# 修士学位論文 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構築と検証

東京大学大学院理学系研究科 素粒子物理国際研究センター 川本研究室 平山 翔 Sho Hirayama

2009年1月24日

# 概要

2008 年 9 月、スイスの欧州原子核研究機構 (CERN) にて建設が進んでいた大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) の加速リング内をついに陽子ビームが一周した。LHC の最大の特徴は重心系衝突エネルギーが 14TeV というかつてない高エネルギーであることだ。それによってヒッグス粒子や超対称性粒子の発見等の物理的成果が期待される。

ATLAS 実験は LHC を用いて行われる実験の一つで、最も規模が大きく汎用性の高い検出器を使った多目的実験である。上述の LHC ビーム射出にあわせてひとまずの完成となった。現在は、2009 年夏の LHC 定常運転に向け、問題の洗い出し、不調箇所の修理、オペレーション用ツールの整備などさらなる質の向上を目指したコミッショニングの最中である。

私は、ATLAS 検出器の動作の要となるトリガーシステムのうち、前後方部を担当する TGC グループに所属し、システムの構築及び動作検証に取り組んできた。本論文ではこの前後方部ミューオントリガーシステムについて、その詳細、開発と構築の歴史、動作検証の方法と結果を述べる。

# 目次

第1章	序論		1		
1.1	素粒-	子物理学の現状....................................	1		
1.2	LHC	(The Large Hadron Collider) とは	3		
1.3	ATL	AS 実験の目指す物理	10		
	1.3.1	ヒッグス粒子の探索	10		
	1.3.2	ミューオントリガーの重要性	15		
第2章	ATLA	AS 検出器について	18		
2.1	ATL	AS 検出器の構成	18		
	2.1.1	ATLAS 検出器の全体像	18		
	2.1.2	マグネットシステム	21		
	2.1.3	内部飛跡検出器	24		
	2.1.4	カロリメーター・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	27		
	2.1.5	ミューオンスペクトロメーター	32		
2.2	ATL	AS 実験における DAQ システム	39		
	2.2.1	トリガーシステムの全体像	40		
	2.2.2	レベル 1 トリガー	40		
	2.2.3	レベル 2 トリガー	42		
	2.2.4	EventFilter(レベル3トリガー)	43		
第3章	前後	方部レベル 1 ミューオントリガーシステム (TGC システム)	44		
3.1	検出器の構造と配置				
	3.1.1	TGC(Thin Gap Chamber) の基本構造	44		
	3.1.2	TGC の動作原理	48		
	3.1.3	TGC の応答時間	50		
	3.1.4	ATLAS における TGC の配置	51		
3.2	TGC	におけるミューオントリガーのスキーム	56		
3.3	TGC	システムのデータ読出し系	58		

	3.3.1	TGC エレクトロニクスシステムの構成				
	3.3.2	TGC エレクトロニクスの設置				
	3.3.3	モジュールとエレクトロニクスの詳細64				
	3.3.4	TGC エレクトロニクスシステムのコントロール				
第4章	TGC	ジシステムの構築と検査 76				
4.1	TGC	システム構築の歴史76				
	4.1.1	エレクトロニクスの開発と量産76				
	4.1.2	ガスチェンバーの開発と量産78				
	4.1.3	1/12 セクター及びスモールウィールの組立80				
4.2	地上	地上動作試験 8				
	4.2.1	SLB テストパルス試験				
	4.2.2	ASD テストパルス試験				
	4.2.3	宇宙線試験				
	4.2.4	地上動作試験の成果90				
4.3	地下:	実験ホールへのインストール91				
	4.3.1	チェンバーのインストール91				
	4.3.2	エレクトロニクスのインストール				
4.4	地下:	ホールにおける動作試験と試運転				
	4.4.1	タイミングパラメーターの調整94				
	4.4.2	リードアウトライン試験99				
	4.4.3	トリガーライン試験102				
	4.4.4	コントロールライン試験103				
	4.4.5	LHC ファーストビームのデータ103				
第5章	オフ	ラインデータ処理システム 105				
5.1	ATL	AS のデータ保存フォーマット				
	5.1.1	RAW (ByteStream Data)				
	5.1.2	ESD (Event Summary Data)				
	5.1.3	AOD (Analysis Object Data)				
	5.1.4	TAG				
5.2	オフ	ラインシステムのコンピューティングモデル				
	5.2.1	Tier-0				
	5.2.2	Tier-1				
	5.2.3	Tier-2				
	524	オフラインシステムにおける処理の流れ. 114				

5.3	オフラインソフトウェアの概要	. 116
	5.3.1 ソフトウェアのバージョン管理	. 116
5.4	オフラインデコードの流れ	. 117
	5.4.1 RDO (Raw Data Object)	. 118
	5.4.2 PRD (Prepared Raw Data)	. 118
	5.4.3 シミュレーションデータ生成の流れ	. 118
	5.4.4 ミューオンスペクトロメータのデコードの流れ	. 118
5.5	TGC オフラインデコードソフトウェアの概要	. 120
	5.5.1 Cabling Service	. 121
	5.5.2 MuonTGC_CnvTools	. 122
	5.5.3 MuonCommAlgs	. 123
	5.5.4 MuonRDO	. 124
	5.5.5 MuonPrepRawData/MuonTrigCoinData	. 129
5.6	TgcRdoToPrepDataTool の開発	. 132
	5.6.1 要求される役割	. 132
	5.6.2 アルゴリズム	. 132
5.7	RDO→PRD の検証	. 135
	5.7.1 エラーデータに対する耐久性チェック	. 135
	5.7.2 データ変換の正しさの検証	. 135
第6章	TGC の動作検証	144
6.1	リードアウトデータとトリガーデータの位置情報の整合性	
6.2	PRD オブジェクトの階層構造の確認	
6.3	検出効率	
第7章	まとめ及び TGC コミッショニングの今後について	153
付録 A		154
A.1	トリガーセクター番号 $\phi$	. 154
A.2	RDO の変数一覧	. 155
A.3	PRD の変数一覧	. 157
A.4	ROI のナンバリング	. 159
A.5	SLB データフォーマット	. 160
A.6	SSW データフォーマット	. 161
A.7	エレクトロニクス ID の関係	. 162
参考文南	- N	166

# 第1章

# 序論

この章では、素粒子物理学の現状を軽く述べた後、LHC 加速器及びその周上に設置される検出器を用いた実験計画の概要を説明する。次に、私が参加する ATLAS 実験において観測が期待される物理についてまとめ、本論文の主題である ATLAS 検出器のミューオントリガーシステムの重要性を論じる。

## 1.1 素粒子物理学の現状

素粒子標準理論は、物質の構成要素をクォークとレプトンとし、それらの間に働く三種類の相互作用、すなわち強い力、弱い力、電磁気力をゲージ理論という統一的な枠組みで記述する素粒子物理の基礎理論である。20世紀後半の粒子加速器実験の急速な発展により、標準理論の予言するクォークやレプトン、そして相互作用を媒介するゲージボソンの存在が次々に証明され、標準理論は多大な成功をおさめてきた。さらにクォークとレプトンの世代が3つであることと CP 対称性の破れも確認された。CP 対称性の破れから世代が3つ以上であることを予言した小林益川理論の提唱者、小林誠先生と益川敏英先生が、南部陽一郎先生と共に2008年度のノーベル物理学賞を受賞されたことは記憶に新しい。その他にも、超対称性粒子を仮定すると上記の3つの力が高エネルギー領域で同じ強さに統合されることを示唆する結果が得られるなど標準理論を越えた枠組みに関しても研究が進んでいる。図1.1に、標準模型を構成する素粒子とその超対称性粒子を、表1.1にそれらが発見された年と加速器を示す。図1.1の中の暗くなっている粒子は未発見のものである。図1.2はLEPによって示唆された3つの力の大統一の可能性を示す図である。

図 1.1 のとおり、標準理論の予言する粒子の中でヒッグス粒子は唯一未発見となっている。ヒッグス粒子はゲージ対象性の自発的破れから生じる南部・ゴールドストーン・ボソンの一種であり、ヒッグス粒子との相互作用こそが物質の質量の起源であると考えられている。仮にヒッグス粒子がないということになれば標準理論は大幅な修正を余儀なくされるため発見が急がれてきたが、これまでの LEP や Tevatron といった加速器実験や、理論



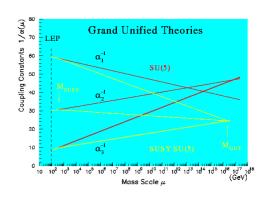


図 1.1 標準理論の素粒子と、その超対称性 粒子 [26]

暗くなっているものは未発見。

図 1.2 3 つの力の大統一の可能性 [26]

理論に超対称性粒子を導入することで 10<sup>16</sup>GeV を超える高エネルギー領域で 3 つの力の強さが同じになる。

表 1.1 近年の加速器実験による素粒子の発見

発見された年	発見された粒子	質量	加速器 (施設)
1969 年	u,d,s クォーク	数 MeV, 数 MeV, ~ 100MeV	SLAC
1974 年	c クォーク	~ 1GeV	SPEAR(SLAC)/BNL
1975 年	au	1.78GeV	SPEAR(SLAC)
1977 年	b クォーク	~4GeV	FNAL
1979 年	グルーオン	0	PETRA(DESY)
1983 年	$\mathrm{W}^{\pm},\mathrm{Z}$	80.4GeV,91.2GeV	SPS(CERN)
1995 年	t クォーク	~ 170GeV	Tevatron(FNAL)
2009 年?	ヒッグス	114GeV 以上	LHC(CERN)?

の面からある程度の質量的制限は得られているものの、未だ発見には至っていない。

そこで 2009 年夏頃からの定常運転が予定される世界最大最高エネルギーの LHC 加速器の登場となる。LHC ではヒッグス粒子の発見が第一の目標となるが、これについては実験の比較的初期の段階で見つかる可能性が高いと考えられている。ヒッグス発見以外にも、上記の超対称性粒子の発見や、余剰次元の探索といった標準理論を超えた物理にも多大な貢献が期待される。

# 1.2 LHC(The Large Hadron Collider) とは

LHC とは、ジュネーヴ郊外のスイスとフランスの境に位置する CERN (欧州原子核研究機構)に建設された大型ハドロン衝突型円形加速器である。CERN では 1989 年から 2000 年まで、大型電子陽電子衝突型加速器 LEP(Large Electron Positron Collider)を用いた実験が行われていたが、LHC は LEP で使用していた地下約 100m、周長 27km のトンネルを再利用している。LHC の衝突点における 2 つの陽子の重心系エネルギーは 14TeV に達し、現時点で世界最高エネルギーの加速器であり、当分の間はこれを超えるエネルギーの加速器の建設は予定されていない。図 1.3 に、LHC の概観を示す。

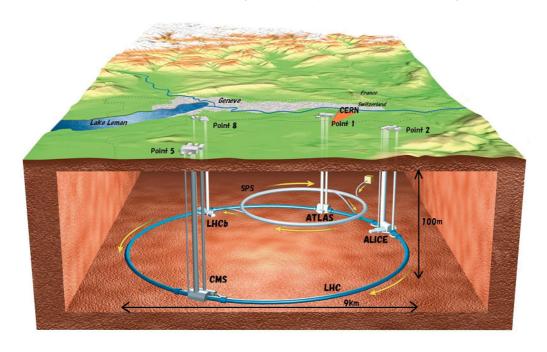


図 1.3 LHC の概観 [24]

地下約 100m、周長約 27km のトンネル内で陽子を加速する。メインリング上には 4 箇所の衝突点があり、 ATLAS、CMS、ALICE、LHCb が設置される。

見ての通り LHC のメインリングには 4 箇所の衝突点があり、それぞれに ATLAS、CMS、ALICE、LHCb と呼ばれる検出器が設置され、各チームが様々な物理現象の観測を目指している。以下では、LHC 加速器の概要及び、LHC で行われる予定の各実験について簡単に述べる。

#### LHC 加速器

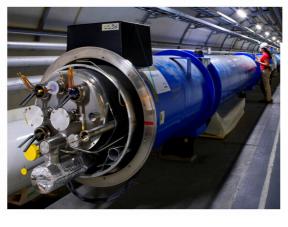
LHC の最大の特徴はもちろん 14TeV という高い重心系衝突エネルギーを実現したことである。粒子を円形加速器で加速する際のシンクロトロン放射によるエネルギーロスは、加速器の曲率半径を  $\rho$  として  $\gamma^4/\rho^2$  に比例する。 $\gamma=E/mc^2$  であるから、結局エネルギーロスは粒子のエネルギー E の 4 乗に比例し、質量 m の 4 乗と曲率半径  $\rho$  の 2 乗に反比例することになる。そこで LHC では 14TeV の高エネルギーを実現するため、曲率半径が大きくなるようにメインリングに周長 27km の巨大な円形空洞を用い、電子と比べて約 1800 倍重い陽子を加速粒子として選んだ。メインリングの半径は約 4300m だが、加速器自体は 8 箇所の直線部と曲線部の組み合わせとなるため、実質的な曲率半径は 2804m である。7TeV の陽子 1 個がメインリングを一周する間に失うエネルギーは

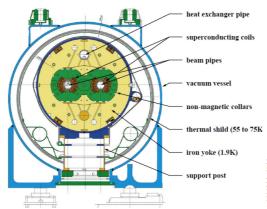
$$U_0 = \frac{2\alpha hc}{3\rho} \left(\frac{E}{m}\right)^4 = \frac{2 \cdot (1/137) \cdot 2\pi \cdot 197[\text{MeV} \cdot \text{fm}]}{3 \cdot 2804[\text{m}]} \left(\frac{7000}{0.938}\right)^4 = 6.7 \text{KeV}$$
 (1.1)

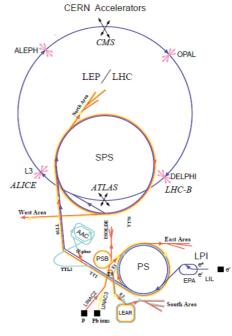
となる。LEPでは電子を 100GeV に加速した際の放射エネルギーは約 3GeV だったが、それと比較して全く問題にならないほど小さいことがわかる。また、高エネルギーの粒子を加速リング内に留めるには強い磁場が必要となるため、LHC では 8.33T の高出力を持つ超伝導双極電磁石を 1232 台も用いている。図 1.4 に超伝導双極電磁石の写真と断面図を、図 1.5 に LHC 加速器の全体像を示す。図 1.5 を見るとわかるように、ソースから出た粒子は LINAC で 50MeV、PSB で 1.4GeV、PS で 25GeV、SPS で 450GeV と段階を踏み、最終的にメインリングで 7TeV まで加速される。また後述の ALICE 実験のために鉛イオンを加速することも可能となっていて、最終加速エネルギーは核子あたり 2.8TeV、衝突エネルギーは約 1 PeV となる。

