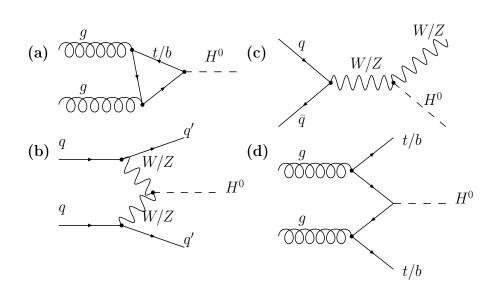


図 2.4: Higgs 粒子の生成過程

● 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。

- $qq \rightarrow qqH$  (vector boson fusion(b)) 0 オ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。
- $q\overline{q} \rightarrow (W/Z)H$  (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。
- $gg \rightarrow t\bar{t}H$  (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。

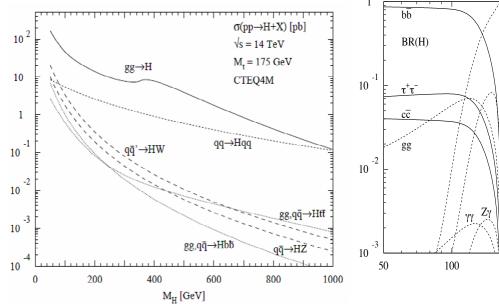


図 2.5: Higgs 粒子の生成断面積 [7]

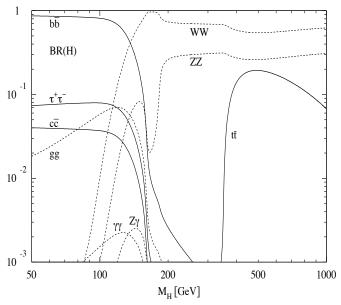


図 2.6: Higgs 粒子の崩壊分岐比 [7]

## 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。

•  $H \to \gamma \gamma$ 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  $b\bar{b}$  や  $c\bar{c}$  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。 $H \to \gamma \gamma$  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。

#### $\bullet$ $H \rightarrow \tau \tau$

Higgs 粒子が 2つの  $\tau$  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。  $\tau$  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。

#### • $H \to WW^* \to \ell \nu \ell \nu$

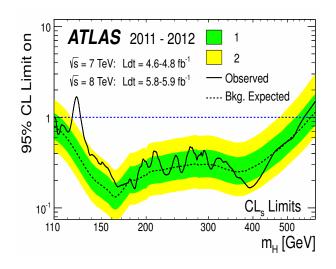
Higgs 粒子が 2 つの W に崩壊し、それぞれが  $\ell\nu(\ell:\mu,e)$  に崩壊する過程である。崩壊分岐比は高いが、この過程は終状態に 2 つのニュートリノを含むため Higgs 粒子の質量を再構成することは困難であり、 $2\gamma$  事象や  $4\ell$  事象のように鋭い Higgs 粒子の質量ピークが観測できない。そのため、2 つのレプトンの横方向運動量  $p_T$  と 2 つのニュートリノに由来する  $E_T^{miss}$  から横方向質量を算出し探索を行う。

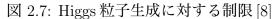
#### • $H \to ZZ^* \to \ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$

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  $4\ell$  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  $4\ell$  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。





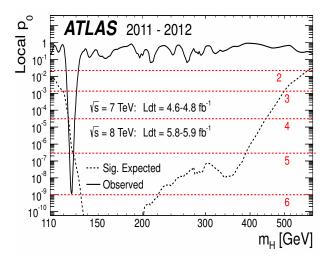


図 2.8: 背景事象が信号に見える確率 [8]

図 2.7 は  $110\sim600$  [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  $\pm 1\sigma$ 、 $\pm 2\sigma$  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、 $123\sim130$  [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  $6\sigma$ ) 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  $5\sigma$  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。

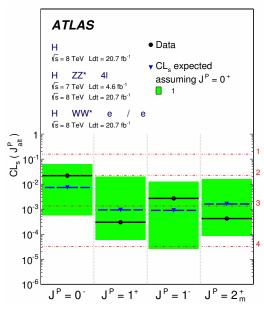


図 2.9: 各 J<sup>p</sup> 仮説である確率 [9]

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]。 $H\to\gamma\gamma$ 、 $H\to WW^*\to l\nu l\nu$ 、 $H\to ZZ^*\to l^+l^-l^+l^-$  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、 $J^P=0^-$ 、 $1^\pm$ 、 $2^+$  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 ( $\mathrm{CL}_{\mathrm{s}}(J^P_{\mathrm{alt}})$ ) 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  $\pm 1\sigma$  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  $3\sigma$  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。

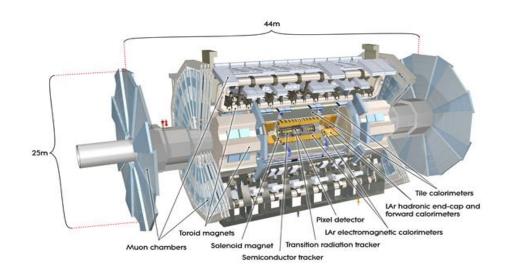


図 2.10: ATLAS 検出器の全体像 [2]

## 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、 $\theta$ 、 $\phi$  を定義する  $(0 \le \theta < \pi$ 、 $0 \le \phi < 2\pi)$ 。さらに擬ラピディティ $\eta$  を

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

で定義する。 $\eta$  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  $\eta$  分布  $(\Delta N/\Delta \eta)$  がほぼ一定になるためである。円筒形の ATLAS 検出器はこの  $\eta$  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。

