修士論文

LHC-ATLAS実験ミュー粒子検出器の 精密アライメントによるトリガー効率の改善

> 名古屋大学大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 高エネルギー物理学研究室

山内克弥

学籍番号 261101617

2013年1月

修士論文概要

LHC-ATLAS 実験では素粒子標準理論を超えた物理の探索を行っている。本実 験では、強い相互作用由来の背景事象 (約 60 mb)の中から新物理 (10 pb 以下)由 来のミュー粒子を運動量閾値を低く保ちつつ、効率よく選別する必要がある。 エ ンドキャップ部ミュー粒子トリガー検出器 Thin Gap Chamber(TGC) は高速判断 に特化したトリガーシステムである。TGC チェンバーは陽極ワイヤー、陰極スト リップの2次元読み出し (位置分解能数 mm)を行う全1578 枚のガス検出器である。 衝突点由来のミュー粒子は磁場で曲げられ、ビーム軸方向に衝突点から約13 m に 設置した 3 層の TGC(BW) で検出される。トリガー回路に書き込んだ BW 3 層の 検出パターンに基づき、ミュー粒子飛跡の曲率を回路上で算出しトリガーを発行 する。検出パターンの理解は運動量分解能の精度上昇に繋がるので TGC の設置位 置に着目し研究した。

2012年にBWの設置位置を反映したトリガー回路が作成されたので、トリガー の性能を評価する必要がある。そのためにZ粒子由来のミュー粒子の一方がトリ ガーを発行したことを要求し、トリガーに対するバイアスがない他方のミュー粒 子を用いてトリガーの分解能を測定した。その結果、TGCの設置位置を反映した トリガー回路で運動量分解能が改善していることを証明した。

将来、衝突点から6mに設置しているTGC(SW)とBWを用いたトリガー回路 の強化が必要である。今回SWの設置位置測定を陽子衝突由来のミュー粒子を用 いて初めて行った。位置検出に特化したミュー粒子検出器(分解能約80µm)から ミュー粒子飛跡をTGCに外挿した点と、TGCが検出した点の差から設置位置を測 定する手法を確立した。測定の結果、動径方向に5mm、ビーム軸方向に15mm、 傾きに20mradの設計位置との差の存在を明らかにした。今後、このずれを考慮 した上でSWをトリガーシステムに組み込む。

本論文はエンドキャップ部ミュー粒子検出器 TGC のアライメントによって、運動量分解能が向上することを既存のトリガー回路によって示し、さらに、将来の ミュー粒子トリガーの性能向上の可能性を示したものである。

目 次

LHC-ATLAS 実験	4
LHC-ATLAS 実験の目指す物理	4
1.1.1 素粒子標準理論	4
1.1.2 標準理論を超えた物理	5
LHC 加速器	6
ATLAS 検出器	6
1.3.1 マグネットシステム	9
1.3.2 内部飛跡検出器	9
1.3.3 ミュー粒子検出器	10
1.3.4 トリガーシステム	13
Thin Gap Chamber	16
TGC の構造	16
TGC の動作原理	18
TGC の配置	18
TGC トリガーシステム	21
2.4.1 TGC トリガーの概念	21
2.4.2 TGCトリガーのエレクトロニクス	21
TGC の位置測定	25
トリガーに対する TGC の設置位置の影響	25
TGCの光学設置位置測定	26
3.2.1 TGC の光学位置測定装置	26
3.2.2 TGC の光学測定結果	29
ビームデータを用いた設置位置測定手法	31
ビームデータを用いた TGC 設置位置結果	34
TGC 設置位置結果の比較	34
アライメントを考慮したトリガーシステムの評価	61
	61
アフイメントを考慮したトリガーシステム	() [
アフイメントを考慮したトリガーシステム	61
	LHC-ATLAS 実験の目指す物理 1.1.1 素粒子標準理論 1.1.2 標準理論を超えた物理 1.1.2 標準理論を超えた物理 LHC 加速器 ATLAS 検出器 1.3.1 マグネットシステム 1.3.2 内部飛跡検出器 1.3.3 ミュー粒子検出器 1.3.4 トリガーシステム 1.3.4 トリガーシステム TGC の構造 TGC の配置 TGC の配置 TGC の配置 2.4.1 TGC トリガーの概念 2.4.2 TGC トリガーのエレクトロニクス TGC の光学設置位置測定 3.2.1 TGC の光学位置測定装置 3.2.2 TGC の光学位置測定 3.2.1 TGC の光学位置測定 3.2.2 TGC の光学和認定結果 ビームデータを用いた設置位置測定手法 ビームデータを用いた設置位置測定手法 ビームデータを用いた TGC 設置位置結果 アライメントを考慮したトリガーシステムの評価

第5章	TGC トリガーシステム改良に向けた SW-TGC 設置位置測定	67
5.1	TGC トリガーシステムの改良	67
5.2	SW-TGC の設置位置測定手法	67
5.3	SW-TGC の測定結果	74
第6章	結論	81
参考文献	犬	82

第1章 LHC-ATLAS実験

1.1 LHC-ATLAS 実験の目指す物理

1.1.1 素粒子標準理論

素粒子標準理論は物質を構成する基礎粒子とその相互作用を記述する理論であ る。素粒子標準理論では物質を構成する粒子であるクォーク・レプトンと、力の媒 介となるゲージ粒子と、ヒッグス粒子を最小単位として考えている(表1.1)。クォー クとレプトンはそれぞれ6種類存在し、それぞれスピン 1/2 を持っている。クォー クは電荷 2/3を持つアップ粒子 (u)・チャーム粒子 (c)・トップ粒子 (t) と、電荷 -1/3 を持つダウン粒子 (d)・ストレンジ粒子 (s)・ボトム粒子 (b) から構成されている。 レプトンは電荷 -1 を持つ電子 (e)・ミュー粒子 (μ)・タウ粒子 (τ) と、電荷を持た ない3種類のニュートリノ (ν_e , ν_μ , ν_τ)から構成されている。これらクォークとレ プトンはそれぞれ三世代に分類され、世代が変わる毎に質量が大きく変わる。こ れらの粒子間には、力の媒介となるゲージ粒子を交換することで相互作用が働く。 ゲージ粒子には電磁相互作用を媒介する光子 (γ)、強い相互作用を媒介するグルー オン (g)、弱い相互作用を媒介する W^{\pm} 、Zの4種が存在している。ヒッグス粒子 (H) は素粒子の質量の起源となる粒子である。2012年にATLAS 実験とCMS 実験 はヒッグス粒子らしき約 126 GeV の粒子を発見した。

	第一世代	第二世代	第三世代	スピン	電荷
クォーク	u	С	t	1/2	+2/3
	d	s	b	1/2	-1/3
レプトン	e	μ	τ	1/2	-1
	$ u_e $	$ u_{\mu}$	$ u_{ au}$	1/2	0
ゲージ粒子	γ			1	0
	W^{\pm}, Z			1	$\pm 1, 0$
	g			1	0
スカラー粒子	Н			0	0

表 1.1: 素粒子一覧

1.1.2 標準理論を超えた物理

素粒子標準理論は様々な実験で検証されているが、今のところ実験結果と無矛 盾な理論である。しかし、標準理論はいくつか問題を含んでいる。その一つが階 層性問題である。観測されるヒッグス粒子の質量 M_Hは、実際の質量 M_{H0}が量子 補正を受けたものであり、

$$M_{\rm H}^2 = M_{\rm H_0}^2 + \delta M_{\rm H}^2 \tag{1.1}$$

$$\delta M_{\rm H}^2 = -\frac{g^2}{(4\pi)^2} \Lambda^2 + 高次の項$$
 (1.2)