ところでハドロンである陽子は、レプトンである電子と比べて約 1800 倍も重いという他に、もう 1 つ実験に関わってくる重要な違いを持つ。それはレプトンが内部構造を持たない (少なくとも現在は理論、実験の両面からそう考えられている) 点粒子、すなわち素粒子である一方で、ハドロンは内部構造及び大きさを持ち、素粒子ではないということである。陽子は u,u,d の 3 つのヴァレンスクォークと無数のシークォークやグルーオンからなると考えられており、陽子全体で 7TeV のエネルギーを持つ場合に 4 元運動量が構成粒子にどのように割り振られているかはわからない。その振り分けの割合を表すパラメータを Bjorken の  $x(0 \le x \le 1)$  と呼んでいて、値は各陽子の各構成粒子毎に異なる。大きな値を持つのは概ねヴァレンスクォークであって、それ以外では  $x < 10^{-2}$  程度である。そして陽子同士の衝突とは、実際には構成粒子の一部同士の衝突である。このようなモデルをパートン模型、そして構成粒子のことをパートンという。例えば、図 1.6 に、ZEUS 実験で得られた不変量  $Q^2 = 10 \text{GeV}^2$  の時の陽子のパートンの x の分布を示す。

加速する粒子にハドロンを用いた場合に実際に生じているのはパートン同士の衝突







LEP: Large Electron Positron collider SPS: Super Proton Synchrotron AAC: Antiproton Accumulator Complex ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvi PSB: Proton Synchrotron Booster

LPI: Lep Pre-Injector EPA: Electron Positron Accumulator LIL: Lep Injector Linac LINAC: LINear ACcelerator LEAR: Low Energy Antiproton Ring

図 1.5 LHC 加速器の構成 [24]

図 1.4 LHC 加速器 [15]

上:超伝導双極電磁石の写真

下:断面図

であり、どのパートンが寄与するかはイベント毎に異なり確率的にしかわからない。すると、14TeV の衝突エネルギーで運転し続けていても、低エネルギーから高エネルギーの衝突まで万遍なく生じることになる。例えば陽子 1,2 の持つ運動量が  $p_1,p_2$  で、反応に寄与したパートンが  $x_1,x_2$  を持つ時、実質的な重心系衝突エネルギーは  $\sqrt{x_1p_1x_2p_2}=14\text{TeV}\times\sqrt{x_1x_2}$  となり、 $x_1,x_2$  の組み合わせで如何様にも変化する。また、x の分布を考えれば低エネルギーの割合が大きいことが容易にわかる。一般にハドロン衝突型加速器でレプトン衝突型加速器と同等の粒子発見能力を得るためには 10 倍のエネルギーが必要と言われているが、LHC は 14TeV の重心系エネルギーを実現するので TeV 領域の物理の発見能力を十分に持つ。エネルギーフロンティア実験として未知の粒子や物理現象を発見するという目的を満たすには衝突エネルギーが広く分布することはメリットにもなりうるだろう。しかし裏を返せば、イベントの選別が難しくなり精度が落ちるというデメリットを内包している。特に、グルーオンの関わる低エネルギーの反応の割合が非常に高く、多大なバックグラウンドとなる。よって特定の現象に的を絞った精密測定に関しては、同じエネルギーの衝突を狙って発生させることの出来るレプトン型衝突器が有利と

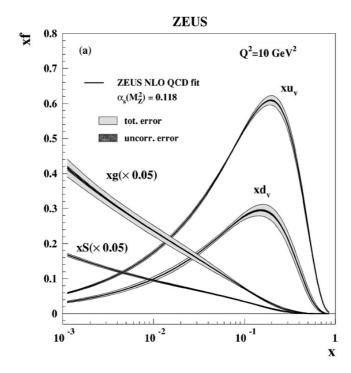


図 1.6 陽子の x の確率分布 (ゼウス実験)[13]

不変量  $Q^2=10{
m GeV}^2$  の陽子に対する x の確率分布。 $u_v,d_v$  はヴァレンスクォーク、S はシークォーク、g はグルーオンを表す。 なお S と g の図は縮小されている  $(\times 0.05)$ 

なる。そこで、LHC で発見された粒子や物理現象の精密測定ができる TeV 領域のレプトン型線形加速器として ILC(建設地未定)、CLIC(CERN) が計画されている。

また、LHC は上記の理由で高いエネルギーのパートン同士の衝突の頻度が小さくなることもあり、イベント数を稼ぐために、初期段階で $L=10^{33}\,\mathrm{cm}^{-2}s^{-1}$ 、後に $L=10^{34}\,\mathrm{cm}^{-2}s^{-1}$  という高いルミノシティーでの運転を予定している。陽子反陽子衝突型である Tevatronでは $L=10^{32}\,\mathrm{cm}^{-2}s^{-1}$  であったが、陽子陽子型とし、衝突を  $40\mathrm{MHz}$  という高頻度で起こすことで Tevatron の約 100 倍という高ルミノシティが可能となった。衝突頻度の高さとバックグラウンドの多さゆえに LHC ではトリガー機能が大変重要である。

最後に LHC の主なパラメーターを表 1.2 に示す。

# ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)

ATLAS 実験は LHC で最も大きな汎用検出器を用いて行われる多目的実験である。長さ 44m、直径 25m の円筒形でトロイダル磁石とソレノイド磁石の両方を持ち、重量は 7000 トンに達する。目指す物理は、ヒッグス粒子の発見、超対称性粒子の発見、余剰次元の探索など多岐にわたる。ATLAS については次章で詳細を述べる。

メインリング長	26.66km	実効曲率半径	2804m
超伝導双極電磁石の磁場	8.44T	電流	11850A
エネルギー (陽子)	7TeV/proton	エネルギー (鉛イオン)	2.8TeV/nucleon
ルミノシティ (ATLAS,CMS)	$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	ルミノシティ (ALICE)	$10^{27} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
ルミノシティ (LHCb)	$10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	ルミノシティ (TOTEM)	$2 \times 10^{29} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
衝突頻度	40.08MHz	バンチ間隔	24.95ns
一周あたりバンチ数	2808 個	バンチあたり陽子数	1.15×10 <sup>11</sup> 個
バンチ長さ	75.5mm	衝突点のバンチ半径	16.7μm
バンチあたり陽子衝突数	23 個	衝突角度	285µrad
エネルギー	362MJ/リング	シンクロトロン放射	3900W/リング

表 1.2 LHC のパラメータ

## CMS (Compact Muon Solenoid)

CMS は ATLAS と同様に多岐にわたる物理現象の観測を目指す多目的実験である。検 出器は長さ 21m、直径 15m の円筒形で、その名の通り ATLAS と比べてコンパクトであるが重量は 12500 トンと ATLAS よりも重い。CMS は超伝導ソレノイド磁石によって発生させる 4T の強磁場を鉄のヨークに閉じ込め、その周囲を検出器で囲むように作られており重量の大部分はこの中心部のヨークによるものである。他の大型検出器と異なり、地上において大部分が組み立てられる設計になっているのも特徴である。

# ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

ALICE 実験では陽子ビームではなく鉛イオンビーム同士を衝突させ、衝突エネルギーは 1PeV に達する。この実験で目指すのは、ビッグバン直後の超高温の初期宇宙における物質の状態 (QGP: クォークグルーオンプラズマ) を再現し、そこから現在の物質の状態に至る過程を観察することである。検出器の大きさは長さ 26m、直径が 16m、重量 10000トンである。

# LHCb (Large Hadron Collider beauty)

LHCb は b クォークの物理に特化した実験である。物質と反物質の性質の違いを詳細に調べ、何故現在の宇宙が物質ばかりに偏っているのか明らかにすることを目的とする。検出器は長さ 21m、高さ 10m、幅 13m、重量 5600 トンで、特徴として衝突点の全方位をカバーせずに前方向に特化していることと、可動式のトラッカーを有する点があげられる。

### LHCf (Large Hadron Collider forward)

LHCf は ATLAS の衝突点の前方約 140m に設置される小さな検出器を用いて行われる実験で、その大きさは長さ 30cm、高さ 80cm、幅 10cm、重量は 40kg である。目的は、高エネルギー領域における宇宙線シャワーの振る舞いを調べ、現在ある理論的なモデルのどれが正しいのかを検証することである。実際の宇宙線による検証では統計量が足りず結論が出ていないが ATLAS の衝突点から出る  $\pi0$  を起点したシャワーを用いることで高エネルギー宇宙線のシミュレーションが可能であると考えらている。

## TOTEM (TOTal Elastic and diffractive cross section Measurement)

TOTEM は CMS の衝突点の近傍のビームパイプを囲うように設置される検出器で、陽子陽子の反応断面積を測り、LHC のルミノシティをモニターすることを目的とする。また汎用検出器では捉えられない、超前方の粒子による物理を探ることも目的である。検出器は CMS の衝突点の前後 440m の間に、複数設置される。

以下に各検出器の全体図や写真をのせる。

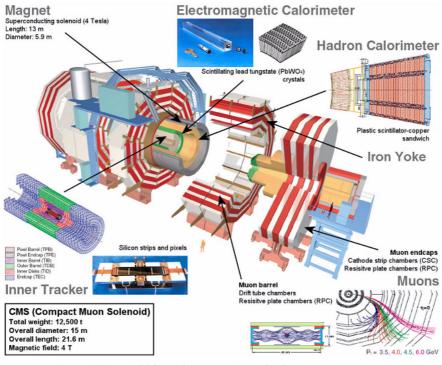


Figure 1-6 The CMS detector with its subdetector systems (artist view).

図 1.7 CMS 検出器の全体図 [9]

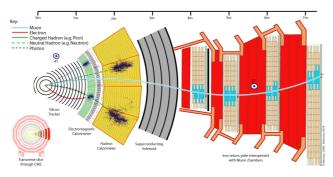


図 1.8 CMS 検出器の断面図 [25]



図 1.9 CMS 検出器の写真 [25]



図 1.10 ALICE 検出器の全体像 [24]

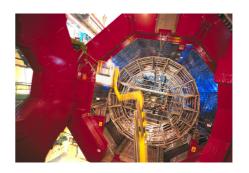


図 1.11 ALICE 検出器の写真 [24]

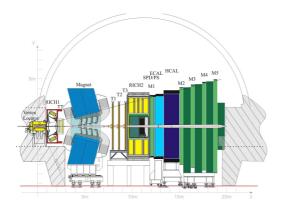


図 1.12 LHCb 検出器の断面図 [24]



図 1.13 LHCb 検出器の写真 [24]

## 1.3 ATLAS 実験の目指す物理

ATLAS 実験の第一目標はヒッグス粒子の探索である。ATLAS 検出器は対象を特定の事象に限定せず、目的にあわせて様々な事象のデータを取得できるように設計されているが、ヒッグス粒子の探索は運転開始後の比較的早い時期に画期的な成果をあげることができると考えられており最優先事項である。この他に、大統一理論に関わる SUSY (超対称性粒子)の探索や、余剰次元の存在の証明となるミニブラックホールの観測等、標準理論を越えた物理に関しても大きな成果が期待される。以下に ATLAS におけるヒッグス探索についてもう少し詳しく説明する。

#### 1.3.1 ヒッグス粒子の探索

ヒッグス粒子の発見は LHC 稼動後、比較的初期段階 (1~3 年程度)に達成されると考えられており、LHC の最初の成果として強く期待されるものである。そこでヒッグス粒子の質量を様々に仮定したケーススタディを行い、LHC による発見シナリオが模索されている。以下でヒッグス粒子の生成過程、崩壊過程、これまでの実験による質量制限、LHC による発見可能性について述べる。

#### 1.3.1.1 ヒッグス粒子の質量制限

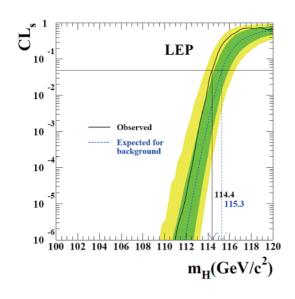
ヒッグス粒子の質量は理論的な制限から 1TeV 以下であると考えられている。また、重心系最大エネルギー 209GeV の電子陽電子コライダー LEP による電弱精密測定の結果から強い制限が得られており、その結果を図 1.14、図 1.15 に示す。図 1.14 は、LEP2 によるヒッグス直接探索の結果 114GeV までのヒッグスの存在が 95% で棄却されたことを示す。図 1.15 の実線及び青帯において  $\Delta\chi^2=2.7$  となる 186GeV が 95% の精度でヒッグスの質量上限となる。黄色の帯は LEP2 によってヒッグスのが存在が棄却された範囲であり、これを加味した場合のヒッグスの 95% 上限は 219GeV となる。

#### 1.3.1.2 LHC におけるヒッグス生成過程

はじめに主なヒッグス粒子生成過程のファインマン図を図 1.16 に、各過程の断面積を図 1.17 に示し、順に説明する。

#### (i) $gg \rightarrow H$ (gluon fusion)

LHC ではグルーオンの寄与が大きいため、最も断面積の大きい過程となる。ヒッグス粒子との結合は質量の大きな粒子ほど強いので、主にトップクォークのループを介してヒッグス粒子が生成される。断面積が大きい反面、ヒッグス粒子が崩壊し



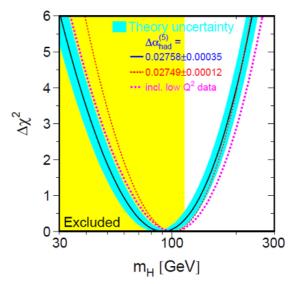


図 1.14 LEP2 によるヒッグス探索 [1]

横軸はヒッグス質量 [GeV]。実線が観測データ。 点線がヒッグスが存在せず、バックグラウンドの みとした場合のシミュレーション。緑帯は  $1\sigma$ 、 黄帯は  $2\sigma$  を表す。95% の信頼度で 114.4GeV までのヒッグスの存在が棄却された。

図 1.15 LEP によるヒッグス質量制限 [1]

横軸がヒッグス質量 [GeV]、縦軸は  $\Delta \chi^2$ 。実線が LEP の全データを統合したヒッグス質量と  $\Delta \chi^2$  の関係。青帯は高次補正を加えた場合の理論的不確かさ。黄色部分は LEP2 による直接探索により 存在が棄却された領域。

てできるもの以外に大きな横運動量を持つ特徴的な粒子を含まないのでイベントの 識別が難しく、バックグラウンドの影響が大きいというデメリットを持つ。ただし ヒッグス粒子が以下の崩壊をした場合はバックグラウンドとの区別可能となるので 断面積の大きさをいかして解析に用いられる。

- $H \rightarrow \gamma \gamma$
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 41$
- $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow l\nu l\nu$
- (ii)  $qq \rightarrow qqH$  (VBF:vector boson fusion)

パートンの中で大きな運動量配分を持つことが期待できるヴァレンスクォークを起源とし、(i) の次に大きな断面積を持つ。また、質量の大きい W、Z ボソンの放出により強い反跳を受けた横運動量の大きなクォークが 2 本のジェットとして観測されるためイベントの識別が比較的容易である。加えてクォーク間のカラー交換が生じないので、その 2 本のジェットよりもラピディティーの大きい領域にはジェットが生じにくく、ヒッグス粒子の崩壊が観測される可能性の高いこの領域においてQCD バックグラウンドの影響が小さい。以上の理由から、LHC におけるヒッグス探索における最有力候補とされている。