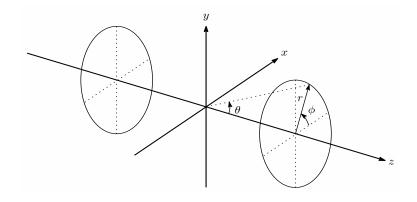


図 2.11: ATLAS 検出器の座標系

#### 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。

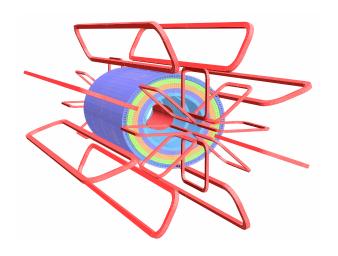




図 2.12: 超伝導磁石全体の構造 [10] 図 2.13: 超伝導ソレノイド磁石 [2]

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。



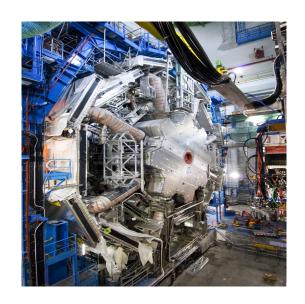


図 2.14: 超伝導トロイド磁石 (バレル)[2]

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  $(r-\phi$  方向:10  $[\mu m]$ 、z 方向:115  $[\mu m]$ )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 [ $\mu$ 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- $\phi$  方向で、16 [ $\mu$ m]、z 方向で 580 [ $\mu$ m] である。

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

直径 4 [mm]、位置分解能  $130 \text{ [}\mu\text{m]}$  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、 $\mathbf{r}$ - $\phi$  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。

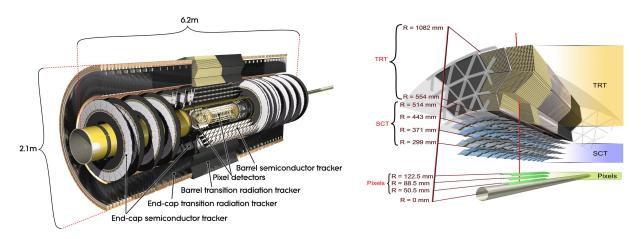


図 2.16: 内部飛跡検出器の全体像 [2]

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  $|\eta|$  < 4.9 の領域をカバーし、 $\eta$  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。

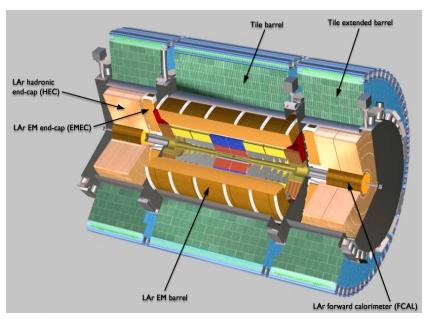


図 2.18: カロリメータの全体図 [2]

#### 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 $\phi$ 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、

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

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。

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

#### 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 [µsec] 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。

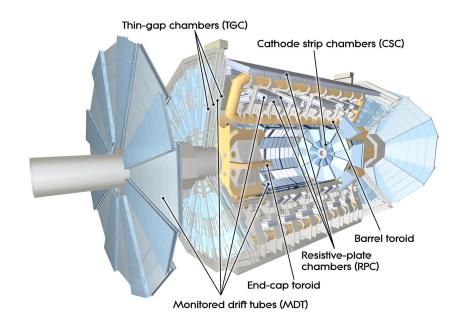


図 2.19: ミューオンスペクトロメータ全体図 [2]

#### 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  $[\mu m]$ ) 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  $[\mu m]$  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 [ $\mu$ 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  $\phi$  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。 $\phi$  方向の位置分解能は  $5\sim10$  [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。

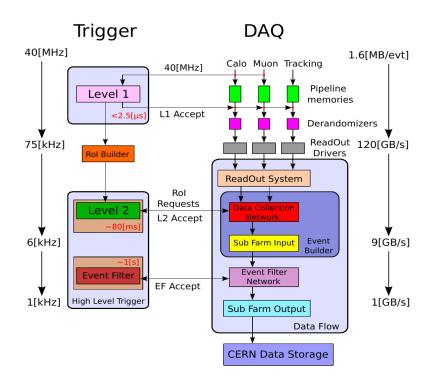


図 3.1: トリガーシステムの概要

#### レベル1トリガー

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。

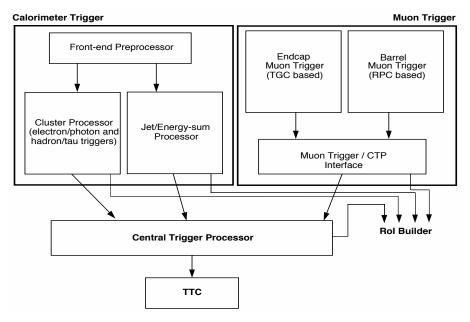


図 3.2: レベル1トリガーシステム

#### 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  $\phi$  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  $1\sim2[\mathrm{m}]$  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)。