と表され、ヒッグス粒子の質量は二乗発散している。ここで、 Λ は標準理論が破綻 するエネルギースケールを表している。標準理論がプランクスケール (~10¹⁹ GeV) まで有効であるとすると、 $\delta M_{\rm H}^2$ は 10³⁶ GeV² 程度であり、ヒッグス粒子が観測さ れるエネルギースケールに比べて約 10⁶ 倍大きい。この不自然な量子補正を解決 する新物理候補として超対称性理論がある。超対称性理論は既存の粒子からスピ ンが 1/2 ずれた超対称性粒子が存在することを予言している (表 1.2)。既存の素 粒子と超対称性粒子の量子補正が打ち消し合い、ヒッグスの質量は

$$M_{\rm H}^2 = M_{\rm H_0}^2 - \frac{g^2}{(4\pi)^2} \Lambda^2 + \frac{g^2}{(4\pi)^2} \Lambda^2 + 高次の項$$
(1.3)

となり質量の二次発散を解消することができる。このような新物理を幅広く探索 するためには広いエネルギー領域に感度を持つ検出器が必要になる。超対称性粒 子は大きなエネルギー欠損 (MET)、レプトンやジェット事象を等を終状態に持つ。 この中でも透過力が高く衝突点から検出器の外まで通り抜ける信号を残すミュー 粒子に着目した。

	第一世代	第二世代	第三世代	スピン	電荷
スクォーク	\tilde{u}	\tilde{c}	${ ilde t}$	0	+2/3
	\tilde{d}	\widetilde{s}	${ ilde b}$	0	-1/3
スレプトン	\tilde{e}	$\tilde{\mu}$	$ ilde{ au}$	0	-1
	$\tilde{ u_e}$	$ ilde{ u_{\mu}}$	$\tilde{ u_{ au}}$	0	0
ゲージーノ粒子	$\tilde{B^0}$			1/2	0
	$ ilde{\mathrm{W}}^{\pm}, ilde{\mathrm{W}}^{0}$			1/2	$\pm 1, 0$
	ĝ			1/2	0
ヒグシーノ粒子	$ ilde{\mathrm{H}_1}, ilde{\mathrm{H}}_2, ilde{\mathrm{H}}^\pm$			1/2	$0, 0, \pm 1$

表 1.2: 超対称性粒子一覧

1.2 LHC加速器

LHC(Large Hadron Collider) は欧州原子核研究機構 (CERN)の地下 100 mに 建設された周長 27 kmの陽子・陽子衝突型円型加速器である。LHC は重心系エネ ルギー 8 TeV、瞬間ルミノシティー 7.73 × 10^{33} cm⁻² sec⁻¹の性能を持った加速器で あり、現在 TeV スケールの物理探索が可能な唯一の加速器である。LHC 加速器リ ング中では 10^{11} 個の陽子の集合 (バンチ)が 1374 個周回し、20 MHz の頻度でビー ム交差する。瞬間ルミノシティーは次のように表すことができる。

$$L = \frac{f N_b^2}{4\pi\sigma^2} \tag{1.4}$$

f はビーム交差頻度、 N_b はバンチ中の陽子数、 σ はビームサイズを表す。陽子数 を増やす、またはビームサイズを小さくする、衝突頻度を上げることで瞬間ルミノ シティーを上げることができる。2011年には積分ルミノシティー5.61 fb⁻¹のデー タを蓄積し、2012年には積分ルミノシティー23.3fb⁻¹のデータを蓄積した。表1.3 にLHCの設計性能を記した。 2015年からはビームエネルギーを上昇させ、設計 性能のバンチ数 2808 個で周回させることを目指している。これにより、さらに高 いエネルギー領域の新物理探索が可能となり、ビーム交差頻度 40 MHz を達成す ることによってルミノシティーが向上する。陽子の構成粒子であるクォークやグ ルーオンの衝突による複雑な反応の断面積はおよそ 60 mb である。これと瞬間ル ミノシティーの積で反応頻度が出され、約 500 MHz となる。この衝突事象の中か ら興味のある物理由来の事象を効率よく選別することが実験成功の鍵となる。こ のLHC 加速器上には衝突点が4 つ存在し、それぞれ、図 1.1 のように ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)実験、CMS (Compact Muon Solenoid)実験、LHCb実 験、ALICE (A Large Ion Collider)実験のための検出器を設置している。

1.3 ATLAS 検出器

ATLAS検出器は直径 25 m、長さ 44 m の円筒形をしており、衝突点周りを前後 対称に覆った汎用検出器である。図 1.2 で示すように加速器のビームパイプに近い 位置から動径方向に内部飛跡検出器、超伝導磁石、電磁カロリメータ、ハドロンカ ロリメータ、ミュー粒子検出器を設置している。ATLAS実験において直交座標系 は、衝突点を原点、LHC加速器リングの中心方向をx軸の正方向、地上方向をy軸 の正方向、ビーム軸をz軸で定義する。また、円筒座標系は、衝突点を原点、ビー ム軸をz軸、ビーム軸を中心とした動径をr、方位角を ϕ と定義する。また、仰角 θ を tan $\theta = r/z$ として定義する。ここで、擬ラピデティーは $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$ と して表すことができる。高運動量粒子の飛来頻度は η 平面で見たとき一様である。 ATLAS検出器は全方位角 (0 < ϕ < 2 π) を覆うように設計されている。円筒側面の



図 1.1: LHC 加速器の俯瞰図

ビームパラメーター				
陽子エネルギー	[GeV]	7000		
バンチ中の陽子数		1.15×10^{11}		
バンチ数		2808		
バンチの長さ	[cm]	7.55		
エミッタンス	$[\mu mrad]$	3.75		
ビームサイズ	$[\mu m]$	16.7		
瞬間最大ルミノシティー	$[\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{sec}^{-1}]$	$1.0{ imes}10^{34}$		
衝突情報				
非弹性散乱反応断面積	[mb]	60		
バンチ交差毎の事象数		19.02		

表 1.3: LHC の設計性能

部分 ($|\eta| < 1.05$) をバレル領域、円筒の蓋の部分 ($|\eta| > 1.05$) をエンドキャップ領域 と呼ぶ。また、二つのエンドキャップ領域をそれぞれ A-Side(z > 0)、C-Side(z < 0) と呼ぶ。ここでは TGC の設置位置測定・トリガー効率測定で使用した超伝導電磁 石、内部飛跡検出器、ミュー粒子検出器を説明する。



図 1.2: ATLAS 検出器全体像

1.3.1 マグネットシステム

ATLAS 検出器のマグネットシステムは 超伝導ソレノイド磁石、2種類の超伝導 トロイド磁石から構成されている。図1.3の内側に設置した円筒状のものがソレノ イド磁石 (2 T) である。ソレノイド磁場中で荷電粒子はr-φ平面上に対して曲げ られる。ソレノイド磁石の内側に内部飛跡検出器を設置している。ソレノイド磁 石の外側にカロリメータを設置しているので、物質量が可能な限り小さくなるよ うに設計されている。カロリメータの外側にバレルトロイド磁石とエンドキャップ トロイド磁石 (0.5~1 T)を設置している。トロイド磁場中で荷電粒子はr-z平面 上に対して曲げられる。トロイド磁場は、漏れ磁場の影響で不均一な8回対称の 磁場構造をしている。



図 1.3: ATLAS マグネットシステムの外観図。中心部の円筒状のものがソレノイ ド磁石。ソレノイド磁石は 1.23 m < r < 1.28 m, -2.9 m < z < 2.9 m に設置さ れ ている。それを囲うようにエンドキャップトロイド磁石、バレルトロイド磁石 が 8 回対称に設置されている。バレルトロイド磁石は 4.7 m < r < 10.1 m, -12.7 m < z < 12.7 m に設置されている。エンドキャップトロイド磁石は 0.8 m < r < 4.7 m, 7.6 m < |z| < 12.6 m に設置されている。

1.3.2 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は2Tのソレノイド磁場中に設置されており、荷電粒子の運動 量測定、崩壊点測定、電子の同定を行っている。衝突点に近い順にピクセル検出 器 (Pixel)、シリコン・ストリップ (SCT) 検出器、遷移輻射飛跡検出器 (TRT) 検 出器を配置している (図 1.4)。Pixel 検出器は r < 15 cm に設置されている検出器 で、バレル領域エンドキャップ領域共に 3 層存在する。ピクセルサイズは 50 μ m× 400 μ m で $r - \phi$ 方向に約 10 μ m、z方向に約 115 μ m の位置分解能を持つ 。SCT 検出器はバレル領域に 4 層、エンドキャップ領域に 9 層設置されており、 $r - \phi$ 方 向に 17 μ m、z方向に約 580 μ m の位置分解能を持つ 。TRT はバレル部に 73 層、 エンドキャップ部に 160 層並べられており、位置分解能は約 130 μ m である。TRT は遷移放射により電子とハドロンの区別も行っている。