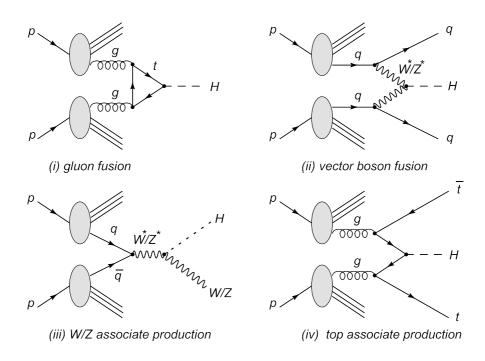


図 1.16 主なヒッグス粒子の生成過程のファインマン図

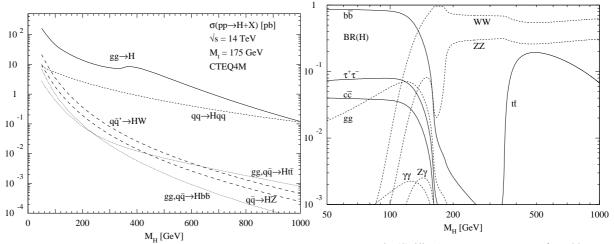


図 1.17 標準模型におけるヒッグス質量  $M_H[GeV]$  と生成断面積  $\sigma[pb]$  の関係 [11]

図 1.18 標準模型におけるヒッグス質量  $M_H[GeV]$  と各崩壊分岐比の関係 (by HDECAY)[11]

#### (iii) $q\overline{q} \rightarrow (W/Z)H$ (W/Z associate production)

上記の過程と比べて断面積が数桁落ちるが、ベクターボソンがレプトンへと崩壊した場合にはレプトンをトリガーとして容易にイベントの識別が可能である。LEPと Tevatoron では、粒子と反粒子の衝突なのでこの過程の断面積が大きく、ヒッグス探索の最有力候補であった。

#### (iv) $q\overline{q}/gg \rightarrow t\overline{t}H$ (top associate fusion)

対生成されたトップクォークからヒッグス粒子が生成される過程。断面積は小さいものの、横運動量の大きいトップクォークが2つ含まれるためイベントの識別は容易である。この過程の断面積はヒッグス粒子とトップクォークの湯川結合の強さの二乗に比例するという特徴を持ち、断面積の測定が直接結合定数の情報につながるのが最大の魅力である。

#### 1.3.1.3 ヒッグス粒子の崩壊過程

図 1.18 にヒッグス粒子の崩壊分岐比を示す。図のように崩壊分岐比はヒッグス粒子の質量によって大きく変化し、代表的な崩壊過程が異なる。以下で各質量領域で有望な崩壊過程について説明する。

#### (a) $H \rightarrow b\overline{b}$ (M<sub>H</sub> < 150GeV)

ヒッグス質量が W ボソンの質量の 2 倍以下の領域では b クォーク対への崩壊が支配的となるため、低質量ヒッグスの場合の主力チャンネルである。しかしこの崩壊によって現れる b クォークジェット対は QCD バックグラウンドの膨大な 2 ジェットイベントとの区別がつかない。そこでこの崩壊過程は W/Z ボソン、t クォーク対といった特徴的な粒子を伴う (iii)、(iv) の生成過程に対してのみ用いられる。生成過程に伴う W、Z、t が崩壊してできる高  $p_T$  レプトンをトリガーとしてデータを記録することになるが、生成断面積の小ささが崩壊分岐比の大きさとトレードオフし、トータルのイベントレートは並である。b クォーク対による 2 ジェットの不変質量を組むことによりヒッグスのピークが現れるが、カロリメータによる高精度のエネルギー、角度測定が不可欠である。

#### (b) H $\rightarrow \gamma \gamma$ (100GeV < M<sub>H</sub> < 150GeV)

 $100 \, \mathrm{GeV} \sim 150 \, \mathrm{GeV}$  の特定領域でのみそこそこの分岐比を持つが、この領域はヒッグスの存在する可能性が高いと考えられているので有望視されている。生成断面積が非常に大きいものの QCD バックグラウンドによる  $2\mathrm{photon}$  イベントの影響も大きい生成過程 (i) と、生成断面積は小さいが高  $p_T$  レプトンによるバックグラウンドとの区別が容易な (iii)、(iv) の両方でスタディが進められている。電磁カロリメータで高い精度で 2 つの  $\gamma$  のエネルギーと角度を測定出来れば、不変質量を組むことでヒッグスの鋭いピークが現れる。

- (c) H  $\to \tau \tau$  (110GeV < M<sub>H</sub> < 150GeV)
- (ii) の VBF 生成過程との組み合わせで  $110 {\rm GeV} \sim 130 {\rm GeV}$  のヒッグスに対して有望視されているチャンネルである。 $\tau\tau \to lv\overline{\nu}lv\overline{\nu}$ 、または $\tau\tau \to lv\overline{\nu}hv$  のようにどちらかの  $\tau$  がレプトン崩壊を起こした場合にこのレプトンをトリガーとしてデータを取得することになる。前者の分岐が 12% 程度、後者が 36% あり、さらにどちらの場合もニュートリノが終状態に含まれるため  $E_T^{miss}$  の精密な測定が必要である。電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータともに高い性能が要求される。主要なバックグラウンドは  $Z \to \tau\tau$  のドレル・ヤン過程であり、これは Z の質量  $91 {\rm GeV}$  付近にピークを作るためこのピークと区別できるだけの質量分解能として  $9 {\rm GeV}$  以下が要求される。

#### (d) $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 41 \ (120 GeV < M_H < 180 GeV)$

生成断面積の大きい (i) のグルーオンフュージョンとの組み合わせにより、 $120 {
m GeV}$  ~  $150 {
m GeV}$  で有効とされるチャンネルである。終状態に複数のレプトンを含むためトリガーは容易であり、レプトンの再構成により  ${
m Z}$  の質量ピークが現れるという特徴も選別を容易にする。ただし  ${
m m_Z} \approx 180 {
m GeV}$  以下では  ${
m Z}$  の片方は仮想粒子となるため、 ${
m Z}$  のピークが得られるのは  ${
m 4}$  つのうち  ${
m 2}$  つの組み合わせのみである。

#### (e) H $\to$ WW\* $\to lvlv \ (150 \text{GeV} < M_H < 180 \text{GeV})$

 $170 {
m GeV}$  の近辺では上記の  ${
m H} o ZZ^*$  に代わって  ${
m W}$  ボソンへの崩壊が支配的となる。しかしこの過程は直接ヒッグスの質量を再構成できない。過剰イベントとして観測され、外挿により質量を求めることになる。

(f) H  $\to$  ZZ  $\to$  4l (180GeV < M<sub>H</sub> < 600GeV)

比較的重いヒッグスの場合に主力となるチャンネルで、4つのレプトンから2つのZを再構成できるという条件によりバックグラウンドを効率的に落とすことが可能である。十分なルミノシティがあれば800GeV 付近までは主力となりうるが、LHC の数年分のルミノシティでは600GeV 以上は統計数が不足してしまう。また、ヒッグスの質量が高まるにつれ崩壊幅が急速に高まり、特に300GeV 以上では検出器の分解能よりも崩壊幅が大きくなってしまい、質量分解能が低下していく。終状態のレプトンは高 $p_T$ を持つため測定は容易で、発見能力は検出器の性能よりもルミノシティに強く依存するチャンネルである。

(g)  $H \rightarrow ZZ \rightarrow lvlv \ (500 GeV < M_H < 700 GeV)$ 

この領域では、この過程の方が  $H \to ZZ \to 4l$  よりも分岐比が約 6 倍も高く VBF 生成過程のうち  $25\% \sim 30\%$  を占める。 $Z \to ll$  による 2 つの高  $p_T$  レプトンと、

 $H \rightarrow vv$  による大きな  $E_T^{miss}$  が特徴である。

#### (h) H $\rightarrow$ W<sup>+</sup>W<sup>-</sup> $\rightarrow$ l $\nu$ ij (600GeV < M<sub>H</sub>)

高質量領域ではイベントレートの関係からどうしても断面積及び分岐比の大きい過程を使わざるをえない。この過程は非常に分岐比が大きいのが特徴で、 $H \to ZZ \to 4l$  の実に 150 倍である。一方で 4 レプトン過程と比較するとニュートリノやジェットを含むため信頼性は落ちる。バックグラウンドの効率的な除去のために VBF 過程とあわせて用いる。また、分岐比は  $H \to ZZ \to 4l$  の 25 倍と劣るものの、 $H \to ZZ \to lvjj$  は  $t\bar{t}$  バックグラウンドの影響を受けないという特徴があり、 $H \to W^+W^- \to lvjj$  の結果を補足する役割を期待されている。

#### 1.3.1.4 ATLAS 実験のヒッグス粒子の発見能力

理論及び実験的制限からヒッグス粒子は  $114 \text{GeV} \sim 1 \text{TeV}$  までの間にほぼ確実に存在すると考えられているが、上で述べた様々なチャンネルを通して、LHC 及び ATLAS はヒッグスの存在しうる全領域にわたって十分な発見能力を確保している。図 1.19 は LHC と Tevatoron のイベント生成能力を示したもので、左側の点線が Tevatoron、右側が LHC である。150 GeV ヒッグス、500 GeV ヒッグス共に生成断面積が飛躍的に向上しているのが見て取れる。図 1.20、1.21、1.22 に示したのは、LHC で積分ルミノシティ  $100 fb^{-1}$ 、 $10 fb^{-1}$ 、 $30 fb^{-1}$  のデータが溜まった時点での各チャンネルを通したヒッグス粒子発見能力である。縦軸は、シグナルのイベント数を S、バックグラウンドのイベント数を S として、 $S/\sqrt{B}$  である。この値が S 以上であればほぼ確実に発見できると言え、 $S/\sqrt{B}$  であることを示している。

#### 1.3.2 ミューオントリガーの重要性

ヒッグス探索において、興味のある過程の終状態の多くがレプトンを含むことがわかった。また、超対称性粒子の探索においても同様であることがわかっている。よって QCD バックグラウンドとシグナルイベントを区別する際には、レプトンを利用したトリガーは 大変有効に働く。特に、高  $p_T$  ミューオンをトリガーとして利用することで、バックグラウンドイベントを効率的に落とすことが可能なためミューオントリガーは重要である。図 1.23 に示したのは、各粒子がミューオンに崩壊する場合の断面積とミューオンの  $p_T$  の関係である。バックグラウンドに多い c,d,s クォーク等は高  $p_T$  になればなるほど崩壊しにくくなるのに対して、シグナルイベントに多い w,z ボソンの崩壊断面積はミューオンの  $p_T$  にあまりよらないことがわかる。図 1.24 はバックグラウンドから発生するミューオン



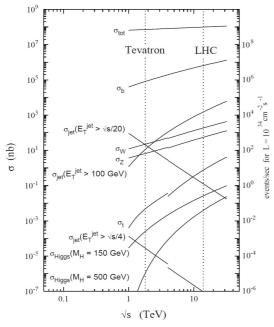


図 1.19 LHC のイベント生成能力 [8]

縦軸が断面積 [nb]、横軸が重心系 衝突エネルギー  $\sqrt{S}[TeV]$ 。 左の点線 (2TeV) 付近が Tevatron、 右の点線 (14TeV) 付近が LHC を表す。 150GeV ヒッグス、500GeV ヒッグス

共に数桁の向上が見込める。

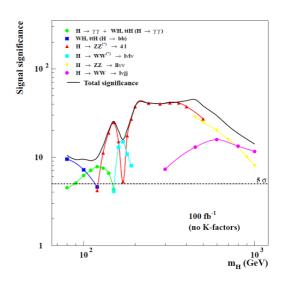


図 1.20 積分ルミノシティ 100fb<sup>-1</sup> における LHC のヒッグス発見能力 [3]

縦軸が  $S/\sqrt{B}$ 、横軸がヒッグス質量。  $100 {
m fb}^{-1}$  は、アップグレードがない 場合 10 年分のデータ量に相当する。 どの領域でも複数チャンネルで

5σ 以上の発見能力を有する。

の  $p_T$  分布で、ほとんどが 1.5GeV 以下の低  $p_T$  ミューオンであることがわかる。よって、高  $p_T$  のミューオンを要請することでシグナルに対してバックグラウンドを大幅に減らすことが可能なのである。

ATLAS では電磁カロリメータによる電子トリガー、ミューオンスペクトロメータ (TGC、RPC) によるミューオントリガーを実装している。また、電磁カロリメータはフォトンによるトリガーの役割も果たす。

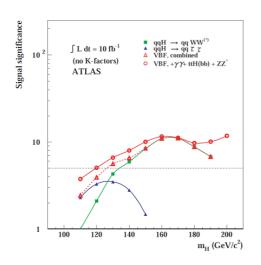


図 1.21 積分ルミノシティ  $10 {
m fb}^{-1}$  における ATLAS のヒッグス発見能力 [3]

縦軸が  $S/\sqrt{B}$ 、横軸がヒッグス質量。  $10 {
m fb}^{-1}$  は、アップグレードがない場合 1 年分のデータ量に相当する。

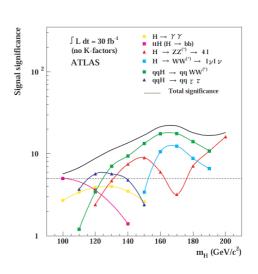


図 1.22 積分ルミノシティ 30fb<sup>-1</sup> における ATLAS のヒッグス発見能力 [3]

縦軸が  $S/\sqrt{B}$ 、横軸がヒッグス質量。  $30 {\rm fb}^{-1}$  は、アップグレードがない 場合 3 年分のデータ量に相当する。

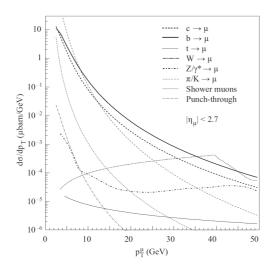


図 1.23 各粒子のミューオン崩壊の断面積 と崩壊後のミューオンの  $p_T[GeV]$  の関係。 [18]

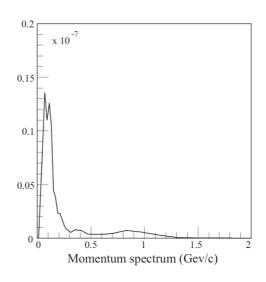


図 1.24 バックグラウンドイベントから発生するミューオンの  $p_T[\text{GeV}]$  分布 [18]

# 第2章

# ATLAS 検出器について

ATLAS 実験は未知のエネルギー領域における新粒子や新物理現象の探索を主目的とする汎用実験である。LHC を用いて行われる実験の中で、規模、検出器の大きさ共に最大であり 35 カ国以上、150 以上の大学や研究施設から 2000 人を超える研究者が参加している。この章では ATLAS を構成する各検出器と、トリガー機能について述べる。