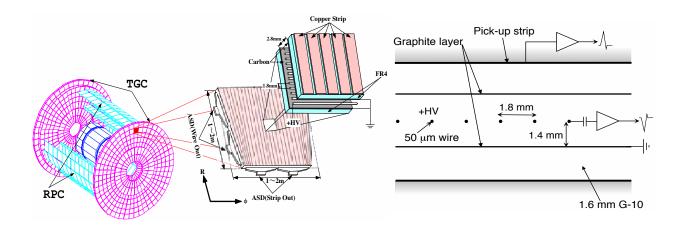


図 3.3: TGC の配置と構造

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 [ $\mu$ m] の金メッキを施したタングステンワイヤーが 1.8 [ $\mu$ m] 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 [ $\mu$ m] または 1.8 [ $\mu$ m] 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- $\phi$  平面の 2 次元読み出しを行う (図 3.3)。ワイヤーには約 30 [ $\epsilon$ m] 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  $6\sim20$  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  $\phi$  方向の位置情報を読み出す。また TGC 内部は  $CO_2$ /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。

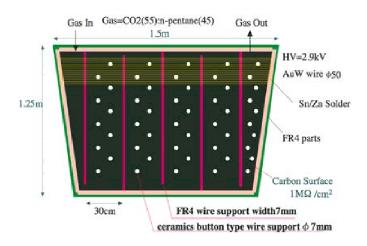


図 3.5: ワイヤーサポート

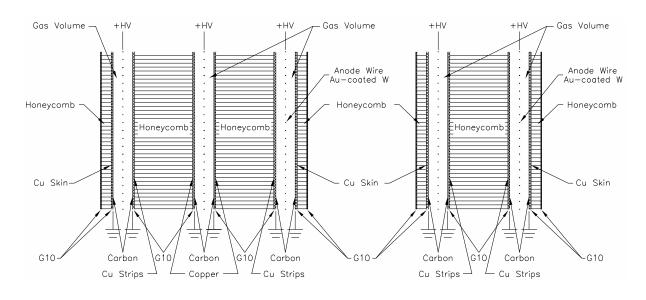


図 3.6: doublet(右) と triplet(左) の構造 [10]

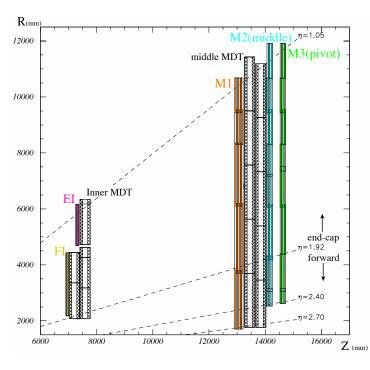
TGCのワイヤーは 2.9 [kV] 程度の高電圧が印加されている。そのため、TGC に入射した荷電粒子はその飛跡に沿ってガス中の分子と多数衝突し電離され、電子・陽イオン対を作る。電離された電子 (一次電子) はアノードに移動しながら電場によって加速され、運動エネルギーを持つ。電子のエネルギーがガス中の分子の電離エネルギーを超えるとガス分子がイオン化され、二次電子が生成される。二次電子も同様に電場によって加速され、次々と衝突・電離を繰り返して電子雪崩を起こし、信号として読み出される。一方、電離によって生じた陽イオンはカーボン面に向かって移動する。カーボン面は高抵抗であるため瞬間的には電流は流れず、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。



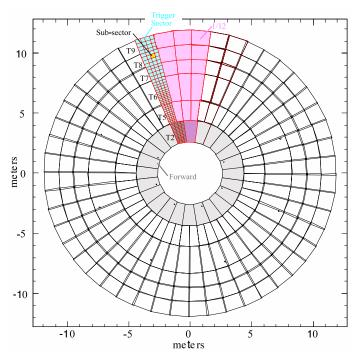


図 3.7: r-z 断面での TGC の配置

図 3.8: TGC の r- $\phi$  断面図

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 $\phi$ 方向に 4 分割した領域を、 $1.9 < |\eta|$  のフォワード領域では $\phi$ 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 $\eta$  方向に 37 分割、 $\phi$  方向に 4 分割され、フォワードでは $\eta$  方向に 16 分割、 $\phi$  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、 $\phi$  方向で約 10 万に及ぶ。

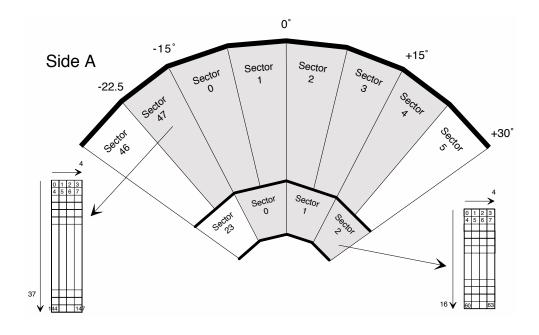


図 3.9: SubSector のナンバリング

#### 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)。

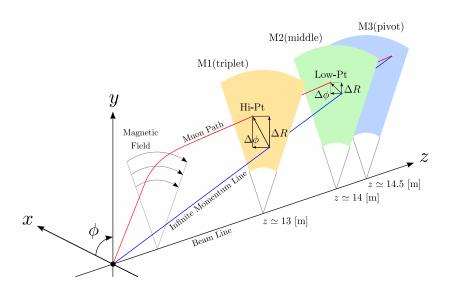


図 3.10: p<sub>T</sub> 測定の原理

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、 $\phi$  それぞれの方向について測定し、その差を  $\Delta$ R、 $\Delta\phi$  とする。この  $\Delta$ R、 $\Delta\phi$  を用いて  $p_T$  を概算する。

M1 及び M2 ではそれぞれ  $\Delta R$ 、 $\Delta \phi$  の絶対値に上限が設定されている。この上限の  $\Delta R$ 、 $\Delta \phi$  で形成される領域をウィンドウと呼び、 $M1 \cdot M2$  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、 $\phi$  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、 $\phi$  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 ( $\Delta R$ 、 $\Delta \phi$ ) 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  $\Delta R$ 、 $\Delta \phi$  情報を用いることでトリガーが発行される。