図 1.4: 内部飛跡検出器の z – y 断面図

1.3.3 ミュー粒子検出器

図 1.5 に示すようにミュー粒子検出器は ATLAS 検出器の最も外側に配置さ れている。位置測定精度に優れた Monitor Drift Tube (MDT) と Cathode Strip Chamber (CSC)、トリガーの発行を担う Resistive Plate Chamber (RPC) と Thin Gap Chamber (TGC) から構成されている。CSC はエンドキャップトロイド磁石 の内側の 2.0 < $|\eta|$ < 2.7 に計4層設置されており、位置分解能は約 40 μ m である。 RPC はバレル領域 ($|\eta|$ < 1.05) に計3層設置されており、この領域のミュー粒子ト リガーの役割を担っている。TGC はエンドキャップ領域 (1.05< $|\eta|$ < 2.4) のトリ ガー発行を担っており、トロイド磁場の内と外で計4層設置されている。本TGC の設置位置測定では MDT が重要な役割を担っている。

MDT

MDT はバレル領域、エンドキャップ領域 (|η| < 2.7) に設置されており、MDT は トロイド磁石の内側、外側に計 3 層設置されている。直径 30 mm のアルミチュー



図 1.5: ミュー粒子検出器の *z* – *y* 断面図。図中の EIL, EEL, EML はエンドキャッ プ領域の MDT、 EOL, BIL, BML, BOL はバレル領域の MDT の設置位置を表し ている。

ブの中に直径 50 μm の金メッキタングステンレニウムワイヤーを張った構造のガ ス検出器である。ワイヤーに約 3 kV 印加し、3 bar の圧力のもとで Ar/CO₂ の混 合ガス (93:7)を用いて運用している。ミュー粒子が MDT を通過した際に電離 した電子のドリフト速度から粒子の位置を検出する仕組みで、各チューブ毎に位置 分解能約 80 μ m を実現している。チューブの直進性は 100 μ m 以内で、ワイヤー は 10 μ m の精度で中心に張られている。MDT はバレル領域、エンドキャップ領域 ともに 3 層設置されている。その 1 層毎は、アルミチューブを 6 段俵積みにした構 造になっている (図 1.6)。この 3 層の情報を合わせることで位置分解能約 30 μ m を 達成する。

位置分解能 30 µm 以下を実現するために、MDT は内部のチューブの歪み測定 と設置位置の精密測定を行っている。図 1.6 に示したフレームの内部では 4 本の LED 光を水平方向と斜め方向に照射している。Read Out(RO) 面に市松模様の格 子を、High Voltage(HV) 面に CCD イメージセンサーを 、MDT の中心 (MI) にレ ンズを取り付けている。LED は市松模様格子を照らしている。レンズの焦点を市 松格子と CCD に合わせている。レンズの位置が動いたとき、CCD に写る市松格 子の像の位置が動く。これを観測することで MDT の数 µm の精度で歪みを測定し ている。また、エンドキャップ MDT にはアライメントバーを基準として検出器の 設置位置を測定している。このアライメントバーは、全長 9.6 m のアルミ製の棒 であり、熱膨張や変形を約 20 µm の精度で測定している。このアライメントバー には、光学センサーが取り付けられており、このセンサーに光を当てることで、光 源とセンサーの距離を測定している。このアライメントバーとの位置関係を把握 することで検出器の位置を測定することができる。光学測定後は MDT の設置位 置のずれを考慮してミュー粒子飛跡再構成を行うことで高精度の飛跡検出を可能 としている。



図 1.6: MDT の構造図とアライメントシステム。1本が 1~6 m のドリフトチュー ブを俵積みに重ね合わせた構造になっている。図のよに 3 段+3 段の計 6 段を 1 層 としている。4本の赤い線は LED 光を表している。Read Out(RO) 面に市松模様の 格子を、High Voltage(HV) 面に CCD イメージセンサーを 、MDT の中心 (MI) に レンズを取り付けている。LED は市松模様格子を照らしている。レンズの焦点を 市松格子と CCD に合わせている。レンズの位置が動いたとき、CCD に写る市松 格子の像の位置が動く。これを観測することで MDT のたわみ測定を行っている。

1.3.4 トリガーシステム

ATLAS 実験では豊富な記憶装置・計算機資源のおかげで、20 MHz の陽子衝突 事象のうち最大 400 Hz までデータとして記録することができる。衝突事象を記録 する際に、興味のある物理由来の事象に限定して、効率よく記録することが必要に なる。ATLAS 実験では図 1.8 のように、レベル1トリガー、レベル 2トリガー、 イベントフィルターの 3 段階のトリガーによって事象を 400 Hz まで選別して記録 している。これらのトリガーは運動量やエネルギーに閾値を設けることで事象選 別を行っている。このトリガーの閾値が低い程、より広い範囲での物理解析が可 能になる。図 1.7 は横運動量毎のミュー粒子の生成断面積を表したグラフである。 低運動量に閾値を設けるほどミュー粒子を含む事象によるトリガーレートが増え ることがわかる。また、同じ運動量閾値を持った運動量分解能の異なるトリガー を考えるとき、運動量分解能が悪いトリガーは低運動量のミュー粒子の事象を記 録するためトリガーレートが高くなる。また、トリガーレートはルミノシティー の上昇に応じて高くなる。



図 1.7: |η| <2.7 におけるミュー粒子の生成断面積の横運動量依存性。

レベル1トリガー

陽子を構成するクォーク・グルーオン由来の数 100 MHz に及ぶ事象中から 75 kHz まで事象選別を行う。レベル1トリガーでは ハードウェア上で 2.5 µs 以内にトリ ガー判定を行う。レベル1トリガーは、高運動量の粒子事象を選別し、その高運動 量粒子が通過したと考えられるおおまかな場所情報である Region of Interest(RoI) 情報をレベル2トリガーへ送る。この RoI 情報をもとにレベル2トリガーでは事象 選別を行う。カロリメータ、ミュー粒子検出器 (RPC, TGC) がレベル1トリガーと しての役割を担っている。主なトリガーとして、ミュー粒子、電子、光子、ジェッ ト、Missing Energy トリガーが存在しており、これらの合計を 100 kHz 以内にす る (表 1.4)。シングルミュー粒子トリガーでは最大 15 kHz まで事象を選別する。ト リガーの低い閾値を低く保つためには、ここではハードウェアの理解を深め、ト リガーシステムを最適化することが必要である。

2012 年の主なレベル 1 トリガー				
トリガータイプ	L1 threshold [GeV]	L1 max trigger rate[kHz]		
single muon	15	8		
single electron	18	17		
2 muon	2×10	1		
2 electron	2×10	6		
2 tau	15, 11	12		
2 photon	2×10	6		
2 loose photon	12, 16	6		
single jet	75	2		
MET	40	2		

表 1.4: レベル1トリガー

レベル2トリガー

レベル2トリガーはレベル1トリガーが発行した 100 kHz のデータを、計算機 上でさらに詳細な事象選別を行い、2 kHz 程度まで選別する。 レベル1トリガー からの RoI 情報をもとに領域を絞り込み、内部飛跡検出器で再構成された粒子の 飛跡の情報を加えたことにより、10 ms 以内での精度の高いトリガー判断を達成し ている。

イベントフィルター

レベル2トリガーで選別された事象に対して、全ての検出器での検出位置情報 を使用してトリガー判定を下す。イベントフィルターでは2 kHz の事象から 400 Hz を選別し、データを記録する。