# 2.1 ATLAS 検出器の構成

# 2.1.1 ATLAS 検出器の全体像

ATLAS 検出器の大きさは長さ 44m、直径 25m の円筒形で、総重量は 7,000 トンに達する。全体像を図 2.1 に示す。ATLAS を構成する検出器は大まかに内部飛跡検出器、カロリメータ、ミューオンスペクトロメータと分類でき、衝突点から見て概ねこの順番に並んでいる。またソレノイド磁場とトロイダル磁場を両方備えている。

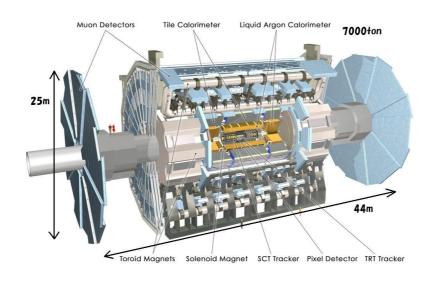
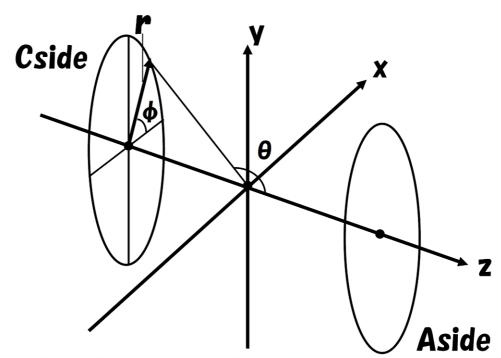


図 2.1 ATLAS 検出器の全体像 [24]

#### 2.1.1.1 ATLAS で用いる座標系

ATLAS でよく用いられる座標系としては、衝突点を原点としたデカルト座標系 (x,y,z) と円筒座標系  $(r,\phi,z)$  がある。図 2.3、図 2.2 に座標系を視覚的に示した。z 軸がビーム軸とほぼ一致し、x が LHC メインリングの内側を向くように、y が天頂方向を向くようにとる。z が正側を A サイド、負側を C サイドと言う。また、r のかわりに  $\eta=-\log(\tan(\frac{\theta}{2}))$  で定義される擬ラピディティを用いることが多い。 $\eta$  を用いる利点は単位  $\eta$  あたりの衝突点由来の飛来粒子の頻度が、広い範囲にわたって  $\eta$  の値に寄らず一様になることである。 $|\eta| \le 1$  にあたる円筒の筒にあたる領域をバレル部、 $|\eta| > 1$  の蓋にあたる領域をエンドキャップ部と呼んでいる。さらに図 2.4 に示したように、エンドキャップ部のうち特にビーム軸に近い  $|\eta| > 1.9$  の部分をフォーワード、残りの  $1 < |\eta| \le 1.9$  の部分をエンドキャップと区別する場合があるため、混同を避けるために本論文では以後  $|\eta| > 1$  にあたる広義のエンドキャップのことを前後方部と表記することにする。本論文の題名の表記もこれに拠っている。また座標系についても以後、上記のものを断らずに用いる。



Pseudorapidity:  $\eta = -\log\{\tan(\theta/2)\}\$  $0 \le \theta \le \pi$ ,  $0 \le \phi < 2\pi$ ,  $-\infty < \eta < \infty$ 

図 2.2 ATLAS 検出器の座標系 [24]

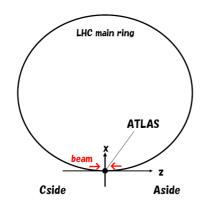


図 2.3 ATLAS 検出器の座標系 2

LHC メインリングを真上から見た図。z 軸はビームパ イプとほぼ一致する。

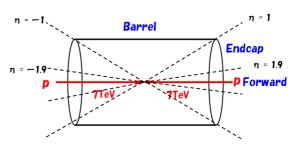


図 2.4 バレル、エンドキャップ、フォワー ドの区別

本論文では図中の Endcap と Forward をあわせて前後 方部と呼ぶ。

#### 2.1.1.2 ATLAS の設計思想

LHC の非常に高いルミノシティにおいて、様々な物理解析に使える汎用性のあるデータを漏らさず取得するために ATLAS は以下のようなコンセプトの基に設計されている。

- フォトン、電子、ミューオン、ジェット、 $E_T^{miss}$  (消失横方向エネルギー)などの情報をそれぞれ高精度で測定可能
- 衝突点まわりの全方向をできるだけカバーする
- LHC の 40.08MHz という高頻度のイベントによる情報を漏らさずに記録できる
- 多大な放射線に耐え、10年以上安定稼動できる

電子とフォトンの位置とエネルギーは電磁カロリメータによって、ジェットの位置とエネルギーはハドロンカロリメータによって精度良く測定される。また、これらのカロリメータは方位角  $\phi$  の全方位と、出来うる限りの  $\eta$  をカバーしている。ミューオンに関してはミューオンスペクトロメータ単体での軌道と運動量の測定が可能となっており、これは後述のトリガーを効率よく行うためである。またトロイダル磁場の採用によって、広い $\eta$  をカバーし低  $p_T$  (横運動量)のミューオンも測定できるようにした。衝突点まわりの出来る限りの広い方向で各粒子を精密測定することで結果的に  $E_T^{miss}$  が精度良くわかることになる。広範囲の全粒子情報をカバーした結果、高いルミノシティーと相まって ATLASで生じうる情報量は~数十 TBytes/s にも達するが、現在の技術的限界から 300MBytes/s 程度までしか記録することができない。そこで 40.08MHz という高頻度と同期して、かつ出来るだけ漏れなく必要な情報を選別可能なトリガー機能が必須となる。ATLAS では3 段階のトリガーを用いてこれを実現する。放射線耐性に関しては設置場所に基づいて放

射線強度を見積もり、必要なだけの耐性が得られる検出器やエレクトロニクスを用いている。

以下では上記のコンセプトを実現する ATLAS の各検出器について概要を述べる。トリガー機能の詳細については次節で述べる。

#### 2.1.2 マグネットシステム

ATLAS では、磁場による粒子の軌跡の曲がり具合から粒子の運動量を求めるために磁場がかけられている。そのためのマグネットシステムは 3 種の超伝導磁石からなる。ビーム軸に沿った磁場を発生させるソレノイド磁石と、 $\phi$  方向の磁場を発生させるバレル部及び前後方部の空芯トロイド磁石である。トロイド磁石の存在により  $\eta$  が大きい領域でも粒子が十分な距離、磁場中を通過するように設計されている。図 2.5、図 2.6 に各磁石の配置を示した。以下それぞれの概要を述べる。

#### 2.1.2.1 超伝導ソレノイド磁石

コイルは内部飛跡検出器とバレル部電磁カロリメータの間に設置され、ビーム軸に沿った 2T の磁束密度を内部飛跡検出器に提供する。コイル部分は z 方向の長さ 5.3m、直径 2.4m、径方向の厚さ 45mm という非常に薄い筒の形をしている。この薄さは電磁カロリメータの内側の物質量を最低限にしてカロリメータの分解能を損なわないようにするというコンセプトの基に

- バレル部電磁カロリメータとクライオスタットを共用する。
- 専用に開発した高強度アルミ安定化 NbTi 超伝導ケーブルをコイルに用いて一層巻きでも強い磁場が得られるようにした。
- クエンチの伝播を速くするためにクライオスタット内壁とソレノイドの間に厚さ 2mm 純アルミ板を使用した。

といった工夫を重ねることで実現した。図 2.7 に写真を示す。

#### 2.1.2.2 バレル部超伝導トロイド磁石

トロイド磁石はバレル部と前後方部にわかれていて、2 つあわせて  $0 \le |\eta| \le 2.7$  の領域をカバーするトロイダル磁場を発生させる。図 2.5 の通り、バレル部はハドロンカロリメータ及び前後方部トロイド磁石を囲うように  $\phi$  に対する 8 回対称で設置される。8 個のコイルがそれぞれ独立した真空容器に入っており、全体の大きさは長さ 25.3m、内径 9.4m、外径 20.1m にもなる。なお発生する磁束密度平均で 0.5T である。図 2.8 に ATLAS 実験ホール内に設置されたバレルトロイドの写真を示す。

#### 2.1.2.3 前後方部超伝導トロイド磁石

前後方部トロイド磁石は、A サイド、C サイドのそれぞれで、最内側にある前後方部ミューオンスペクトロメータの外側に設置される。図 2.5 の通りコイルはバレル部と同じく 8 回対称で、1 つのクライオスタットの中に 8 コイルが全て収まる。大きさは長さが 5.0m、内径 1.65m、外径 10.7m、磁束密度の平均は 1.0T である。図 2.9 に写真を示す。エンドキャップ部のコイルの外径側はバレル部のコイルの内径側と入れ子になるよう交互に配置されているが、これは境界部の磁場をなるべく均一にするためである。理想的にはトロイダル磁場は  $\phi$  方向成分のみを持つべきであるが、図 2.10 及び、図 2.11 に示す通り境界部の磁場は複雑で r 方向成分も相当あることがわかる。また、境界部以外でも強度は低いものの r 方向成分の発生が避けられない。このため、ミューオンは  $\phi$  方向にもわずかながら曲げられることになり、ATLAS のミューオンスペクトロメータでは  $\phi$  方向の曲がりも測定できるように設計されている。

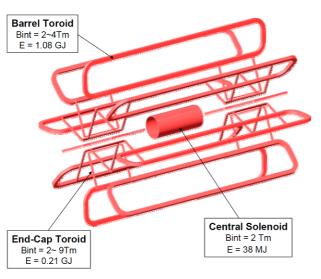


図 2.5 ATLAS 検出器のマグネットのイ メージ図 [4]

8 回対称のトロイドコイルがバレル部及び両サイドの前後方部にあるのがわかる。中心の円筒はソレノイド磁石である。

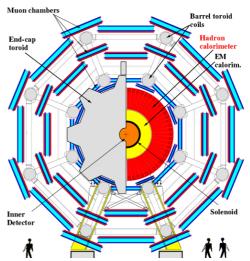


図 2.6 マグネットと検出器の配置を xy 平面で見た図 [9]



図 2.7 超伝導ソレノイド 磁石 [24]



バレル部超伝導トロイド磁 図 2.8 石 [24]



図 2.9 前後方部超伝導ト ロイド磁石 [4]

オレンジのテープが張られたものがトロイド クライオスタットに入ったコール 磁石で8回対称になっているのがわかる。

ドマスの様子。8回対称のコイル と構造体が見える。

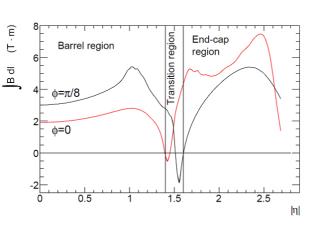


図 2.10 トロイド積分磁場強度 ∫ Bdl[Tm] と  $\eta$  の関係 (at  $\phi = 0, \phi = \pi/8$ )[4]

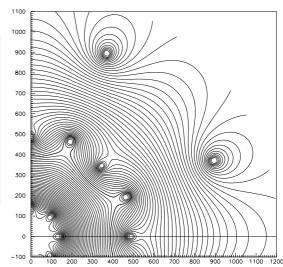


図 2.11 xy 平面における磁場の形 (z=10.5m)[7]

積分範囲は最内のミューオンスペクトロメーターから最 外のものまで。バレルと前後方部の境界では非常に複雑 でマイナスになる領域もある。

横軸 x[cm]、縦軸 y[cm]、磁力線の 1 本が 0.1Tm に相 当する。バレル部とエンドキャップ部それぞれのコイル が見てとれる。

#### 2.1.3 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は超伝導ソレノイドの内側の領域に設置され、ピクセル型半導体検出器 (Pixel)、シリコンストリップ検出器 (SCT)、遷移輻射飛跡検出器 (TRT) の 3 種からなる。  $\phi$  方向全て、及び  $\eta$  < 2.5 の領域をカバーしている。図 2.12 に内部飛跡検出器の全体像を示す。内部飛跡検出器の主な役割は荷電粒子の軌跡を再構成し、磁場中での曲がり具合を知ることで粒子の  $p_T$  や電荷を測定することである。以下で順に概要を説明する。

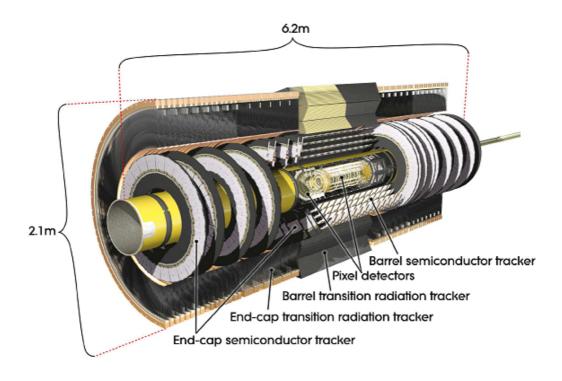


図 2.12 内部飛跡検出器の全体像 [4]

#### 2.1.3.1 Pixel

Pixel は  $r \le 10$ cm の衝突点から最も近い領域に設置される検出器である。 $50\mu$ m ×  $400\mu$ m または  $50\mu$ m ×  $600\mu$ m を 1 ピクセルとし、1 つのモジュールは 47268 ピクセルからなる。最内部に位置するので、高イベントレートに対応するため 2 次元読出しを実装し 1 ピクセル毎に読出しをする。バレル部が 3 層、前後方部が両サイド 3 層ずつで構成され、トータル 8000 万ピクセルで 1.8m $^2$  の領域をカバーする。その特徴は  $r\phi$  方向で  $10\mu$ m、z 方向で  $115\mu$ m という高い位置分解能である。図 2.13 に全体像を、図 2.14 にモジュールの写真を示す。



図 2.13 ピクセル型半導体検出器の全体像 [24]

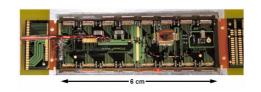


図 2.14 ピクセルモジュールの写真 [9]

6.4cm×2.1cm の大きさの 1 つのモジュールは 47268 ピクセルからなる。各ピクセル毎に読出しを持つ。

#### 2.1.3.2 SCT (Semi Conductor Tracker)

Pixel 同様に多数のシリコン検出器の集合体からなり、位置分解能は  $r\phi$  方向で  $17\mu$ m、z 方向で  $580\mu$ m である。1 つの SCT モジュールは  $6\sim7$ cm 角の長方形シリコンウェハー 2 枚からなり、それぞれのウェハーには  $80\mu$ m 幅の読み出し用アルミニウムストリップが敷き詰められており、1 枚あたりに 768 本のストリップがある。1 つのモジュール内で 2 枚のウェハーは  $40\mu$ rad だけ角度をずらして貼り合わされるので 1 本のストリップは他方の 30 本のストリップと交わることとなり、2 次元位置情報を得ることが可能となっている。バレル部ではモジュールを円筒の筒面上に並べたものを 4 層、前後方部では円盤状に並べたものを両サイドに 9 層ずつ配置している。なお、ストリップはバレル部ではビーム軸と平行に、前後方部では径方向になるようにモジュールが配置されている。トータル 4088 モジュール、600 万の読出しストリップで  $61m^2$  の領域をカバーする。それぞれの写真とイメージを図 2.15、2.16、2.17、2.18 に、モジュールの写真を図 2.19、2.20 に示した。