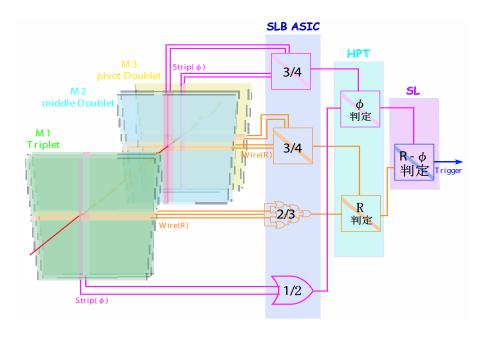


図 3.11: TGC トリガーの判定方法

#### 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。

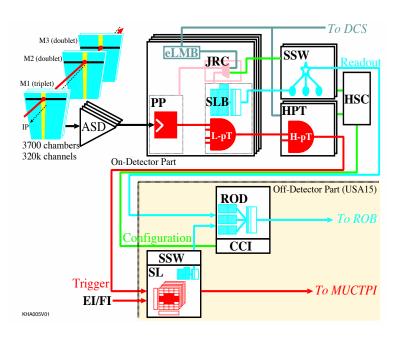


図 3.12: TGC エレクトロニクスの概要

TGCシステムのデータの流れは、

- ▶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。

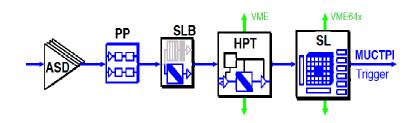


図 3.13: レベル1におけるトリガー系の流れ

#### 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 [ $\mu sec$ ] 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)。

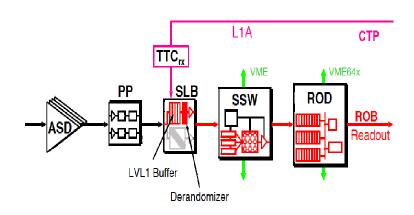


図 3.14: レベル1 におけるリードアウト系の流れ

#### 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)。

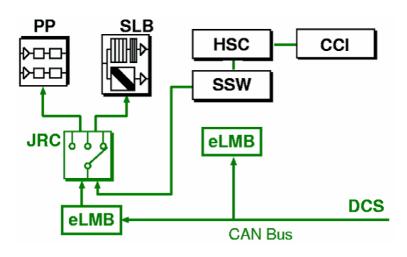


図 3.15: レベル1におけるコントロール系の流れ

#### 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  $\Delta R$ 、 $\Delta \phi$  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  $R-\phi$  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  $\phi$  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  $\Delta R$ 、 $\Delta \phi$  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	pt1~6	condition
L1_MU0	pt1	$p_{\mathrm{T}}$ 6 GeV 未満
$L1\_MU6$	pt2	$p_{\mathrm{T}}$ 6 GeV 以上
$L1\_MU10$	pt3	現在使用されていない
$L1\_MU11$	pt4	$p_{ m T}$ 11 GeV 以上
$L1\_MU15$	pt5	$p_{ m T}$ 15 GeV 以上
$L1_MU20$	pt6	$p_{ m T}$ 20 GeV 以上

図 3.16: L1 トリガーメニューと  $p_T$  の関係

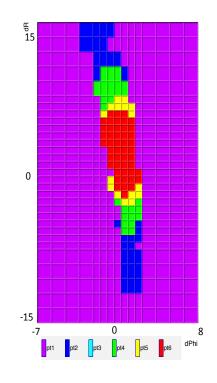


図 3.17: CW の一例

#### 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 ( $\Delta\phi\sim0.1$ ) 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。

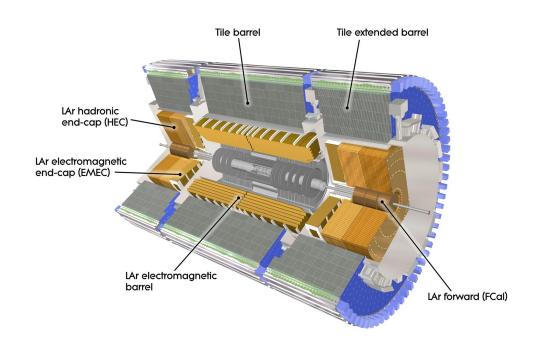


図 3.18: カロリメータの全体図 [2]

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)。

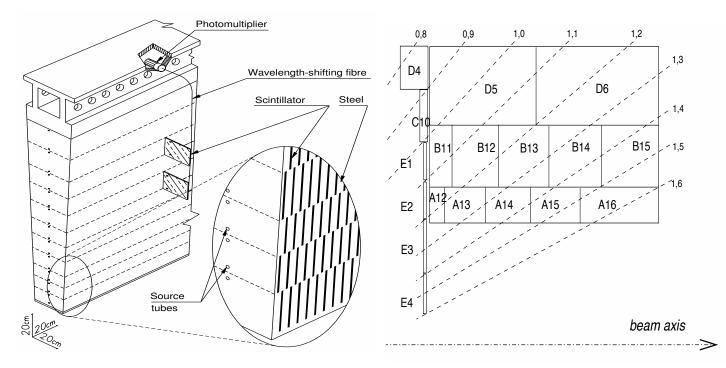


図 3.19: カロリメータからの信号の読み出し [10]