図 1.8: トリガーシステム概要

第2章 Thin Gap Chamber

Thin Gap Chamber(TGC) は ATLAS 検出器のエンドキャップ部分 (1.05 < $|\eta|$ < 2.7) に設置したワイヤーとストリップによる 2 次元読み出しを行うミュー粒子検 出器である。また、TGC は 25 ns 以内に高速応答するガス検出器であり、レベル 1 ミュー粒子トリガーシステムとしてトリガー判定に用いられている。TGC は MDT では測定できない ϕ 方向の位置情報検出の役割も担っている。TGC は計 1578 枚 存在し、合計 32 万チャンネルの読み出しチャンネルが存在する。

2.1 TGCの構造

TGC はガス検出器の一種で、陰極板の間に直径 50 µm の金メッキタングステン ワイヤーを張った構造をしている (図 2.1 の [1])。ワイヤーには約 3kV の電圧を印 加している。高頻度の入射粒子でも正常に動作するように、ワイヤー陰極板間の距 離が短い構造になっており、陽極ワイヤー間の距離が 1.8 mm、陽極ワイヤー陰極 板の間の距離が 1.4 mm である。 陰極板の外側にストリップをワイヤーと直交す るように設置している。r方向をワイヤー、φ方向をストリップが読み出す2次元 読み出しである (図 2.1 の [2])。ワイヤーの読み出しを 4~40 本をまとめて 1 チャン ネルの読み出しとしているため、実際のチェンネル幅は数 cm となっている。この チャンネル幅は陽子陽子衝突による粒子飛来頻度が均一になるように設計されて おり、フォワード領域になるほどチャンネル幅は狭く位置分解能は良い。CO2 と n-ペンダンを 55:45 で混合したガスを流入させている。TGC は図 2.2 に示すよ うに、ガスの層が2層のもの(ダブレット)または3層(トリプレット)のものが存 在している。ダブレットは、2層のワイヤーと2層のストリップによる読み出しを 行っており、トリプレットは3層の陽極ワイヤーと、2層のストリップによる読み 出しを行っている。ダブレットの厚さは 45.4 mm、トリプレットの厚さは 72 mm で、張られているワイヤーから TGC 表面までの距離は 8.7 mm である。



図 2.1: TGC の構造。



図 2.2: TGC をz - r 平面で見た断面図。ダブレットは TGC1 枚としての厚さが約 45.4 mm で、トリプレットは約 72 mm である。

2.2 TGCの動作原理

TGC に入射した荷電粒子は、その飛跡に沿ってガス分子と衝突し、ガス分子を イオン化する。この時、ミュー粒子が CO₂ 中で落とすエネルギー dE/dx は、1気 圧でおよそ3 keV/cm である。CO₂ は平均して 33 eV のエネルギーで電離するので TGC を追加する間におよそ 30 個程度の初期電子が生じる。電離した電子は、TGC 内部の電場に沿って陽極へ向かって加速される。電子の運動エネルギーが CO₂ 分 子の電離エネルギー 13.7 eV を超えると、ガス分子は電子によってイオン化され る。このイオン化された電子も加速され、十分な運動エネルギーを得ると CO₂ 分 子をイオン化し始める。このように次々にイオン化が起こり雪崩式に電子が増加 する。単位距離 dx あたりに電子数が n 増加する場合、

$$dn = \alpha n dx \tag{2.1}$$

と表すことができる。αは電場に比例する。このとき

$$n = n_0 \exp(\alpha \mathbf{x}) \tag{2.2}$$

と表すことができる。n₀は初期電子数である。電場の大きなワイヤー近傍で電子 雪崩が起る。電子はワイヤーを取り囲み、イオンは陰極へ移動する。この過程に よって生じた信号を読み出すことで、荷電粒子の情報を得る。TGC では 10⁶ 程度 の増幅率が得られる。電子雪崩の最中で、電子はガス分子を電離するだけではな く、ガス分子を励起する。この励起したガス分子は紫外線を放射して基底状態に 戻る。エネルギーが高い紫外線はガス分子を電離する。このため、電子雪崩が検出 器全体に広がり、位置分解能の低下を招く。これを防ぐために、紫外線吸収能力の 高い n-ペンタンを混入している。CO₂ 中での電子のドリフト速度は数 10 mm/µs であり、電子の早い反応を読み出しに用いている。CO₂⁺ のドリフト速度 w⁺ は 0.1 mm/µs 程度と遅いため、粒子入射頻度が高くなると CO₂⁺ が検出器中に溜まって しまい電場構造を変えてしまい、検出効率の低下に繋がる。TGC はワイヤースト リップ距離を短くすることで、CO₂⁺ が検出器中に溜まることを防ぎ、20 kHz/cm² でもトリガー効率を維持することができる。

2.3 TGCの配置

TGC を図 2.3 に示すように円盤状に配置している。ミュー粒子の検出の不感領 域を抑えるために、TGC チェンバーを互い違いに配置することで、隙間のない配 置を実現している。図 2.3 の [1] を Small Wheel(SW)-TGC と呼ぶ。SW-TGC はト ロイド磁石との干渉を避けるために、歯車状に配置されている。図 2.3 の [2] を Big Wheel(BW)-TGC と呼ぶ。BW は円盤を ϕ 方向に 12 分割したものを単位としてセ クターと呼んでいる。円盤を組み上げる際、このセクターを単位として組み上げら れた。一番 η が大きい領域では ϕ 方向に 24 分割されておりこれらを Foward (FW) と呼ぶ。 η が小さい領域では ϕ 方向に 48 分割されており、 η が小さい順に E1, E2, E3, E4, E5 と呼ぶ。

図 2.4 が示すように、内側から約 7 m の箇所に SW-TGC を設置している。図 2.5



図 2.3: TGC の x - y 配置断面図。

に示すように、SW-TGCを円盤状の鉄製磁場シールドとMDTの間に挟む形で1 層設置している。SW-TGCは磁場シールドに固定されている。この磁場シールド は足下の二点で固定している。約13 m、15 mの地点にBW-TGCを3層設置して いる。3層を衝突点側からから M1, M2, M3 と呼ぶ。この SW-TGC と BW-TGC の間にはトロイド磁場があり、ミュー粒子は SW-TGC まで直進し、その後磁場で 曲げられ BW-TGC に到達する。M1 と M2 の間に 2層 MDT を設置している。M1, M2, M3 と MDT は一つの構造体として固定されている。この構造体は、上端に取 り付けられたレール上を平行移動することが可能である。所定の場所に設置する 際は、ボルトで上端の 2 点と固定下端の一点を固定する。



図 2.4: TGC の *z* – *y* 配置断面図。SW-TGC を衝突点から約 7 m に設置。その直後 に MDT を設置している。約 13 m、15 m の地点に BW-TGC を設置。間に MDT を挟んでいる。



図 2.5: 青色の円盤状のものが磁場シールド。SW-TGC を磁場シールドに貼付けて 設置。手前の銀色の円盤が MDT。

2.4 TGCトリガーシステム

2.4.1 TGCトリガーの概念

TGC はレベル1ミュー粒子トリガーとしての役割を担っている。図 2.6 は、TGC トリガーシステムの原理を表している。衝突点と、BW-TGCの間にはトロイド磁 場があるのでミュー粒子は曲げられる。トロイド磁場 B、ミュー粒子の曲率半径 r、ミュー粒子の電荷 e から、横運動量 p_T を

$$p_T = eBr \tag{2.3}$$

と表すことができる。曲げられたミュー粒子は、M1, M2を通過し、M3に達する。 この M3上での検出点と衝突点を結ぶ直線を考える。これら2つに対して M1, M2 上での検出点と無限運動量をもったミュー粒子を仮定した時の検出点の r 方向の 差、 ϕ 方向の差の組み合わせを (δR , $\delta \phi$)とする。運動量が低い程、(δR , $\delta \phi$)は大 きくなり、運動量が大きい程 (δR , $\delta \phi$)は小さくなる。シミュレーションをもとに 各運動量に対する (δR , $\delta \phi$)を調べ、運動量と (δR , $\delta \phi$)の対応表である Coincidence Window(CW)を作る (図 2.7)。これをトリガー回路に組み込み、BW-TGC 三層 での検出パターンから運動量判断を行っている。図 2.7 は、色分けした領域毎に運 動量閾値を表している。中心の領域から順にミュー粒子が 20 GeV 以上、15 GeV 以上、10 GeV 以上、6 GeV 以上、黒色を 4GeV 以上の運動量として判断する。こ の閾値は、トリガーレートに応じて変更することができる。2011年のトリガーに 対しては 10 GeV 以上、2012年のトリガーに対しては 15 GeV の運動量閾値を適 用している。