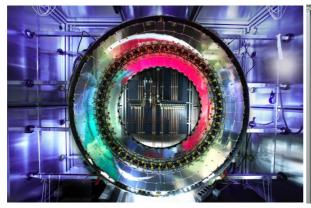


図 2.15 SCT 前後方部の写真 [29]

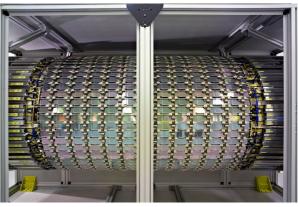


図 2.16 SCT バレル部の写真 [29]

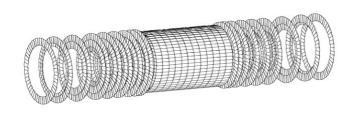


図 2.17 SCT 前後方部の構成 [29]

両サイド 9 層ずつの円盤からなる。

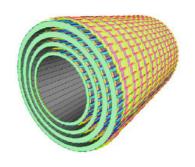


図 2.18 SCT バレル部の構成 [19]

4層の円筒からなる。

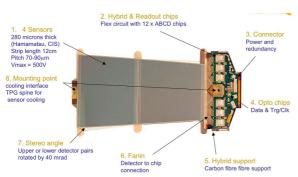


図 2.19 SCT 前後方部用のモジュールの写真 [29]

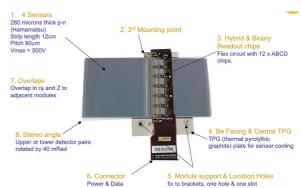


図 2.20 SCT バレル部用のモジュールの写 真 [29]

#### 2.1.3.3 TRT (Transition Radiation Tracker)

SCT よりさらに外の領域のトラッキングには TRT が用いられる。理由の1つにはシリコンストリップ検出器で広い面積をカバーすることはコストの面から現実的でないということがある。TRT はストローチューブ検出器を重ね、その隙間をポリプロピレンファイバーで埋めた構成になっている。ポリプロピレンは遷移放射物質としての役割を持ち、荷電粒子が通過すると繊維表面に生じた誘起電位で粒子が減速され、遷移輻射により X 線が放出される。ストローチューブは直径 4mm、長さ  $40 \sim 150$ cm の筒の中に  $30 \mu$ m の金メッキタングステンワイヤーを貼り、Xe 70%,  $CO_2$  27%,  $O_2$  3% の混合ガスを封入した構造になっており、優れた X 線検出器となる。バレル部ではビーム軸に平行なストローチューブ 52544 本を 73 層に、エンドキャップ部では径方向に平行な 122880 本を 160 層に並べており、それが両サイドに設置される。それぞれ z 方向、r 方向の位置情報は得られず 2 次元位置情報となる。位置分解能は  $130 \mu$ m と、Pixel や SCT と比べると低くなるが、多層構造によりトラックキングに用いる点が平均して 35 点得られるため精度良く軌跡を求めることができる。また、TRT の信号はその大きさによって、高閾値ヒット (5keV 以上) と低閾値ヒット (0.2keV  $\sim 5$ keV) に分けられている。電子はミューオンやタウと比

べて軽いので遷移輻射がおきやすく、高閾値ヒットが相対的に多くなるため、これは電子の同定に用いられる。図 2.21、図 2.22 に写真をのせる。

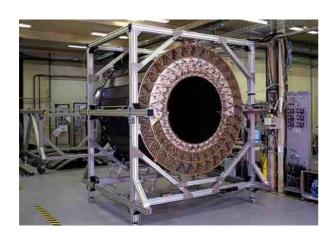






図 2.22 TRT の前後方部の写真 [9]

#### 2.1.4 カロリメーター

カロリメータの役割は電子や  $\gamma$  線、ジェットなどのエネルギー、角度の測定である。 ATLAS では、電子と  $\gamma$  の情報を得るための電磁 (EM) カロリメータと、ジェット情報を得るためのハドロンカロリメータに大別される。図 2.23 にカロリメータの全体像を示す。以下でそれぞれについて説明する。

#### 2.1.4.1 電磁カロリメータ

電磁カロリメータの役割は電子や  $\gamma$  のエネルギー、角度の測定である。ATLAS では、鉛の吸収体と放射線耐性に優れる LAr(液体アルゴン) から成るサンプリングカロリメータを用いている。アコーディオン構造をしているのが特徴で、 $\phi$  方向の不感領域を無くすと共に、読出しをシリアルにすることで速度を高め、LHC の高頻度衝突に対応できるようにしている。  $|\eta|<1.5$  を担当するバレル部と、 $1.4<|\eta|<3.2$  を担当する前後方部にわかれているが、構造は基本的に共通である。読出しチャンネル数はバレル部で約 10 万チャンネル、前後方部で 7 万チャンネルにも達する。アコーディオン構造の写真を図 2.24 に、シミュレーションによるイメージ図を図 2.25 に示す。

電磁カロリメータは 3 層に分割して別個に電圧をかけられるようになっており、それぞれに役割を持たせている。 3 層構造のイメージ図を 2.28 に、各層の放射距離の  $\eta$  分布を図 2.29 にを示した。それぞれの特徴は

Front(Layer1)  $\eta$  方向の超精密測定により、 $\pi_0 \to \gamma \gamma$  による  $\gamma$  の同定が可能。 Middle(Layer2)  $\eta$ ,  $\phi$  ともに精密測定が可能。主にシャワーの測定を担う。

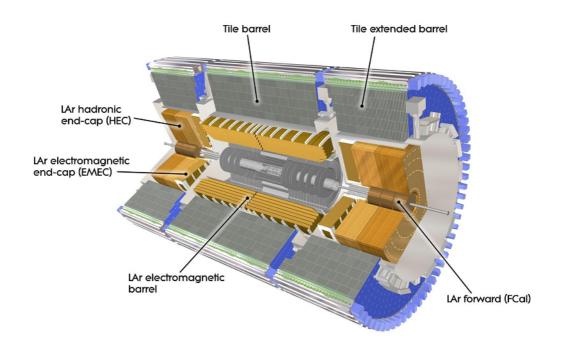


図 2.23 カロリメータの全体像 [24]

Back(Layer3) ハドロンシャワーと電磁シャワーの区別を行う。

のようになっている。層毎の位置分解能も図 2.28 に示した。時間分解能は 100ps 程度で、全体でのエネルギー分解能は電子のエネルギーを E[GeV] として

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{10.1 \pm 0.4\%}{\sqrt{E[\text{GeV}]}} \oplus (0.2 \pm 0.1)\% \tag{2.1}$$

と表される。第 1 項は信号の電子の数 N の統計的揺らぎによるサンプリング項、第 2 項はキャリブレーション精度や温度の揺らぎによる定数項である。E=100GeV の場合には約 1% の分解能で測定可能である。

Layer1 の前に厚さ 11mm、 $\Delta \eta \times \Delta \phi = 0.025 \times 0.1$  のグラニュラリティを持つプリサンプラーが設置されている。プリサンプラーには電磁カロリメータと同様に液体アルゴンが用いられていて、エネルギーの一部をサンプリングしカロリメータの手前でのエネルギー損失による測定値のずれを修正することでエネルギー分解能の向上に役立つ。

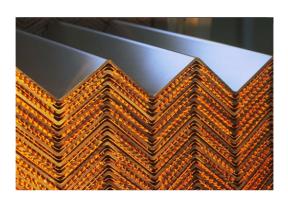


図 2.24 電磁カロリメータのアコーディオ ン構造 [9]

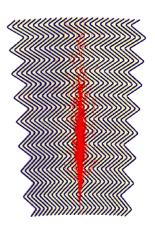


図 2.25 電磁カロリメータを粒子が通過した際のシミュレーション [9]



図 2.26 バレル部 LAr 電磁カロリメータ [9]

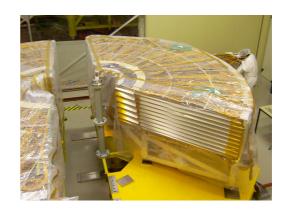


図 2.27 前後方部 LAr 電磁カロリメータ [24]

#### 2.1.4.2 ハドロンカロリメータ

ハドロンカロリメータはジェットの測定を目的としていて、 $|\eta| < 1.7$  のバレル部と  $1.5 < |\eta| < 3.2$  のエンドキャップ部で構造が異なり、それぞれ Tile、HEC と呼ばれる。

Tile: バレル部 Tile ハドロンカロリメータ

バレル部では、吸収体となる鉄板とタイル型シンチレータを交互に重ね合わせた構造のカロリメータを用いる。鉄板とシンチレータの体積比はおよそ 4.7:1 である。図 2.30 に構造を示す。グラニュラリティーは  $\Delta\phi \times \Delta\eta = 0.1 \times 0.1 \times 0.2$ 、エネルギー分解能は

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{56.4 \pm 0.4\%}{\sqrt{E[GeV]}} \oplus (5.5 \pm 0.1)\%$$
 (2.2)

で表される。図 2.31 に一部の写真をのせる。

HEC:エンドキャップ部 LAr ハドロンカロリメータ

エンドキャップ部は放射線強度が高いため、電磁カロリメータと同じく LAr を用いた

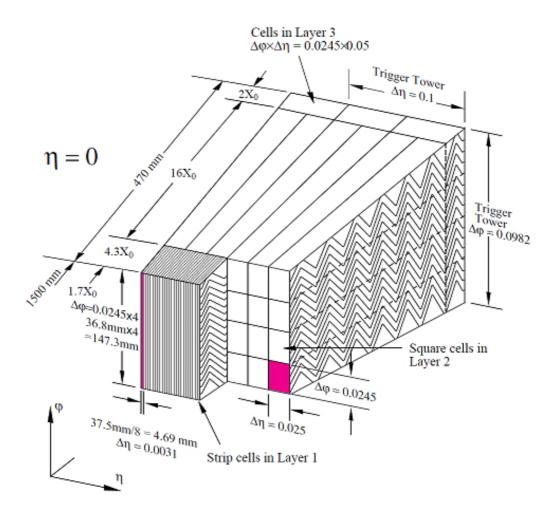


図 2.28 バレル部 LAr 電磁カロリメータの 3 層構造  $(\eta = 0$  部分)[4]

サンプリングカロリメータである。吸収体は銅を使っている。エネルギー分解能は

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{70.6 \pm 1.5\%}{\sqrt{E[GeV]}} \oplus (5.8 \pm 0.2)\%$$
 (2.3)

である。図 2.32 に構造を、図 2.33 に写真をのせる。

#### 2.1.4.3 FCal: フォワードカロリメータ

 $3.1 < |\eta| < 4.9$  をカバーするフォワード部では、最も高い放射線強度に対応するため特殊な構造のカロリメータを用いている。フォワード部は 3 層のカロリメータとシールドプラグからなっており、Layer1 が電磁カロリメータ、Layer2,3 がハドロンカロリメータである。シールドプラグは銅の合金製で Layer3 の後ろに設置され、後方のミューオンスペクトロメータにおけるバックグラウンドを減らす役割を持つ。図 2.34 に配置を示す。

カロリメータは、銅板にあけた穴に同軸の銅製チューブとロッド (棒) を通した構造になっている。ロッドの周りには高放射線耐性のプラスチックファイバーが巻かれておりチューブとの間には 300μm 隙間があくようになっていて、この隙間を LAr で満たす。

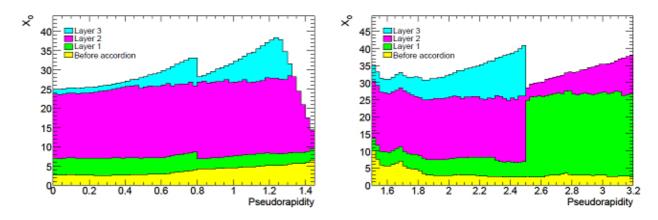


図 2.29 電磁カロリメータの放射距離の η 分布 [4]

左がバレル部電磁カロリメータ、右が前後方部電磁カロリメータ。なお  $X_0$  とは、電子が物質中を通り抜ける際に電磁相互作用によりエネルギーが  $\frac{1}{6}$  となる距離である。

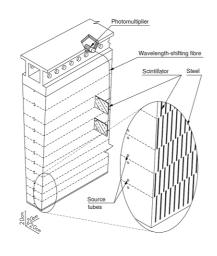


図 2.30 Tile カロリメータの構造 [4]

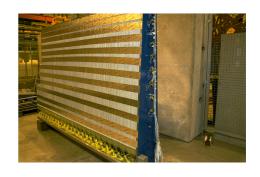


図 2.31 バレル部 Tile ハドロンカロリメータの一部 [24]

これを放射状に並べて円筒形にする。

鉄の吸収体とタイル型シンチレータが重ね合わされてい

る。各タイルは径方向に平行に並べられている。

Layer1 ではロッドは銅製、Layer2,3 では吸収長を増やすためにタングステン製である。 エネルギー分解能は

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{94.2 \pm 1.6\%}{\sqrt{E[GeV]}} \oplus (7.5 \pm 0.4)\%$$
 (2.4)

である。図 2.35 に構造のイメージ図を示す。最後に、全カロリメータの吸収長の和が  $\eta$  毎にどのようになっているかを図 2.36 に示す。

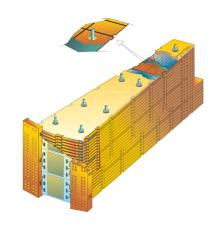


図 2.32 エンドキャップ部 LAr ハドロンカロリメータの構造 [4]

これを円筒状に並べると右図のようになる。

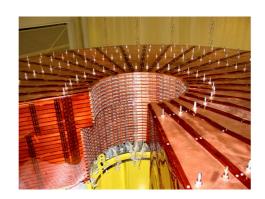


図 2.33 エンドキャップ部 LAr ハドロンカロリメータ [9]

真ん中の筒状の穴の中にビームパイプと FCal が入る。

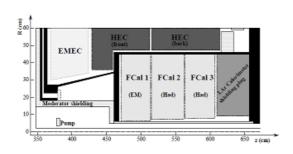


図 2.34 FCal の配置 [4]

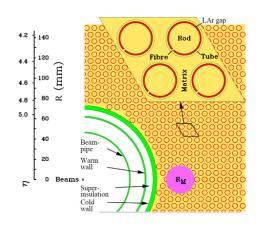


図 2.35 FCal の構造 [4]

# 2.1.5 ミューオンスペクトロメーター

ミューオンスペクトロメータはその名の通りミューオンを測定するのが目的で、ATLAS 検出器の最外に配置される。ミューオンは弱い相互作用で崩壊するので 2.2 μs と長い寿命を持ち、さらに物質の透過力が強いので十分なエネルギーを残したままミューオンスペクトロメータに到達することが出来る。

ミューオンはイベントの再構成のために運動量を精密測定する必要があるだけでなくイベントトリガーとしての役割も持つ。ATLAS では 40.08MHz という非常に高い頻度で衝突が起こるため、トリガーの発行に特化した検出器と位置測定に特化した検出器を別個に実装している。位置検出を行うのが MDT と CSC、トリガー機能を担うのが TGC と RPCである。