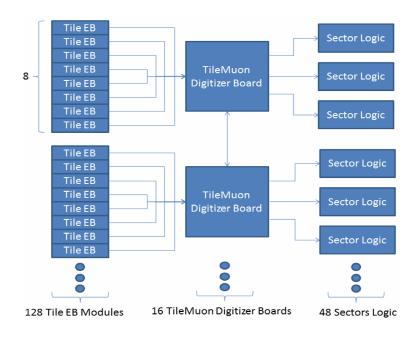
図 3.20: Tile Calorimeter の r-z 断面図 [10]

#### 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、 $1.05 < |\eta| < 1.3$  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  $\eta$  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				
Н		L		H L		H L		-	Н		L				
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、1 Module 1 の場合、1 の場合、1 の場合、1 で再構成されたエネルギーの和が 1 の場合、1 であればるの場合、1 であればるのように表する。

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。

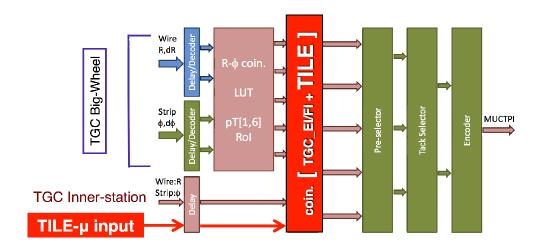


図 3.23: Tile Calorimeter と SL のコインシデンスのブロックダイアグラム

# 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 $\varepsilon$ を以下の式で定義する。

トリガー効率 $\varepsilon$ 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、 $J/\psi$  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、 $Z \to \mu^+\mu^-$  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。

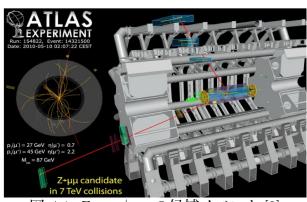


図 4.1:  $Z \rightarrow \mu^{+}\mu^{-}$  の候補イベント [2]

#### 1. Z boson mass(m<sub>Z</sub>) 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/ $c^2$ ]  $\leq M_{\mu\mu} \leq m_Z+10$  [GeV/ $c^2$ ] ( $m_Z=91.1876$  [GeV/ $c^2$ ] 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。

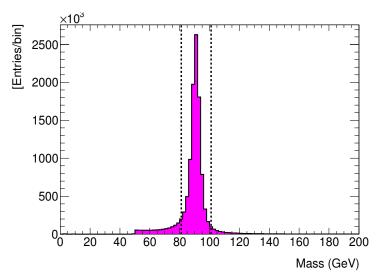


図 4.2: Мии の分布

#### 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  $\eta_{\mu}$ 、 $\phi_{\mu}$  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  $\eta_{EF}$ 、 $\phi_{EF}$  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  $\Delta R$  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 $\Delta R$ 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。

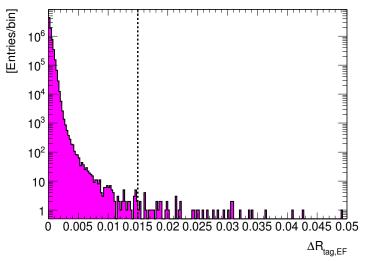


図 4.3: Tag muon の選択における  $\Delta R$  の分布

#### 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  $(1.05 \le |\eta| \le 2.42)$  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  $\eta_{RoI}$ 、 $\phi_{RoI}$  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  $\Delta R$  を計算する (このときの  $\Delta R$  の分布を図 4.4 に示す)。ここで  $\Delta R \le 0.2$  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。

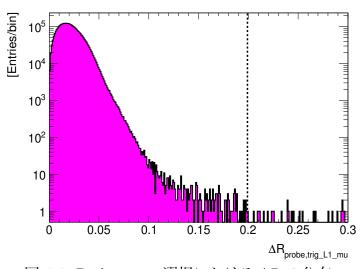


図 4.4: Probe muon 選択における △R の分布

 $1\sim3$  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  $PT6(p_T \geq 20 \ [GeV/c]$  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。

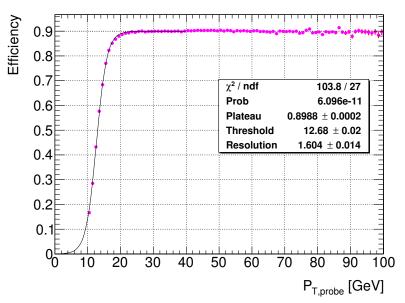
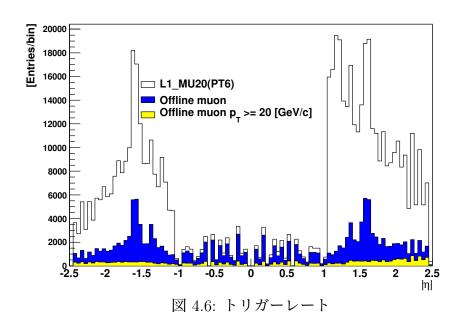


図 4.5: トリガー効率

#### 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  $p_T \geq 20$  [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。

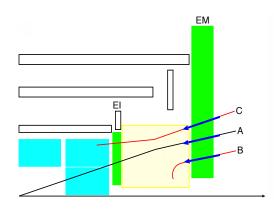


### 4.1.3 フェイクトリガー

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  $p_T$  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。



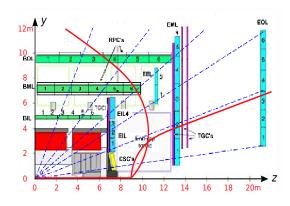
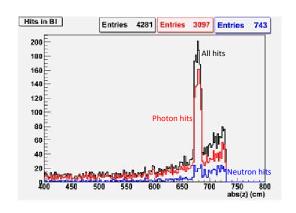