2.4.2 TGCトリガーのエレクトロニクス

TGCのトリガーでは、信号の増幅・整形・デジタル化を行う Amplifier Shaper Discriminator(ASD)、信号のタイミングをビーム衝突時間毎に識別する Patch Panel ASIC(PP)、各層での Coincidence 処理を行う Slave Board ASIC(SLB)、高運動量 コインシデンス情報を扱う High- p_T (HPT)、ワイヤーとストリップの情報を統合す る Sector Logic(SL) の順に信号処理を行っている。SL で判断した p_T 情報は、Muon CTP Interface(MuCTPI) に送られ、RPC からのトリガー情報と合わせて、最終的 なレベル1ミュー粒子トリガーを発行する。

Amplifier Shaper Discriminator

TGC のワイヤーやストリップから出力された信号は TGC 側面に設置した Amplifier Shaper Discriminator (ASD) ボードに送られる。ASD-IC1 つで 4 チャンネ ル分の処理をすることが可能で、ASD ボードには 4 つの ASD-IC を設置すること



図 2.6: TGC トリガーシステム概念図。M3 でのミュー粒子の検出点と衝突点を結ぶ 直線を考える。これはミュー粒子の無限大運動量飛跡を仮定したものである。M1, M2 でのミュー粒子の検出点と無限大運動量飛跡の差を ($\delta R, \delta \phi$) とする。($\delta R, \delta \phi$) をもとに運動量を判断する。例えば、 p_T が小さいミュー粒子は磁場で大きく曲げ られるため ($\delta R, \delta \phi$)が大きくなる。



図 2.7: Coincidence Window の例。それぞれの領域で運動量を判断する。中心の 領域から順にミュー粒子を 20 GeV 以上、15 GeV 以上、10 GeV 以上、6 GeV 以 上、黒色を 4 GeV 以上の運動量を持つ領域表である。

ができる。ASD からはノイズに強い Low Voltage Differential Signalling(LVDS) 規格の作動信号が出力される。

PatchPanel ASIC

PatchPanel ASIC は内蔵した Phase Locked Loop 回路によって、約 0.8 ns の精 度で可変遅延回路を達成している。この可変回路を用いることで、ASD からの信 号と LHC clock を同期させ、ミュー粒子飛行時間の違いやケーブル遅延による入 力信号のばらつきを揃えている。

Slave Board

Patch Panel から送られてきた信号をワイヤー・ストリップ、ダブレット・トリ プレット独立に Coincidence 処理を行う。M2, M3 では、ワイヤー・ストリップそ れぞれ 3/4 Coincidence を要求する。トリプレットでは、ストリップに対して 1/2、 ワイヤーでは 2/3 Coincidence を要求する。この情報は High-p_T に送られる。

$\mathbf{High-}\mathbf{p}_T$

Slave Board から送られてきた、ダブレットとトリプレットからの Coincidence 情報を統合する。ワイヤーとストリップをそれぞれ独立に扱い、 $(\delta R, \delta \phi)$ 情報を出力する。

Sector Logic

Sector Logic では High- p_T から送られてきたワイヤーとストリップの情報を統合 し CW をもとに 6 段階の p_T 判断を行う。この情報は MuCTPI に送られる。この CW は FPGA 内に実装されており、実験の状況に応じて自由に書き換えることが 可能である。

第3章 TGCの位置測定

3.1 トリガーに対する TGC の設置位置の影響

CW は TGC が設計位置に設置されていることを前提として作成したものであ る。設置位置が設計位置からズレている場合、想定されていた検出パターンから 外れてしまい運動量分解能が悪化する。 図 3.1 のように設置位置がずれている場 合、CW もずれてしまう。そのため、運動量を誤識別してしまう。特に、トリガー の運動量分解能の低下を招く。



図 3.1: 設置位置がずれている時のトリガーに対する影響の概略図。CW のずれている場合、運動量を誤測定する。

3.2 TGC の光学設置位置測定

ATLAS 検出器に TGC を設置する際、TGC の光学位置測定を行った後に設置 した。また、ATLAS 検出器をメンテナンスする際には検出器内部にアクセスする 必要があるので、TGC の円盤をビーム軸方向へ移動し、内部での作業を可能にす る。メンテナンスが終了した際、検出器をもとの設置位置に再設置する。この再 設置の度に TGC の光学設置位置測定を行っている。

3.2.1 TGC の光学位置測定装置

SW-TGC の光学位置測定装置

先に述べたように、SW-TGC は鉄製のシールドと MDT の間に挟まれているた めに直接設置位置を測定することができない。そこで、ATLAS 検出器内に配置す る前に、それぞれの TGC チェンバーの位置を測定する (図 3.2 の箇所)。ATLAS 検出器に設置後、SW-TGC の外から見える磁場シールドと MDT を数点測定し参 照点とする。その後、参照点との相対位置から SW-TGC を設置した絶対位置に 焼き直す。この設置位置測定に光学測定装置トータルステーションを用いている。 トータルステーションとは、電子セオドライトと光波距離計とを組み合わせた装 置で、目標物の角度と距離を測定することが可能である。目標物に設置した反射 板 (図 3.3) にレーザー光を照射し、その反射光が戻って来るまでの時間を測定し、 目標物までの距離を算出する。これにより、計 48 点の *x*, *y*, *z* 座標を位置精度は 1.5 mm 程度で測定する。

BW-TGC の光学位置測定装置

BW-TGCは前述のトータルステーションに加え、フォトグラメトリを用いた位 置測定を行っている。トータルステーションでは、基準点の位置からの距離を測 定することで絶対位置を測定する。フォトグラメトリは複数点から写真を撮影し その視差から、3次元的に位置を測定する技術である。BW-TGCのM3表面には 測定標的となる発光シールが4隅に張られている(図3.4)。この発光シールのx, y, z 座標を測定からM3の全264枚の相対位置を知ることができる。この測定の精度 は約1mmである。



図 3.2: SW-TGC 測定に用いられる反射板の配置図。A-side, Cside にぞれぞれ 48 点測定点がある。1 枚の TGC につき 2 つの測定点があり、ビーム軸に近いものを I01~I24 と呼び、ビーム軸から遠いものを E01~E24 と呼ぶ。



図 3.3: TGC 測定に用いられる反射板。球形中心に反射面を取り付けている。この反射面にレーザー光を照射する。 左が図 3.2 の E01~E24 に設置されており、右が I01~I24 に設置されている。それぞれ TGC の表面からオフセットを持った z 座標を測定している。



図 3.4: BW-TGC 測定に用いられる発光シールの配置図。図は BW-TGC の 1/12 である。1 枚の TGC につき 4 つの測定点がある。これらの位置を複数点から写真 撮影することで 3 次元的に位置を測定する。この図の丸で示した箇所に発光シー ルを設置している。

3.2.2 TGC の光学測定結果

SW-TGC の光学測定結果

図 3.5 は 2012 年に測定された SW-TGC の設置位置測定結果である。動径方向 に最大5 mm、ビーム軸方向に最大 15 mm、最大 20 mrad の傾きを持っているこ とが分かる。特に z 軸方向へのずれと、傾きに関して SW-TGC の上側で大きいこ とが分かる。これは、磁場シールドの足を軸に SW-TGC 全体が傾いていることを 示している。



図 3.5: 2012 年の SW-TGC の r, z, γ 方向の光学測定結果

BW-TGC の光学測定結果

図 3.6 は 2011 年に測定された BW-TGC M3 の測定結果である。動径方向に最大 20mm、ビーム軸方向に最大 40mm ずれていることが分かる。また、A-side と C-side ではずれ方が異なっており、A-side は全体が傾いた形で、C-side は真ん中 がビーム軸方向にへこんだ形になっている。このずれのためにトリガーの運動量 分解能が悪化することが予想できる。