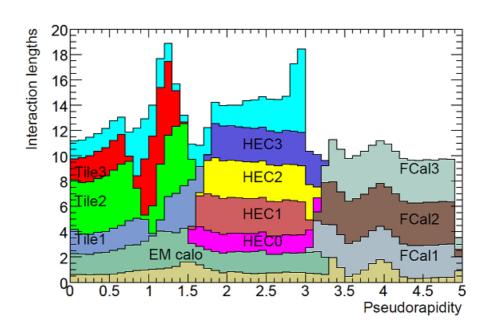


図 2.36 η 毎のカロリメータの吸収長 [4]

Tile(バレル部ハドロンカロリメータ)、HEC(エンドキャップハドロンカロリメータ)、FCal(フォワードハドロンカロリメータ)、EMcalo(電磁カロリメータ)を各色で示してある。 $\eta \le 3$  の領域の水色の部分はミューオンスペクトロメータまでにある構造体などによる吸収長である。ベージュの部分はカロリメータのアクティブ領域までにある物質による吸収長である。

位置測定 トロイダル磁場による rz 平面内でのミューオンの曲がり方を精密に測定することで運動量を測定できる。MDT はバレルと前後方部の広い領域に多数設置され、位置精密測定の主役を担う。CSC は衝突点に近く、さらに  $\eta$  の大きいフォワード部の測定に特化している。これはこの領域は非常に放射線強度が高く、多大なバックグラウンドによって MDT がうまく働かないためである。

トリガー 現在の技術では ATLAS の全データを保存することは不可能なため、 $40.08 \mathrm{MHz}$  の高頻度に対応して、高い時間分解能で正確なトリガーを発行する機能が必要である。前後方部のトリガーを担うのが TGC で、バレル部を担うのが RPC である。またこれらは解像度は落ちるものの  $\phi$  方向の位置測定も行う。トロイダル磁場は理想的には  $\phi$  方向成分のみを持つが、現実にはそうはならず粒子は  $\phi$  方向へも曲げられるためトラック再構成の際に補正する役割を果たす。

図 2.37、2.38 に配置を示す。図 2.39 には検出器毎の飛来粒子の頻度を示す。以下、それぞれについて説明する。

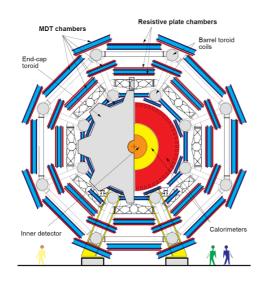


図 2.37 ミューオンスペクトロメータの配置 (xy 平面)[7]

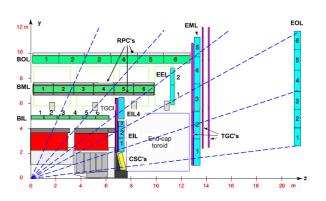


図 2.38 ミューオンスペクトロメータの配置 (rz 平面)[7]

水色が前後方部 MDT、緑色がバレル部 MDT、紫色が TGC、白色が RPC、黄色が CSC。

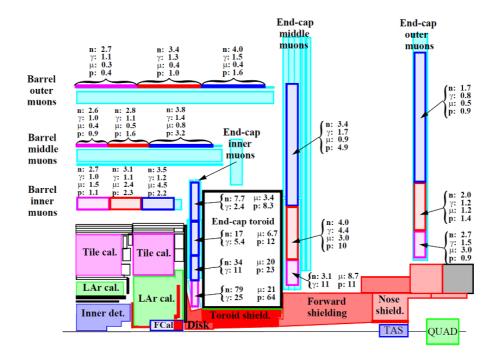
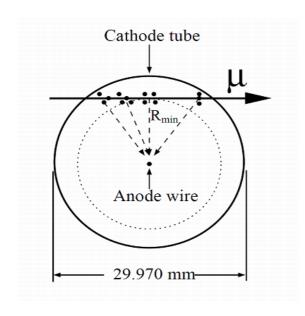


図 2.39 ミューオンスペクトロメータの飛来粒子の頻度 [4]

# 2.1.5.1 MDT (Monitord Drift Tube)

MDT は径約 30mm のカソードチューブに径  $50\mu$ m のアノードワイヤーを張った構造をしており、位置解像度は理想的にはチューブの径方向に  $50\mu$ m、バックグラウンドの影響を考慮すると  $80\mu$ m となる。ATLAS の広い領域で rz 平面内のミューオンの位置精密測定を担う。バレル部、前後方部それぞれ 3 層ずつ設置され、内側からバレル部が BI、

BM、BO、前後方部が EI、EM、EO と呼ばれる。荷電粒子の通過と、それによって生じる電子雪崩に起因するパルスの発生の時間差によってチューブ内の粒子の通過位置を測定する。位置精密測定という役割から、検出器の正確な設置は当然として、重力や温度による歪みも排除する必要がある。そこで複数のレーザーをフレームに通して、設置後の位置のずれを監視できるように設計されている。図 2.40、2.41 にチューブとフレームの構造を、図 2.42、2.43 に写真を示す。また、MDT の主要なパラメータを表 2.1 に示した。



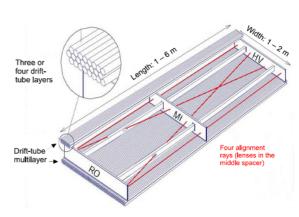


図 2.41 チューブの配置と位置監視用の レーザー [4]

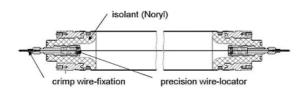


図 2.40 MDT のチューブの構造 [4]

チューブを 3、4 本重ねたものをフレームに固定し 1 層とする。正確な位置情報を得るために位置監視用のレーザーが複数通る。

#### 2.1.5.2 CSC (Cathode Strip Chamber)

CSC は衝突点に最も近い層の、 $2.1 < |\eta| < 2.7$  のフォワード領域における位置検出を担う MWPC(Multi Wire Proportional Chamber) である。MDT ではカウントレートの上限が~150Hz/cm² であるのに対して、CSC は~1000Hz/cm² まで対応できる。

- ドリフト時間が 40ns 以下と短く、時間解像度が 1 層あたり 7ns と高い。
- 高頻度で生じる2トラックに対して高い解像度を持つ。
- ガス量が少なく、水素を含まないので、中性子線への感度が低い。

といった特徴が、放射線強度の高いこの領域で MDT ではなく CSC を用いる理由となる。

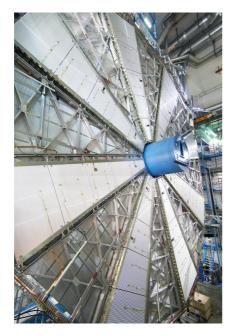


図 2.42 MDT の写真 (A サイドミドルレイヤー)[24]

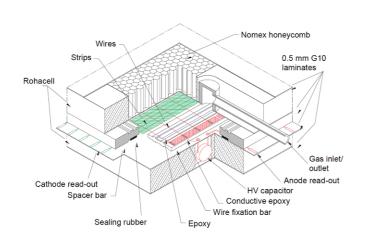


図 2.43 製造中の MDT の写真 [24]

チューブ素材	Al		
チューブの外径	29.970mm		
チューブ厚さ	0.4mm		
陽極ワイヤー電圧	3080V		
ワイヤー素材	金メッキ W/Re 合金 (97/3)		
ワイヤー直径	50μm		
ガス組成	Ar/CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O (80/20/1000ppm 以下)		
ガス圧	3barr		
ガスゲイン	$2 \times 10^4$		
最大ドリフト時間	~ 700ns		
1 チューブでの平均位置解像度	~ 80µm		

表 2.1 MDT の主なパラメータ [4]

CSC は平行に並ぶ陰極ストリップで挟まれたガスギャップに、ストリップと垂直になるように陽極ワイヤーを張った構造となっている。陽極ワイヤー-陰極ストリップ間の距離、ワイヤー同士の距離、ストリップ読出幅が 2.54mm と等しい。積極的にストリップチャンネル間でクロストークを起こし、複数のストリップの信号に対して重心法を用いることで  $60\mu$ m 以上の精度での位置検出を可能としている。図 2.44 にチェンバーの構造を、図 2.45 に写真をしめす。表 2.2 に CSC の主要なパラメータを示す。



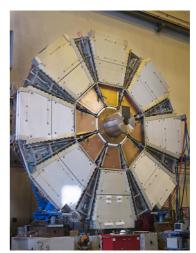


図 2.44 CSC の構造 [4]

図 2.45 CSC の写真 (中央部の茶色部分)[24]

ガスギャップ	5.08mm	
陽極ワイヤー電圧	1900V	
ワイヤー素材	金メッキ W/Re 合金 (97/3)	
ワイヤー直径	30µm	
ワイヤーピッチ	2.54mm	
陰極ストリップ読出幅	5.08mm	
ガスゲイン	$6 \times 10^4$	
ガス組成	Ar/CO <sub>2</sub> (80/20)	
位置解像度	60µm	

表 2.2 CSC の主なパラメータ [4]

## 2.1.5.3 RPC (Resistive Plate Chamber)

RPC は  $|\eta|<1.05$  のバレル部のトリガー及び、 $\phi z$  方向の 2 次元位置情報を測定するガスチェンバーである。高抵抗  $(10^{10}\Omega cm)$  ベークライトの平行ストリップ間のガスギャップに高電圧をかける構造で、特徴は直交配置されたストリップによる 2 次元読出しで、 $\phi$ 方向の位置解像度は  $5mm\sim10mm$ 、時間分解能は  $2\sim3ns$  である。BM の内と外及び、BOの外の計 3 層で構成される。構造を図 2.46 に、写真を図 2.47 に示す。主なパラメータを表 2.3 にまとめた。

## 2.1.5.4 TGC (Thin Gap Chamber)

TGC に関しては本論文の主題であるため詳細は次章に譲り、ここでは概要を述べるに留める。TGC は、 $1.05<|\eta|<2.4$  の前後方部のトリガー及び、 $r\phi$  の 2 次元位置測定を担

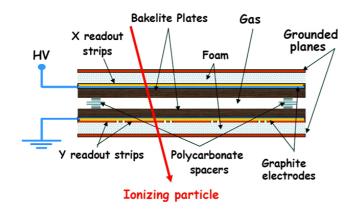




図 2.47 RPC の写真 [24]

図 2.46 RPC の構造 [9]

2.0mm	ガスギャップ
9800V	ストリップ間電圧
23mm/35mm	ストリップ読出幅 $(\eta/\phi)$
$1.0 \pm 0.5~\mathrm{mbarr}$	ガス圧
$6 \times 10^4$	ガスゲイン
$C_2H_2F_4/iso - C_4H_{10}/SF_6$ (94.7/5/0.3)	ガス組成
$0.5 \sim 1.0 \text{mm}(\phi)$	位置解像度

表 2.3 RPC の主なパラメータ [4][7]

うガス検出器である。MWPC の一種で基本的な構造は CSC と同じである。ワイヤーによって r 方向を、ストリップによって  $\phi$  方向を測定する。特徴は名前の通りガスギャップが 2.8mm と狭いことで、アノードのワイヤー間隔が 1.8mm なのでワイヤー同士の距離よりもワイヤーとストリップとの距離のほうが短い。これは 25ns 間隔 (40.08MHz) で起こる衝突に対して、それよりも十分に短い時間での信号読出しを可能にするためである。図 2.48 に TGC の構造を示す。

TGC は両サイドに 4 層ずつあり、内側からインナー、TGC1、TGC2、TGC3 と呼ばれる。TGC1、TGC2、TGC3 と MDT の EM でビッグウィールと呼ばれる大きな円盤状の検出器群を構成する。また TGC インナーの一部と MDT の EI の一部をあわせてスモールウィールと呼ばれる。図 2.49 にビッグウィールの写真をのせる。主なパラメータを表 2.4 にまとめた。

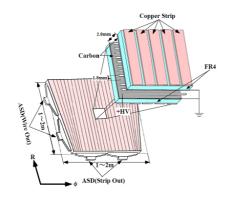


図 2.48 TGC の構造 [7]

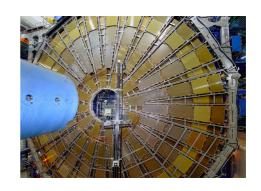


図 2.49 TGC ビッグウィールの写真 [24]

ガスギャップ	2.8±0.10mm	
陽極ワイヤー電圧	2900±100V	
ワイヤー素材	金メッキ W/Re 合金 (97/3)	
ワイヤー直径	50μm	
ワイヤーピッチ	1.8±0.05mm	
陰極ストリップ読出幅	14.6mm ~ 49.1mm	
ガスゲイン	$3 \times 10^5$	
ガス組成	$CO_2/n - C_5H_{12} (55/45)$	
位置解像度	~ 1cm	

表 2.4 TGC の主なパラメータ [4][7]

# 2.2 ATLAS 実験における DAQ システム

LHC では  $L=10^{34} {\rm cm}^{-1} {\rm s}^{-1}$  という高ルミノシティを実現するために、 $40.08 {\rm MHz}$  の高頻度ビーム衝突毎に平均 23 の陽子衝突が生じ、1 回のビーム衝突の情報量は  $1.6 {\rm MByte}$  程度なので、秒間数十~数百 TByte の情報量になる。しかしながら、現在の記憶装置の技術的限界により、記録可能な情報量は  $450 {\rm Mbyte/s}$  程度に制限され、生データ以外に処理結果等も記録することを考慮すれば記録すべき衝突のレートは  $200 {\rm Hz}$  程度まで落とす必要がある。これは元々のデータの 0.0005% に過ぎない量である。従って、膨大なバックグラウンドを含むデータから、物理的に興味のある情報を含むイベントのみを効率よく、かつ高速にピックアップするトリガー機能の実装が不可欠であった。この節では ATLAS 検出器においてどのようにトリガーが機能しデータが記録されるかを説明する。

# 2.2.1 トリガーシステムの全体像

ATLAS トリガーシステムはレベル 1、レベル 2、EventFilter(レベル 3) の 3 段階のトリガーにより  $40 \text{MHz} \rightarrow 75 \text{kHz} \rightarrow 3.5 \text{kHz} \rightarrow 200 \text{Hz}$  と段階的にレートを落としている。図 2.50 にトリガーとデータの流れの全体像を示す。