図 4.7: 衝突点由来の粒子と 2次生成粒子 [11] 図 4.8: 磁場領域付近で生成された荷電粒子

#### 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  $z \sim 700$  [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。



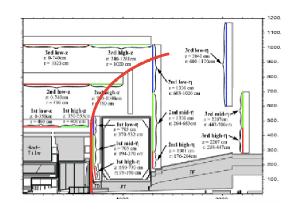


図 4.9: BI の Hit グラフ

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 ( $\phi$  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 $\phi$  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。

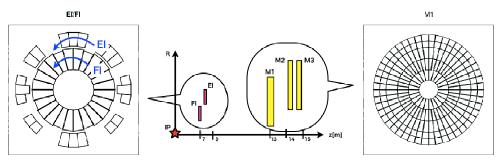


図 4.11: TGC の配置と形状 [19]

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 と比べカバーする領域  $(\eta-\phi$  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 $\phi$ 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 $\eta$ 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 Tile Calorimeter とのコインシデンスの領域とする。

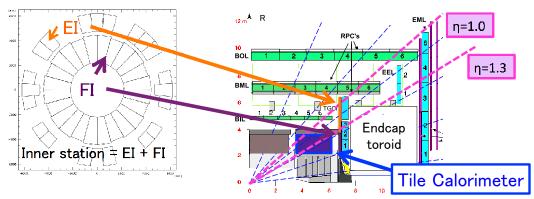


図 4.12: InnerStation、Tile Calorimeter の配置

## 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  $Z \to \mu^+\mu^-$ 、 $Z \to e^+e^-$ 、 $H \to \gamma\gamma$  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。

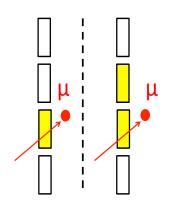


図 5.1: クロストークの模式図

#### 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、 $\chi^2$  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。

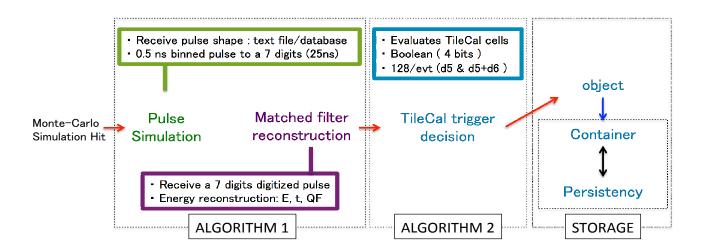


図 5.2: Tile Calorimeter に関する実装

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。

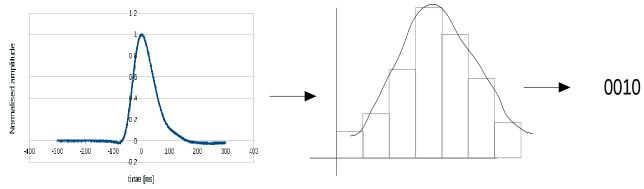


図 5.3: シミュレーション中でのデータ形式の流れ (各段階毎のデータ形式の概念図であり、同一の波形の情報を表しているわけではない)

#### 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 RoI 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 RoI 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。

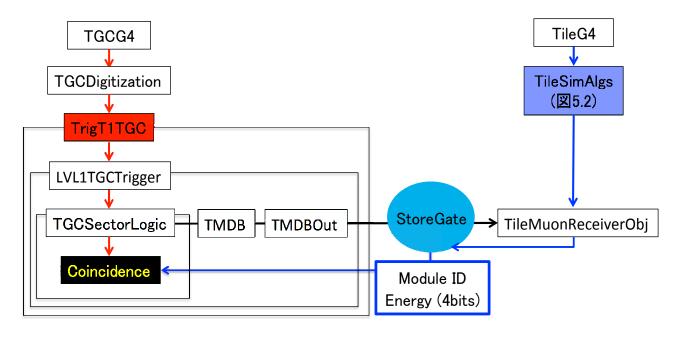


図 5.4: TGC に関する実装

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  $p_T \geq 20$  [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。

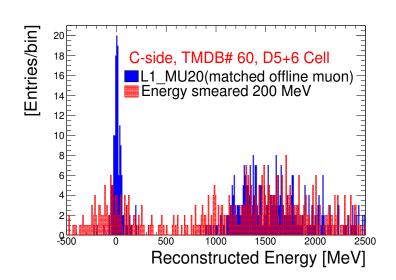


図 6.1: D5+6 Cell (C-side, TMDB#60) で再構成されたエネルギー分布

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 $\eta$ の関係

 $\eta$  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。

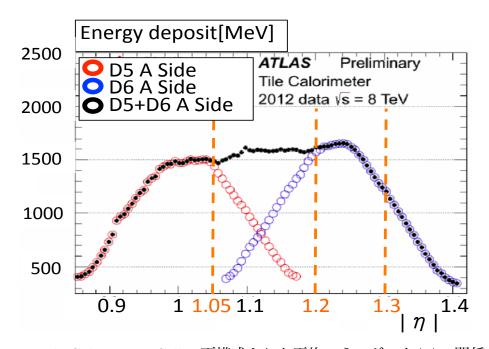


図 6.2: Tile Calorimeter Cell で再構成された平均エネルギーと | $\eta$ | の関係 [14]

図 6.3 は、Tile Calorimeter Cell (D5, D6 Cell) で再構成されたエネルギーの  $|\eta|$  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)