図 3.6: 2011 年の BW-TGC の r, z 方向の光学測定結果

3.3 ビームデータを用いた設置位置測定手法

光学測定のずれがトリガーの運動量分解能に与える影響を調べるために、衝突 事象由来のミュー粒子を用いた測定を行う。BW-TGCのr軸、z軸方向に対する 設計位置とのずれを測定した。それぞれのずれ量を、dr, dzと定義し、動径方向に 検出器がずれていた場合 dr > 0、衝突点から遠ざかる方向へのずれを dz > 0とす る。

ここで、TGC 上での検出点 R_{TGC} と、飛跡検出器とミュー粒子検出器から再構成 されたミュー粒子飛跡を TGC の表面まで外挿した点を R_{track} と定義する。その差 分 $\delta \rho$ を

$$\delta \rho = R_{\rm track} - R_{\rm TGC} \tag{3.1}$$

と定義する。

動径方向の測定

r軸方向にだけずれが存在する時のことを考える (図 3.7)。 $\delta \rho$ と r軸へのずれ量 drの関係は

$$\delta \rho = dr \tag{3.2}$$

として表すことができる。



図 3.7: r 方向にずれている時の概略図。

ビーム軸方向の測定

z軸方向にだけずれが存在する時のことを考える (図 3.8)。ミュー粒子の TGC 表面での入射角 θ^* を用いると、 $\delta \rho$ と z 軸へのずれ量 dz の関係は

$$\delta \rho = -dz \tan \theta^* \tag{3.3}$$

として表すことができる。



図 3.8: z方向にずれている時の概略図。 θ^* はミュー粒子の TGC に対する入射角を表す。

式 3.2, 3.3 より *δ*ρは

$$\delta \rho = dr - dz \tan \theta^* \tag{3.4}$$

と tan θ^* の一次関数として表すことができる。これにより設置位置を測定する。図 3.9 は横軸を tan θ^* とし、縦軸を $\delta\rho$ とした分布を TGC1 枚に対して見たものであ る。図 3.10 は左図の横軸 tan θ^* ごとに平均の $\delta\rho$ を求めたものである。図 3.10 に 式 3.4 を用いてフィットすることで dz, dr を求める。



図 3.9: ミュー粒子飛跡毎の横軸 $\tan\theta^*$ 、 縦軸 $\delta\rho$ の分布。



図 3.10: ミュー粒子の tanθ* 毎に δρ の平 均を見た分布。赤線は、式 3.4 を用いて フィットした線

TGCの検出点 R_{TGC}の事象選別

TGCの検出点を考える際、TGC1枚中にワイヤー、ストリップからそれぞれ 1つだけ信号を持つことを要求し、このワイヤー、ストリップの交点を*x*,*y*座標ワ イヤーの*z*座標を検出点の*z*座標とする。これにより、ノイズ由来でないミュー粒 子が通過した点を得ることができる。

ミュー粒子飛跡の外挿点 Rtrack の事象選別

この解析ではミュー粒子飛跡の精度が鍵となる。そこで、精度よく再構成され たミュー粒子を用いるために以下の条件を課す。

- $p_T \ge 4 \text{ GeV}$
- MDT での検出点 ≥ 10
- Pixel での検出点 ≥ 1
- SCT の検出点 ≥ 7
- TGCのストリップの検出点 ≥ 1

外挿する TGC に最も近い MDT での検出点からワイヤの z 座標まで外挿した点を x, y, z 座標とする。式 3.1 で定義した TGC の検出点とミュー粒子飛跡の外挿点の 差 $\delta\rho$ から、TGC の設置位置を算出する。

3.4 ビームデータを用いた TGC 設置位置結果

2011年の測定結果から、TGCの設置位置はr軸方向に最大約 20 mm、z軸方向 に約 40 mm と、TGCの位置分解能以上にずれている (図 3.11, 3.12)。図中の白抜 きは電圧がかかっていない箇所を表す。M1,M2,M3を構造体として固定している ため、z方向に同じように動いていることが分かる。

3.5 TGC 設置位置結果の比較

光学測定とビームデータを用いた測定を比較する (図 3.13~3.5)。両測定とも無 矛盾なものであり、確かにミュー粒子は設置位置のずれの影響を受けていること が分かる。



図 3.11: 2011 年の TGC の設置位置の A-side の r, z 方向のズレ


図 3.12: 2011 年の TGC の設置位置の C-side の r, z 方向のズレ



図 3.13: A-side の FW の dr の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.14: A-side の FW の dz の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.15: A-side の E5 の dr の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.16: A-side の E5 の dz の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.17: A-side の E4 の dr の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.18: A-side の E4 の dz の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.19: A-side の E3 の dr の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.20: A-side の E3 の dz の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.21: A-side の E2 の dr の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.22: A-side の E2 の dz の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.23: A-side の E1 の dr の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.24: A-side の E1 の dz の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.25: C-side の FW の dr の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.26: C-side の FW の dz の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.27: C-side の E5 の dr の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.28: C-side の E5 の dz の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.29: C-side の E4 の dr の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.30: C-side の E4 の dz の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.31: C-side の E3 の dr の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.32: C-side の E3 の dz の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.33: C-side の E2 の dr の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.34: C-side の E2 の dz の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.35: C-side の E1 の dr の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 3.36: C-side の E1 の dz の測定結果の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。

第4章 アライメントを考慮したトリ ガーシステムの評価

4.1 アライメントを考慮したトリガーシステム

TGC トリガーシステムは M1-TGC と M3-TGC での検出パターンに基づいた運 動量測定を行っているので、M1 と M3 の相対位置のずれを用いてトリガーシステ ムを改良する。M1 上での $\delta\rho$ とチァンネル幅をそれぞれ、 $\delta\rho_{M1}$ 、W_{M1} とおく (図 4.1)。M3 上での $\delta\rho$ とチァンネル幅をそれぞれ、 $\delta\rho_{M3}$ 、W_{M3} とおく。M1 は3 層構 造、M3 は2 層構造になっていることを考慮すると、M1 と M3 間の相対的ずれチャ ンネル数 Δ Road は、

$$\Delta \text{Road} = \frac{\delta \rho_{\text{M1}}}{W_{\text{M1}}/3} - \frac{\delta \rho_{\text{M3}}}{W_{\text{M3}}/2}$$
(4.1)

として表される。図 4.2, 4.3 が、2011 年に測定された ΔRoad 分布である。最大で 2チャンネル近くずれが存在していることが分かる。CW の1マスはチャンネル数 に相当するので、ΔRoad の大きさだけ CW を平行移動したものが制作され、2012 年のトリガーで使用された。TGC 設置位置を反映した CW でトリガーの運動量分 解能が改善しているかを評価する。

4.2 トリガー効率測定手法

ミュー粒子トリガーによって取得されたデータを用いてミュー粒子トリガーを評価する場合、トリガー条件を満たさないミュー粒子事象は切り捨てられているため、トリガー効率は過大評価される。そこでトリガーの影響を受けていないミュー 粒子を選出する必要がある。事象中にミュー粒子が2つ存在し、一方がトリガー 条件を満たしている場合、他方のミュー粒子は、トリガー条件を満たす必要がない。トリガーを通過したミュー粒子をタグミュー粒子、トリガー効率測定に用い るミュー粒子をプローブミュー粒子と呼ぶ。このプローブミュー粒子を用いるこ とでミュー粒子トリガーからバイアスを受けずにトリガー効率を評価することが できる。この手法をタグ&プローブ法という。本測定では、Z粒子がミュー粒子 対へ崩壊する事象を用たトリガー効率の解析を行う。Zの質量付近のミュー粒子対 崩壊事象を用いてた場合、モンテカルロシミュレーションを用いた研究から偽物 のミュー粒子は1%以下であることが分かっている。



図 4.1: TGC が設置位置からずれている時の $\delta \rho$ の概略図。M1 と M3 との相対位置のずれを考える。



図 4.2: A-side の $\Delta Road 分布$

図 4.3: C-side の ∆Road 分布

用いた事象

2011年の全データ 4.9 fb⁻¹ と 2012年のデータ 7 fb⁻¹ を用いた。2011年はイベ ントフィルターでは 18 GeV 以上のミュー粒子、2012年は 24 GeV 以上のミュー 粒子を選別している。