まず各検出器から出た全ての情報は、各検出器のデータ処理システムに備えられたパイ プラインメモリに一時的に保持される。TGC、RPC、カロリメータの情報によりレベル 1 トリガーの判定がなされ、L1A(Levell Accept) 信号が発行される。L1A は衝突の発生か ら 2.5μs 以内に発行されることになっており、パイプラインメモリはその間の情報を全て 保持できるように 128 段構造 ( $25ns \times 128 = 3.2\mu s$ ) となっている。L1A を受け取った各 システムはパイプラインバッファーから該当イベントの情報を送り出し、データの圧縮 や整形の処理を行い所定のフォーマットにし ROD(ReadOut Driver) に送る。この時、各 データに何番目のバンチ衝突の情報であるかを示す BCID(Bunch Crossing ID)、何番目の L1A 信号によってアクセプトされたデータであるかを示す L1AID などのタグ情報が付随 される。ROD ではイベント毎にデータを集め、データのフォーマットやタグ情報の整合 性を確かめた後に ROB(ReadOut Buffer) に送る。ROB ではレベル 2 のトリガーの判断が なされるまでデータが保持される。複数の ROB をまとめたものを ROS(ReadOut System) という。レベル2トリガーはミューオンスペクトロメータ、カロリメータ、内部飛跡検出 器の情報を統合しコンピュータを用いて計算を行い判断を下すソフトウェアトリガーであ るが、40ms という短い時間で処理する必要があるので ROI(Region Of Intrest) と呼ばれ る特定領域に属する各検出器の情報のみを用いている。どの領域をそのイベントに対する ROI とするかの判断はレベル 1 トリガーシステムでなされており、レベル 2 のシステム に ROI 情報を渡している。レベル 2 トリガーを通過したイベントは EF ファームに保持 され、EF(レベル3トリガー)の最終判断を待つ。EFでは、全検出器の全領域の完全な情 報を使った複雑な計算によってトリガー判定がなされ、これを通過したデータが最終的に 記録される。EF の判断にかかる時間は 4sec 以内となるように決められている。以下で各 レベルのトリガーについてもう少し詳しく説明する。

#### 2.2.2 レベル 1 トリガー

レベル 1 トリガーではイベントレートを 40.08MHz から 100kHz まで落とす。トリガーの判断を下し L1A 信号が各検出器システムのパイプラインメモリに届くまでにかかる時間 (レイテンシー) として  $2.5\mu s$  以内という大変短い時間が要求される。そのため、レベル 1 トリガーシステムはコンピュータによる計算は行わず、電気回路によって全ての判断を下すハードウェアトリガーとなっている。

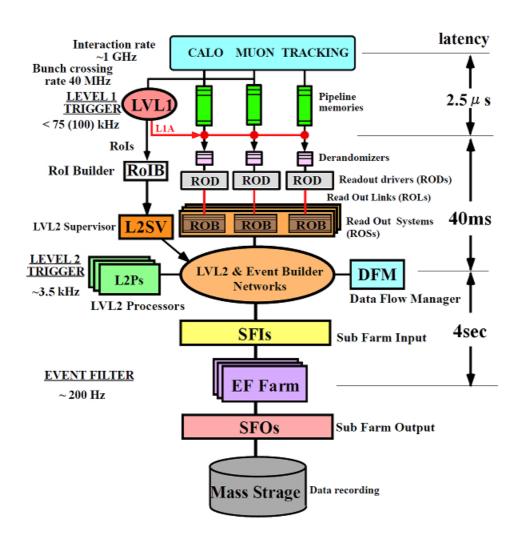


図 2.50 ATLAS トリガーシステムの全体像 [5]

レベル 1 トリガーシステムは、TGC、RPC、カロリメータの各検出器システム及び、MUCTPI(MUon trigger to CTP Interface)、CTP(Central Trigger Processor)、TTC(Timing Trigger and Control distribution system) から構成されている。内部飛跡検出器、MDT、CSC といった検出器の情報を使用するにはコンピュータによる計算が不可欠となるためレベル 1 で十分にレートを落とした後のレベル 2 から使用される。TGC、RPC からはミューオンの  $p_T$  が、カロリメータからは精度を粗くした e、 $\gamma$ 、ジェット等のエネルギーが送られる。それぞれの情報は CTP で統合された上で最終的なレベル 1 の判断が下される。アクセプトの場合は L1A 信号が発行されて TTC を通じて ATLAS の各検出器のフロントエンドに配信される。CTP では粒子の種類毎に多段階の条件を設定可能でトリガーメニューの最大数は 96 個である。表 2.5 の左に代表的なレベル 1 トリガーメニューをのせた。実際にはそれぞれのメニューに対して条件別にさらに MUO、MU1・・・といったようにメニューが細分化される。図 2.51 にレベル 1 トリガーシステムの全体像を示す。

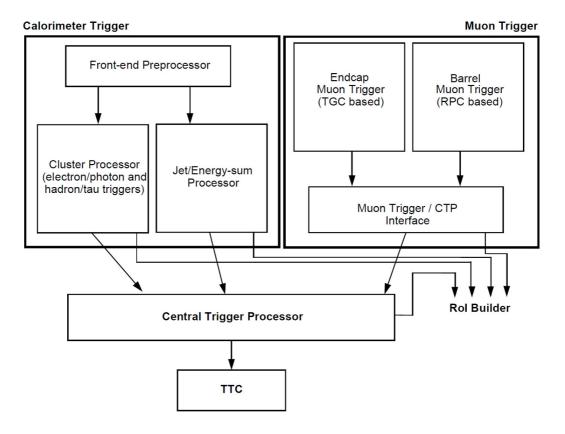


図 2.51 レベル 1 トリガーシステム [7]

レベル 1 トリガー		レベル2トリガー	
MU	muon	μ	muon
EM	Electro Magnetic	e	electron
J	JET	γ	photon
Т	tau/hadron	j	JET
XE	missing energy	τ	tau
		хE	missing energy

表 2.5 ATLAS で用いられるトリガーメニューの代表例

# 2.2.3 レベル2トリガー

LVL2 トリガーではイベントレートを 75kHz から 3.5kHz 程度に落とす。MDT、CSC、内部飛跡検出器による精密なトラック情報とカロリメータの高精度情報をレベル 1 の情報に加えて、コンピュータ計算によってより精度の高いトリガー判断を下す。しかし許容されるレイテンシーは 40ms とあまり長くはないので、高速化のために、そのイベントに対

して特に重要と思われる領域に属する情報のみを持ってきて処理を行う。具体的にはレベル1トリガー判定を通過した粒子が検出された領域及びその付近のことであり、これをROI(Region Of Interest) と呼ぶ。ROI 情報はレベル1トリガーシステムに属する各検出器の情報を統合した上でROI Buider で決定され、レベル1トリガー情報と共にL2SV(LVL2 SuperVisor) に渡される。L2SV は受け取ったROI 及びレベル1情報を基に負荷分散アルゴリズムに従って、500台のPCからなるL2P(Level2 Processor) のうちいくつかをそのイベントのレベル2トリガー判定用に割り振る。L2Pはレベル2ネットワークを介して必要なイベント情報をROS(ReadOut System) から受け取り、レベル2判定を行い、これを通過した場合はL2A(Level2 Accept) 信号を発行する。L2A信号はL2SVを経由してDFM(Data Flow Manager) に渡される。DFM は負荷分散アルゴリズムに従ってデータを受けるSFI(Sub Farm Input buffer)を割り当てる。SFI は各ROSから該当イベントの全検出器のデータを受け取り、フォーマットに従ってまとめる。この作業をEvent Build(イベント構築)という。構築されたイベントはSFIのバッファーに保持されEFの判断を待つ。レベル2のトリガーメニューも表 2.5 に示した。

# 2.2.4 EventFilter(レベル3トリガー)

EF によって最終段階のトリガー判定を下し、イベントレートは 200Hz まで落とされる。ROI で限定せずに全検出器の全領域の完全な情報を用いてトリガー判定がなされる。EF は幾つかの独立した EF sub farm から構成されていて、全体で 1600 台程度の PC を含む大規模プロセッサファームである。EF sub farm は、スイッチングネットワークを介して SFI に繋がっている。EF sub farm では EFD(EF Data flow control program) というプログラムが SFI から受け取ったイベントデータを基にトリガー判定を行っている。1 イベントの処理にかかる時間は最大 4sec 程度だが、複数の EF sub farm で並列処理を行っているために、全体で 200Hz のトリガーを発行可能である。EF を通過したイベントは、トリガー情報に完全な生データを付加し、SFO(Sub Farm Output buffer) へ送られテープに記録される。図 2.52 にコンピュータファームの写真をのせた。



図 2.52 大規模コンピューターファームの写真 [9]

# 第3章

# 前後方部レベル 1 ミューオントリ ガーシステム (TGC システム)

ATLAS のレベル 1 トリガー機能はカロリメータ、TGC、RPC からなり、TGC は前後方部のミューオントリガーを担う。それと同時に r- $\phi$  の 2 次元位置情報の測定も行いミューオンのトラック再構成の補助的役割も担う。TGC は  $1.1 < |\eta| < 2.5$  をカバーし、陽子衝突で発生するミューオンのうち 60% がこの領域に飛来する。この章では、まず TGC システムの根幹となるガス検出器の構造及び ATLAS 実験ホール内での配置を説明する。次にガス検出器の情報を基にどのようなスキームによりイベントを選別し、トリガーを発行するかを述べる。最後に、そのスキームを実現する上で必要となるエレクトロニクスについて個別に解説する。

# 3.1 検出器の構造と配置

# 3.1.1 TGC(Thin Gap Chamber) の基本構造

TGC システムに用いられるガス検出器は、LEP の OPAL 実験のハドロンポールチップカロリメータにおける位置検出器として 7 年間の安定動作実績を持つ検出器を基に改良されたものである。MWPC(Multi Wire Proportional Chamber) の一種で、平行面をなすカソードストリップ間のガスギャップにアノードワイヤーを張り、ガスで満たす構造である。TGC に要請される性能は以下の通り。

- r 方向、 φ 方向の 2 次元読出しが可能である。(トロイダル磁場の不均一性のため)
- 少ない物質量で、大面積 (6600mm²) をカバーできる。(多重散乱を防ぐため)
- 応答時間が速い。(LHC の 40.08MHz の高レートに対応するため)

TGC ではワイヤーで r 方向の、ストリップで  $\phi$  方向の 2 次元読出しを実現している。 LHC では LEP と比べて衝突頻度が高いこと (LEP:  $/22.5\mu s \rightarrow LHC: /25ns$ ) を考慮して、アノードワイヤーの間隔を 2mm から 1.8mm に狭め応答時間を短縮した。また、LHC の強い放射線環境下 ( $1kHz/cm^2$ ) で最低 10 年の安定稼動が可能なことが放射線照射試験によって確認されている。チェンバーモジュールは台形をしており、これを放射状に並べることで ATLAS の円筒の蓋部分にあたる  $6600mm^2$  の領域をカバーする。図 3.1 に構造を、図 3.4 に写真を示し、以下に特徴を説明する。

#### アノードワイヤー

径  $50\mu m$  の金メッキタングステンワイヤーで、台形の上底下底と平行に  $1.80\pm0.10mm$  間隔で張られる。4 本 $\sim$  33 本をまとめて 1 つの読出しチャンネルとし、r 方向の位置を決定する。ワイヤー間隔を短くすれば電子のドリフト距離が減少し、検出器の応答速度が高まるがワイヤー張力の増加による幾何学的歪みというデメリットもあり、バランスを考えた上で現在の間隔に落ち着いた。図 3.2 にチェンバーの断面図を示す。

#### • カソードストリップ

ガラスエポキシ板の片面に表面抵抗  $1\pm0.5 \mathrm{M}\Omega/\mathrm{cm}^2$  のカーボンを塗布し、反対の面に幅の細い  $30\mu$  厚の銅板 (ストリップ) をワイヤーと直角をなすように敷き詰めている。カーボン面がガスギャップの内側を向く。1 つのチェンバーの  $\phi$  方向を 32 分割しており、1 枚が 1 つの読出しチャンネルとなる。ストリップ幅は  $15 \mathrm{mm}$  ~ $53 \mathrm{mm}$  である。ストリップ間のガスギャップは  $2.80 \mathrm{mm}$  なので、ワイヤーとストリップの最短距離は  $1.40 \mathrm{mm}$  となりワイヤー間隔よりも短い。これが TGC(Thin Gap Chamber) という名前の由来である。薄くした事による利点は以下の通りである。

- 1. 陽イオンのカソードに達するまでにかかる時間(不感時間)が減少する。
- 2. 相対的にワイヤー径が太くなることでガスギャップ中の強電場領域が増え、不感領域が減少する。

カーボン面は陽イオンを受けるカソード電極であると同時に、電子雪崩によって生 じる紫外線光子からの光電効果を抑え、放電した際の電圧降下を局所に限定すると いう役割も担う。表面抵抗の大きさは、

- 1. ストリップの誘起電荷が  $1 \text{mm}^2$  に収まる。( $100 \text{k}\Omega/\text{cm}^2$  以上)
- 2. カーボン上の電流で実効的な印加電圧低下が起こらない。 $(10 M \Omega / cm^2 \ \mbox{以下})$ という要求を満たすように最適値が選ばれた。

#### • ワイヤーサポート

図 3.3 に示すように、ワイヤーのたるみを防ぐためにワイヤサポートと呼ばれる構造がある。ボタン型のものと棒状のものがあり、棒状のものは約 30cm 間隔でおかれている。またワイヤサポートはワイヤのたるみを防ぐ以外に、ガスの流路の形成する役割と、TGC 自体の歪みを防ぐ役割も担っている。

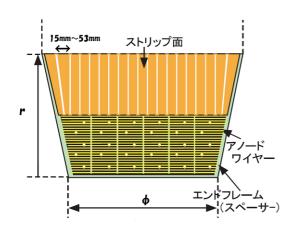


図 3.1 TGC の構造 [7]

ストリップによって  $\phi$  方向の位置情報を、ワイヤーに よって r 方向の位置情報を得る。チェンバー一枚は台形 で、放射状に並べることで円盤を形成する。

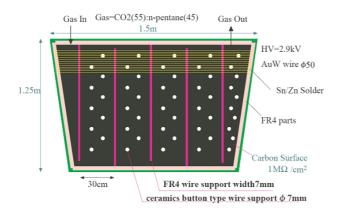


図 3.3 ワイヤーサポートの配置 [7]

棒状のものとボタン型ものがある。

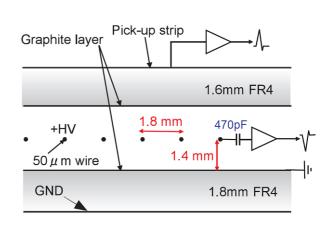


図 3.2 TGC の断面図 [7]

ワイヤー間隔が  $1.80\pm0.10$ mm、 ワイヤー-ストリップ間が  $1.40\pm0.07$ mm の薄型チェンバーである。



図 3.4 TGC の写真 [22]

#### • ダブレットとトリプレット

チェンバーにはダブレットとトリプレットがあり、1 枚のチェンバーにそれぞれガスギャップが2層、3 層ある。ただしトリプレット関してはワイヤーは3 層とも読み出しを行うが、真ん中の層のカソードは読出しを行わないのでストリップは2層となる。ガスギャップの間はハニカム構造になっており強度を保っている。断面図を図3.5 に示す。