 $= \frac{\text{D5 Cell } \circ \text{ FF構成} されたエネルギー - \text{D6 Cell } \circ \text{ FF構成} されたエネルギー}{\text{D5 Cell } \circ \text{ FF構成} されたエネルギー + \text{D6 Cell } \circ \text{ FF構成} されたエネルギー}$ 

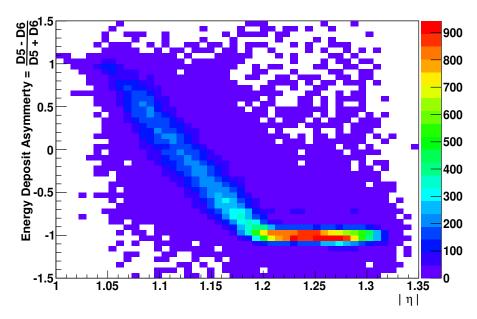


図 6.3: D5、D6 Cell で再構成されたエネルギーの |η| 依存性

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。

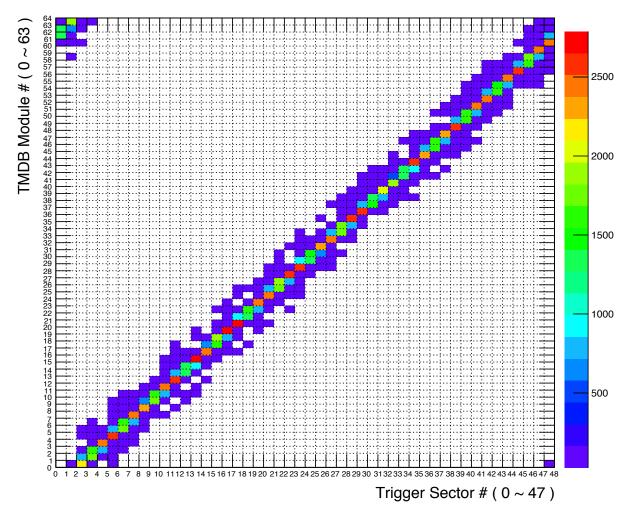


図 6.4: TMDB Module と Trigger Sector の位置関係

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。

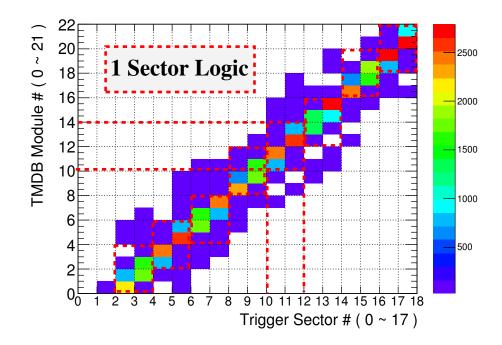
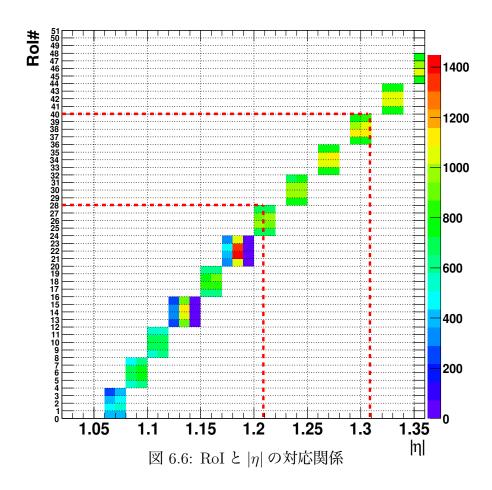


図 6.5: Sector Logic への入力を意識した図 6.4 の拡大図。デフォルトでは、1 つの Trigger Sector に対して対角線上に色のついた 2 つの TMDB Module にコインシデンスを要求するが、(赤点線枠内の) 隣接した Module にも要求できるように設定されてある。1 Sector Logic においてコインシデンスを要求できる隣接した Module が図のような配置になっているのは、TMDB Module や Trigger Sector からの双方の入力に対して、Sector Logic が処理できる範囲に制限がかかるためである。

## 6.1.4 $\eta$ と RoI の対応関係

図 6.6 に  $\eta$  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  $\phi$  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。