事象選別

事象中に2つ以上のミュー粒子が存在することを要求し、それらのミュー粒子の うち一方が、イベントフィルターを通過していることを要求する。このとき、下 記のように Δ*R*を定義する。

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

これは、ミュー粒子トリガーが発行された場所 $(\eta, \phi)_{\text{trigger}}$ とミュー粒子飛跡の 衝突点での放出角 $(\eta, \phi)_{\text{track}}$ の差で定義する量で、 $\Delta R < 0.2$ のとき、トリガー条 件を通過したと定義する。ここで選別したミュー粒子で不変質量 $m_{\mu\mu}$ を組み、 81 GeV < $m_{\mu\mu}$ < 101 GeV であることを要求する (図 4.4)。また、 ミュー粒子が $0 < \phi < 2\pi$ 、 $1.1 < |\eta| < 2.4$ 方向に飛んだことを要求する。



図 4.4: 2つのミュー粒子から再構成した不変質量。赤の点線の領域に入った事象のみを用いる。

トリガー効率の定義

トリガー効率 ϵ は式 4.3 で定義する。

$$\epsilon = \frac{ トリガーを通過したプローブミュー粒子数}{ 全プローブミュー粒子数}$$
(4.3)

算出したトリガー効率は式4.4を用いて評価する。ここで*a*はプラトー領域でのト リガー効率、*b*は運動量閾値、*c*は運動量分解能を表す。

$$\epsilon = \frac{a}{\exp\left(-\frac{p_T - b}{c}\right) + 1} \tag{4.4}$$

4.3 トリガー効率測定結果

2011年のトリガー効率

図4.5は2011年のトリガー効率を測定した結果である。トリガーの運動量分解能 に対する設置位置の影響を確認するために、BW-TGCを12分割し、運動量分解能 の設置位置依存性を確認した。BW-TGCはセクター単位で組み上げられているの で、セクターごとの12分割に区切った。図4.6は、横軸をセクター毎のΔRoadの 平均、縦軸はセクター毎の運動量分解能としたものである。各点は、A-side, C-side それぞれのセクターを足し合わせた全24点を表している。図4.6のように一次関 数でフィットした結果、

resolution =
$$(0.66 \pm 0.10 [\text{GeV}]) \Delta \text{Road} + (1.39 \pm 0.05 [\text{GeV}])$$
 (4.5)

となり、0.66 GeV/ Δ Road と Δ Road に応じて運動量分解能が悪化していることが 分かる。この結果により CW を補正した場合、最大で運動量分解能が 1.39 ± 0.05 GeV まで改善されることが期待される。

2012年と2011年の運動量分解能の比較

2012年と2011年の運動量分解能を比較する。2011年同様セクターで12分割に 分けた運動量分解能の測定を行う。図 4.7 は2011年と2012年の運動量分解能を 比較したものである。位置が大きくずれていたような箇所で運動量分解能が悪く、 2012年には改善していることが分かる。図 4.8 は2011年と2012年の運動量分解 能を A,C サイド、セクターをまとめた比較。2012年の運動量分解能は平均で1.53 ± 0.06 GeV であり、2011年と比較し運動量分解能は0.17 GeV±0.08 GeV 改善し ている。





図 4.7: 横軸がセクター番号、縦軸が運動量分解能を表す。黒四角が 2011 年の測 定結果。赤丸が 2012 年の測定結果。



図 4.8: 2011 年と 2012 年の運動量分解能の比較。斜線が 2011 年の測定結果。色塗 りが 2012 年の測定結果

第5章 TGCトリガーシステム改良に 向けたSW-TGC設置位置 測定

前章において、BW-TGCの設置位置測定結果をCWに反映することで運動量分 解能が改善することを明らかにした。さらなるトリガー効率改良に向けてミュー 粒子を用いた SW-TGC の初の設置位置測定を行う。

5.1 TGCトリガーシステムの改良

図 5.1 から現在の TGC トリガーシステムが発行するトリガーのうちミュー粒子 を伴わないようなもの (偽トリガー) が約 70 % を占めていることが分かる。この ような偽トリガーの原因は低運動量陽子だと考えられている。図 5.2 は低運動量陽 子が磁場で曲げられて、BW-TGC に入射する様子である。このようなものは、現 在のトリガーシステムでは高運動量ミュー粒子と区別がつかない。そこで、磁場 手前の SW-TGC が荷電粒子を検出することを要求することにより、ミュー粒子以 外によって発行されるトリガーの削減を目指している。SW を組み込んだトリガー システムでトリガー効率を最適な状態に設定するために、この SW-TGC の設置位 置測定を行う。

5.2 SW-TGCの設置位置測定手法

SW-TGCに入射してくるミュー粒子はBW-TGCに比べ統計量が多いため、TGC の傾き γ も求めた。SW-TGCに対してミュー粒子は衝突点から曲げられることな く飛来する。そのため、SW-TGCに対する入射位置は $\tan \theta^*$ から一意に決まる。

$\delta \rho$ の評価

SWの1チャンネル毎の $\delta \rho$ と $\tan \theta^*$ を測定し、 dr, z, γ を算出する。この時、 $\delta \rho$ 分布の形は図 5.3の左図が表すようなチャンネル幅と同じ幅 W をもった矩型波が 傾斜を持った形となる。実際の測定では飛跡検出器からミュー粒子を TGC 表面に



図 5.1: 横軸が TGC の発行したトリガーの η 、縦軸はトリガーを発行した回数を 表したものである。斜線は運動量 10 GeV 以上のミュー粒子トリガー条件を満た した RoI 数の η 分布を表している。ドットは運動量 10 GeV 以上のミュー粒子ト リガー条件を満たした RoI のうちミュー粒子を伴っているものを表す。色塗りは ドットは横運動量 10 GeV 以上のミュー粒子トリガー条件を満たした RoI のうち 運動量が 10 GeV 以上のミュー粒子を伴っているものを表す。



図 5.2: 磁場で曲げられた陽子が TGC に入射する様子。衝突点由来のミュー粒子 と区別がつかず、トリガーを発行する。SW-TGC が粒子を検出することを要求し てこのような事象を取り除くことができる。

外挿する際の精度で決まる位置分解能 σ で鈍らせたガウス分布を足し合わせた形 となる。設置位置がずれている際 $\delta\rho$ は0から Δ だけ移動する (図 5.3)。この時、 $\delta\rho$ 分布は次のように定義できる。f(r')は入射粒子数がx - y平面で見た時不均一 であることを再現するために導入した。この関数を用いて Δ を算出する (図 5.4 は フィッティングの結果の一例)。

$$\delta\rho = \int_{-W/2-\Delta}^{W/2-\Delta} \frac{f(r')}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(\frac{-(r'-r)^2}{2\sigma^2}\right) dr' + \text{noise}$$
(5.1)

$$f(r') = ar + b \tag{5.2}$$



図 5.3: $\delta\rho$ 分布関数の概念図。W はチャンネル幅を表す。 Δ は $\delta\rho$ 分布の原点からのずれ量を表す。左図は、ミュー粒子飛跡の位置分解能 $\sigma=0$ の時の分布。右図は、位置分解能が $\sigma \neq 0$ の時の分布。ガウス分布を足し合わせた形として表すことができる。



図 5.4: $\delta \rho$ 分布関数を用いたフィティング結果。TGC1 枚の1 チャンネルに対する $\delta \rho$ 分布。

このようにして、全SW-TGC90枚の全チャンネルに対して、 Δ を測定する。この結果より、チャンネル毎に見た Δ は最大 30 mm 存在していることが分かる (図 5.5, 5.6)。また、検出器の端と端で Δ が 30 mm 近く異なっているものが存在している。端に取り付けられているチャンネルはガス層毎にチャンネル幅が異なるため Δ を評価できないので白抜きで表示した。また TGC の真ん中に存在するチャンネルは一部ワイヤーが 張られていない構造になっているため評価できないため白抜きで表示した。C-side の検出器 1枚が欠けている箇所は検出器が動いていない。