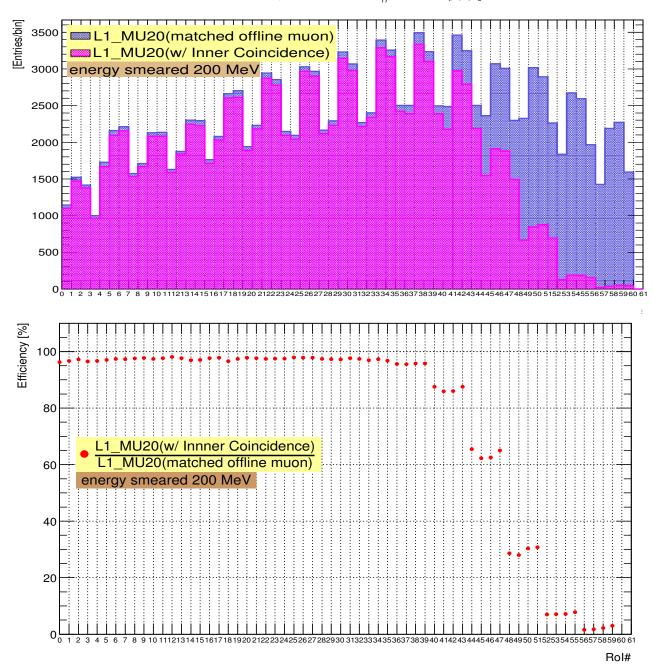


図 6.7: RoI 毎のトリガー効率

## 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。

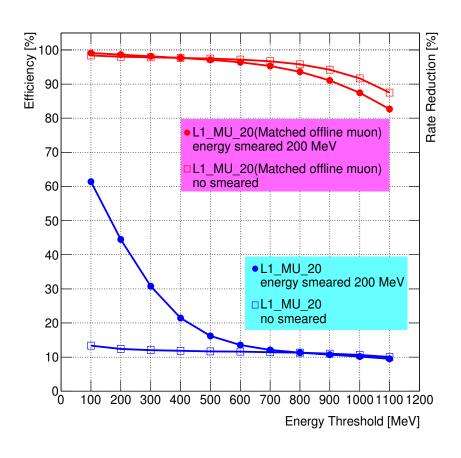


図 6.8: Efficience(赤) とレート削減率 (青) のエネルギー閾値依存性

表 6.1: トリガー効率及びトリガーレート削減率

	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

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  $(\eta,\phi)$  方向と TGC の Hit 位置における  $(\eta,\phi)$  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。

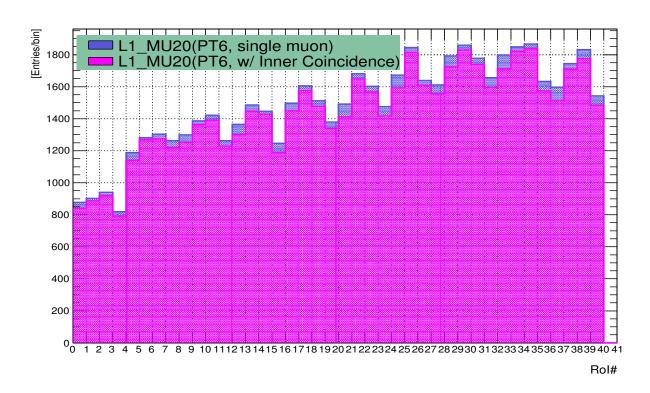


図 6.9: シミュレーションによる RoI 毎のトリガー効率のヒストグラム

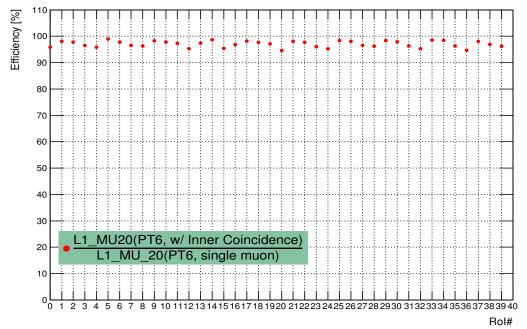


図 6.10: シミュレーションによる RoI 毎のトリガー効率のグラフ

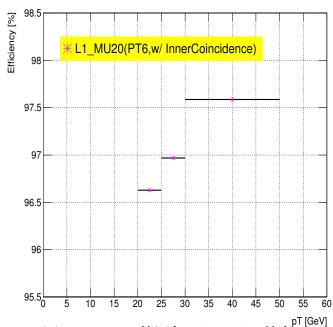


図  $6.11: p_T$  の範囲毎のトリガー効率  $p^{\mathsf{T}\,[\mathsf{GeV}]}$ 

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

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いる。
- 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 %
  - $\longrightarrow$  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:

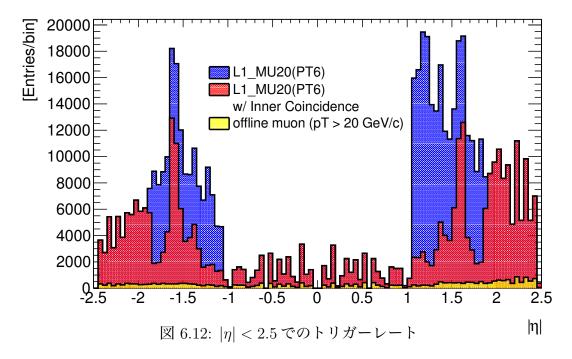
1.94 %

→ 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。

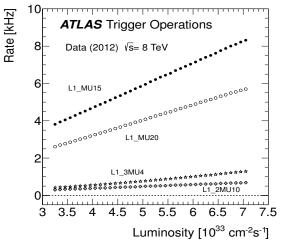
(したがって、Cell 中でのエネルギー損失量がエネルギー閾値を超えない)

#### 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  $\eta$ )。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  $p_T\geq 20$  [GeV/c] と判定されたミューオンのイベントである。



 $|\eta|<2.5$  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 $7\times 10^{33}~[{\rm cm}^{-2}{\rm sec}^{-1}]$  では、 ${\rm L1\_MU20}$  のトリガーレートは約 $5.7~[{\rm kHz}]$  程度であることが分かる。



 $\boxtimes$  6.13: L1 muon trigger rate[13]

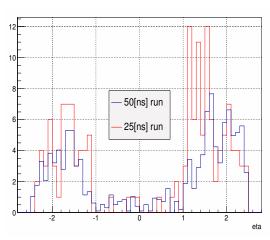


図 6.14: 50 [ns] と 25 [ns] の比較 [19]

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×  $10^{34}$  [cm $^{-2}$ s $^{-1}$ ] / 0.7 ×  $10^{34}$  [cm $^{-2}$ s $^{-1}$ ]) $\simeq$  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  $\simeq$  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 $\phi$ 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 $\eta$  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.
- [12] 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  $\eta$  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, 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.