傾きがあるときの測定

SW-TGC は入射粒子数が多いため傾いている時のことを考えることができる (図 5.7)。TGC 検出器から衝突点までの距離を Z_0 、ビーム軸から検出器の下端までの距離を L_{edge}、TGC 上の検出点と検出器下端までの距離を L、TGC の理想的な設置位置にミュー粒子飛跡を外挿した点と検出器の回転中心までの距離を L_{track} とする。また、検出器が γ 傾いていた時の検出点自身の設計位置からのずれ量をr軸z軸方向それぞれ、dr', dz'とする。 $\delta\rho$ と傾き角 γ の関係は

$$\delta \rho = dr' - dz' \tan \theta^* \tag{5.3}$$

として表すことができる。さらに、

$$dr' = L(\cos\gamma - 1) \tag{5.4}$$

$$dz' = L\sin\gamma \tag{5.5}$$

$$L = \frac{L_{\text{track}}}{\cos \gamma - \sin \gamma \tan \theta^*} \tag{5.6}$$

$$L_{\text{track}} = Z_0 \tan \theta^* - L_{\text{edge}}$$
(5.7)

となる。 γ が小さい時は $\sin \gamma \sim 0, \cos \gamma \sim 1, \cos \gamma - \sin \gamma \tan \theta^2 \sim 1$ と近似できる ことより、

$$\delta\rho = \left(-Z_0 \tan^2 \theta - L_{\text{edge}} \tan \theta\right) \sin\gamma \tag{5.8}$$

として $\tan \theta^*$ の二次関数として表すことができる。

動径, ビーム軸 , 傾き方向へそれぞれズレている時の測定

上で求めた式を組み合わせることで、式5.9のように書き表すことができる。

$$\delta\rho = (-Z_0 \tan^2 \theta - L_{\text{edge}} \tan \theta) \sin \gamma + dr - dz \tan \theta^*$$
(5.9)

 $\delta \rho$ は tan θ^* の二次関数で表すことができる。チャンネル毎の Δ と tan θ^* とこの式 を用いてフィッティングすることで dr, dz, γ を求める。1 チャンネルの tan θ^* 分布 は平均値から求めることができる。図 5.8 は典型的な tan θ^* 分布を表している。




図 5.7: TGC が傾いている時の概略図。 θ^* はミュー粒子の入射角、 γ は TGC の傾き、 Z_0 は衝突点から TGC の表面までの距離、 L_{edge} はビーム軸から TGC の下端までの距離、L はミュー粒子の検出点と TGC の下端の距離、dr', dz' は TGC が傾くことによって、TGC の検出点が動径方向、ビーム軸方向に移動した距離を表す。



図 5.8: TGC1 枚の1 チャンネルに対する $\tan \theta^*$ 分布。

5.3 SW-TGCの測定結果

設置位置の評価

EIFI のチャンネル毎の $\Delta \ \langle \tan \theta^* \rangle$ をもとに dr, dz, γ を求めたものが図 5.9 で ある。各点は TGC の中のワイヤー 1 チャンネルに対応する。さらにこの結果を SW-TGC の光学測定結果と比較する。この回転軸は TGC の再下端で考えているた め、I01~I24 までの測定結果と比較した。図 5.3,~5.3 に光学測定の結果とミュー 粒子を用いた測定を比較した。ビームデータを用いた測定では、r軸方向に最大 5 mm のずれが存在しており、z軸方向に最大 20 mm 程度ずれている。傾きに関し ては最大 15 mrad、SW-TGC の上側で傾いている。光学測定とも同じ傾向を示し ている。



図 5.9: 1 チャンネル毎の $\delta\rho$, $\langle \tan \theta^* \rangle$ に対してフィッティングした結果。各点が SW-TGC の1 チャンネルに対応する。横軸は、1 チャンネルの $\tan \theta^*$ の平均、縦 軸は $\delta\rho$ の原点からのずれ量 Δ を表す。



図 5.10: SW-TGC A-side の dr のビームデータを用いた測定と光学設置位置測定 の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー 粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 5.11: SW-TGC A-side の dz のビームデータを用いた測定と光学設置位置測定 の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー 粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 5.12: SW-TGC A-side の γ のビームデータを用いた測定と光学設置位置測定の 比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒 子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 5.13: SW-TGC C-side の dr のビームデータを用いた測定と光学設置位置測定 の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー 粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 5.14: SW-TGC C-side の dz のビームデータを用いた測定と光学設置位置測定 の比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー 粒子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。



図 5.15: SW-TGC C-side の γ のビームデータを用いた測定と光学設置位置測定の 比較。上図は横軸が ϕ 、縦軸がずれ量である。赤丸が光学測定、青四角がミュー粒 子を用いた測定結果を表す。下図は横軸 ϕ 、縦軸は両測定のずれ量の差を表す。

第6章 結論

本研究では、ミュー粒子トリガー TGC の設置位置に着目しトリガーの効率改善 に向けた研究を行った。衝突事象由来のミュー粒子を用いた設置位置測定手法を 確立した。衝突事象由来のミュー粒子を用いた測定と光学測定を用いた結果を比 較し両測定が無矛盾なものであり、動径方向に最大 20mm、ビーム軸方向に最大 40mm ずれていることを明らかにした。BW-TGC に対し、設置位置のずれを考慮 したトリガーを用いることでトリガーの分解能が改善することを明らかにした。

SW-TGCをトリガーシステムに導入することで、ミュー粒子以外によるトリガー 発行数を削減できる。そこでトリガーシステムへのSW-TGC導入にむけて、今回 SW-TGCの設置位置を初めて測定した。ミュー粒子飛跡とTGCの検出点の差を 見た時、A, C-sideともに最大 30 mmの差が存在している。また、SW-TGCを衝 突事象由来のミュー粒子を用いた測定と光学測定を用いた結果を比較した。両測定 は無矛盾であり、動径方向に最大 5mm、ビーム軸方向に最大 20mm ずれており、 最大 15mrad 傾いていることを明らかにした。本研究によって、設置位置を理解し た上で TGC トリガーシステムを運用できる。

参考文献

- [1] 名古屋大学 若林潤 修士論文 LHC-ATLAS 実験 μ 粒子トリガー検出器の 7TeV 陽子陽子衝突事象を用いたアライメントの研究 2011 年
- [2] 神戸大学 岸本巴 修士論文 ATLAS 実験における ミューオントリガー効 率の評価 2012 年
- [3] 神戸大学 鈴木雄太 修士論文 Look Up Table 改良による ATLAS レベル 1 ミューオントリガーの性能向上の研究
- [4] The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, JINST3 2008
- [5] ATLAS Level-1 Trigger Tequnical Design Report, 1998
- [6] TLAS Muon Spectrometer Tequnical Design Report, 1997
- [7] Expected Performance of the ATLAS Experiment Detector, Trigger and Physics 2008
- [8] ATLAS JD Shielding (C-Side) Measurement of Brackets for TGC Chamber Fixation 2007
- [9] ATLAS JD Shielding (A-Side) Measurement of Brackets for TGC Chamber Fixation
- [10] ATLAS SW (A-Side) Measurement of SW-A in UX15 in closed position
- [11] Placement strategy and survey in Atlas C. Lasseur TS-SU-EM April 2007
 EDMS 832163
- [12] ATLAS Muon Endcap Measurement of TGC3-A in Run Position in UX15 Measurements of week 05 of 2011 (04.02.2011)
- [13] ATLAS TGC Sectors TGC3A Sector 09 Measurement of Complete Sector in hall 180
- [14] LHC Design Report Volume 1

- [15] Determination of the muon reconstruction efficiency in ATLAS at the Z resonance in proton-proton collisons at $\sqrt{s} = 7$ TeV
- [16] The ATLAS Level-1 Trigger System Will Buttinger, On behalf of the ATLAS Collaboration
- [17] Performance of the ATLAS muon trigger in 2011 Takashi Matsushita On behalf of the ATLAS Collaboration