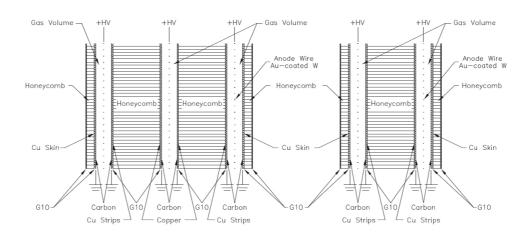


図 3.5 TGC のトリプレットチェンバー (左) とダブレットチェンバー (右) の構造 [7]

# • スタッガリング

1つのチェンバー内の各層で読出チャンネルの配置をずらしており、この構造をスタッガリングと呼んでいる。具体的には、ワイヤーチャンネルはトリプレットで1/3ずつ、ダブレットで1/2ずつ、 $\eta$ 空間における位置をずらしている。ストリップチャンネルではトリプレット、ダブレット共に $\phi$ 空間で1/2ずつずらしている。この構造により、1層あたりのグラニュラリティーに対してトリプレットワイヤーで約3倍、その他で約2倍に位置分解能を高めている。図3.6にワイヤーチャンネルのスタッガリングのイメージ図を示す。

#### • $JJA (CO_2/n - C_5H_{12} (55/45))$

TGC は  $CO_2/n - C_5H_{12}$  (55/45) の混合ガスを印加電圧  $2.8kV \sim 2.9kV$  で使用する。  $CO_2$  が電離ガスの役割を、n-pentane がクエンチガスの役割を担う。限定比例領域で動作し、ガスゲインは  $3 \times 10^5$  程度を見込む。限定比例領域には

- 1. 構造のゆがみに対する性能変化が少ない.
- 2. シグナルの形が粒子の入射角度に依存しにくい。

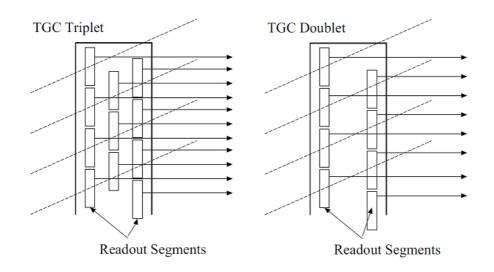


図 3.6 TGC のワイヤーチャンネルスタッガリングのイメージ図 [7]

 $\eta$  空間で、トリプレット (左) では 1/3 ずつ、ダブレット (右) では 1/2 ずつチャンネルの配置をずらすことにより、それぞれ 1 層あたりのグラニュラリティーの 3 倍、2 倍の位置分解能を得る。

のようなメリットがある。2. は、具体的には TGC の平面に垂直を 0 度とし、40 度 以内の入射粒子に対しほぼ同等のシグナルを形成する。実験では 10 度~45 度の入 射が想定される。

## 3.1.2 TGC の動作原理

ガスギャップ中を荷電粒子が通過すると、ガス分子を電離し電子と陽イオンが生じる。この電子を一次電子と呼ぶ。次に電場に従って、一次電子はアノードワイヤー側へ、陽イオンはカソードストリップ側へ移動しはじめる。電場の強さがある閾値以上であると、電子は平均自由行程を移動する間に他のガス分子を電離させるだけのエネルギーを得ることができるようになる。そして新たに電離された電子がさらに次のガス分子を電離させていき指数関数的に電子陽イオンペアを生成する。この現象をタウンゼント型電子雪崩と呼ぶ。図 3.7 に示す通り、TGCではワイヤーに近づくにつれて電場が急速に強くなるため、電子はワイヤーから一定距離以内に近づくと電子雪崩を生じる。生じた電子群はワイヤーに数 ns で速やかに吸収されるが陽イオン群は質量が大きいためしばらくワイヤーの周りに留まりワイヤー表面とコンデンサを形成する。このためアノードの電圧変化は陽イオン群の挙動に支配される。陽イオン群がカソードへ吸収されるまでには時間がかかるため、パルスの終わりはなだらかなものになるが、基本的にはエレクトロニクスによってパルスの立ち上がりを用いるようにする。荷電粒子の入射から電子雪崩を起こすまでの時間をドリフト時間と呼び、検出器のパルスの立ち上がり、すなわち応答速度を左右する。また、陽イオン群がカソードに達するまでの時間は検出器の不感時間を左右する。TGCで

は、電子雪崩によって 1 つの電子が  $3\times 10^5$  の電子陽イオンペアを作り、一次電子と共に最初に生じた陽イオンの信号への影響は無視できる。図 3.8 に電子雪崩のイメージ図をのせる。

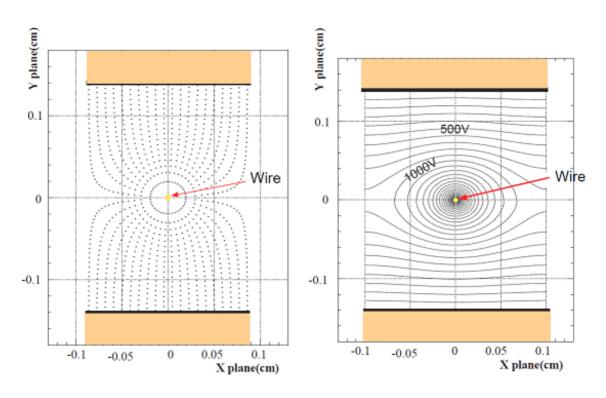


図 3.7 TGC 内の電場 [32]

左図は電気力線、右図は等電位線である。ワイヤーに近づくにつれ急速に電場が強まる。

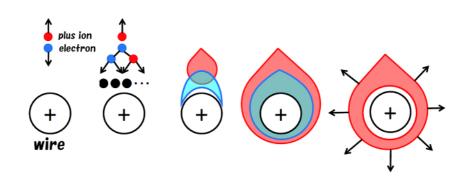


図 3.8 電子雪崩のイメージ図 [7]

青が電子、赤が陽イオンを表す。(i) 荷電粒子によりガス分子が電離され電子と陽イオンができる。(ii) 電場によってそれぞれ移動し、ワイヤー近傍において電子が電子雪崩を起こす。(iii) ワイヤーのまわりを電子雲が囲み、さらにその周りを陽イオン群が囲む。(iv) 電子はワイヤーに吸収され、陽イオン群はゆっくりと拡散してカソード側へ移動する。

# 3.1.3 TGC の応答時間

LHC では 40.08MHz(25ns 間隔) でバンチ衝突が生じるが、バンチを識別して正しくトリガーを発行するためには、1 衝突に対する信号の分布が 25ns 以内に収まる必要がある。図 3.9 に、粒子が TGC を通過してから信号発生までの時間分布を示す。実験での入射角度は 10 度~45 度と想定されており、その領域で 25ns 以内に収まっていることがわかる。

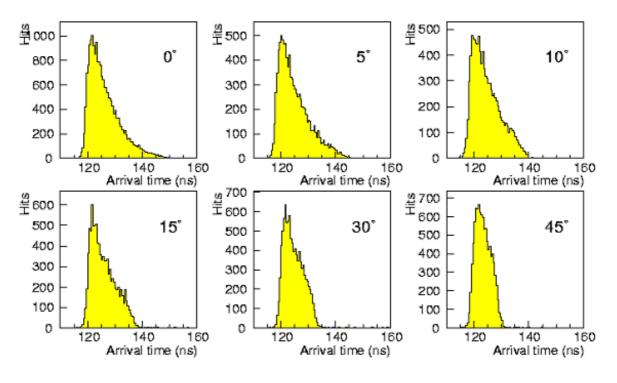


図 3.9 TGC のパルス発生までの時間分布 [7]

左上から、0 度、5 度、10 度、15 度、30 度、45 度の入射粒子に対するパルス発生までの時間の分布を示す。入 射粒子は 3GeV の 中間子を用いた。TGC の面に垂直に入射するものを 0 度としている。

# 3.1.4 ATLAS における TGC の配置

ATLAS 検出器内における TGC の配置について説明する。はじめに図 3.10 に TGC の ATLAS 内における概観を、図 3.12 に rz 平面内での配置を示す。 TGC は  $1.05 < |\eta| < 2.70$  をカバーする円盤として ATLAS の A と C の両サイドに配置される。内側からインナー、 TGC1、TGC2、TGC3 の 4 つからなり、TGC1,2,3 は、MDT と共にビッグウィールと呼ばれる直径約 25m の巨大な円盤状の検出器群を構成する。図 3.11 にビッグウィールを外側から見た写真をのせる。インナーは EI/FI とも呼ばれ、FI 部分はスモールウィールと呼ばれる小円盤を構成する。

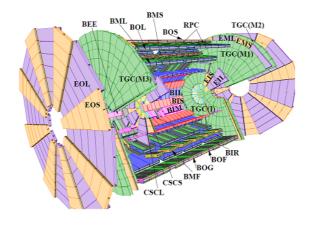


図 3.10 ATLAS におけるミューオンスペクトロメータの配置 [4]

図 3.11 TGC ビッグウィールの写真 [24]

# 3.1.4.1 ビッグウィール

• TGC1、TGC2、TGC3

内側から TGC1、TGC2、TGC3 の順に並び、TGC1 と TGC2 の間に MDT の EM(Endcap Middle) が入る。TGC1 はトリプレットチェンバー、TGC2 と TGC3 はダブレットチェンバーからなり、合わせて 7 層のワイヤー、6 層のストリップ面を持つ。TGC3 はピボットプレーンとも呼ばれる。

#### ● フォワード、エンドキャップの区別

円盤の  $|\eta|=1.92$  より内側をフォワード、外側をエンドキャップと区別しており、 $\phi$  方向に関して、フォワードは 24 分割 (0.26rad/chamber)、エンドキャップは 48 分割 (0.13rad/chamber) している。図 3.13 に  $r\phi$  平面で見た TGC1 の全体像を示す。

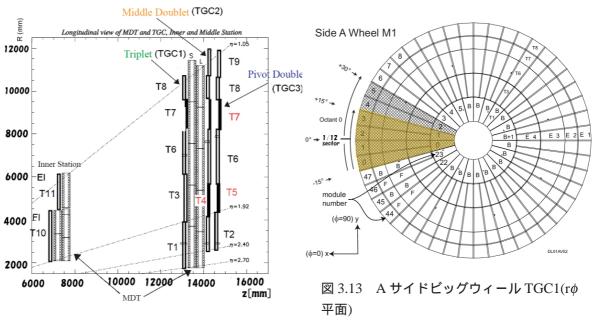


図 3.12 TGC 全体の配置 (rz 平面)[7]

TGC は内側からインナー、TGC1、TGC2、TGC3 の 4 つからなる。TGC1、2、3 はビッグウィールと呼ばれる 大きな円盤状の検出器群に含まれる。

TGC の円盤を φ 方向に 12 分割したものを 1/12 セクターと呼ぶ。黄色い部分が 1 つのセクターであり、組立や検査、データ処理等はこの単位で行われる。

#### 1/12 セクター

TGC のビッグウィールは通常  $\phi$  方向に 12 分割したセクターと呼ばれる単位で扱われる。ATLAS の幾何学は 8 回対称なため、設計当初はオクタントと呼ばれる 8 分割単位で扱われていたが歴史的な理由から現在は 1/12 セクターが基本となる。図 3.14 に TGC1,2,3、それぞれの 1/12 セクターの構成を示す。各セクターは  $\phi$  方向に、フォワードは 2 等分、エンドキャップは 4 等分され、それぞれ  $\phi$ 0, $\phi$ 2、及び  $\phi$ 0 ~  $\phi$ 3 と番号付けされる。これらはトリガーデータを処理する際の 1 つの単位になっていてトリガーセクターと呼ばれる。トリガーセクターはワイヤー端を除いてワイヤー、ストリップ共に 8 チャンネルずつからなっており、トリガーデータ処理の際の最小単位となる。 TGC の発行する ROI 情報はこのサブセクター単位である。付録 A.4 に ROI 番号表を示す。図 3.16 にトリガーセクターの概念を示す。エンドキャップのトリガーセクターは TGC1 では 4 つ、TGC2,3 では 5 つのチェンバーからなっていて、図 3.12、図 3.13、図 3.14 にも書かれているように、大きさの異なる T1~T9 という 9 種類のチェンバーが用いられている。フォワードのトリガーセクターは一つのチェンバーからなる。

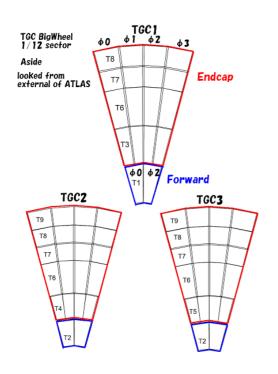


図 3.14 ビッグウィール 1/12 セクター [33]

TGC は円盤の内側と外側でフォワード、エンドキャッ プと区別される。1 つのセクターはフォワードが 2 チェンバーからなり、 $\phi$ 0、 $\phi$ 2 と呼ばれる。エンド キャップは 4 分割され  $\phi 0 \sim \phi 3$  と呼ばれる。さらにエ のスペースを確保するためである。F,B は F タイプ、Bンドキャップは r 方向に、TGC1 が 4 分割、TGC2,3 が 5分割されている。

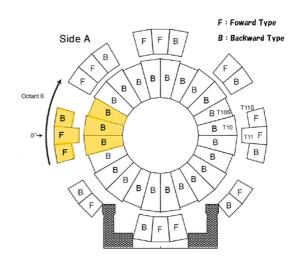


図 3.15 EI/FI(r 中面)[33]

インナーは φ 方向に 8 分割したオクタントの単位 (図 の黄色部分) で扱われることが多い。片サイドで、FI が 24 枚、EI が 21 枚のチェンバーからなり、EI は図の通 リ飛び飛びになっている。さらに EI の一部と FI の3

枚に 1 枚は少しだけ r 方向に短いチェンバー (T11S,T10S) が用いられる。これはバレルトロイド磁石 タイプを表す。

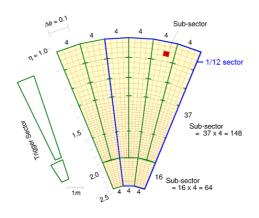


図 3.16 トリガーセクター及びサブセクター [6]

1/12 セクターはエンドキャップが 4 つ、フォワードが 2 つのトリガーセクターにわかれる。ワイヤー端以外の サブセクターにはワイヤー、ストリップが8チャンネルずつ属する。

#### 3.1.4.2 インナー (EI/FI)

インナーでもフォワードインナー (FI) とエンドキャップインナー (EI) の区別はあるがこれは r 方向に 2 チェンバーあるうちの外側と内側を区別する呼び名に過ぎず、共に  $|\eta|<1.92$  のエンドキャップ領域に位置する。図 3.15 に EI/FI の構成を示す。EI には T11 という大きさのチェンバーが用いられるが、図の通り  $\phi$  方向に隙間があり、さらに一部には r 方向にワイヤー 8 チャンネル分だけ短い T11S が使われる。FI には T10 が用いられ、隙間なく円盤状になっているが、3 枚に 1 枚は r 方向に 2 チャンネル分短い T10S が用いられる。これらは 8 回対称のバレルトロイド磁石を設置するスペースを確保するためである。EI/FI はオクタントの単位で扱われることが多い。

#### 3.1.4.3 フォワードチェンバーとバックワードチェンバー

チェンバーの種類は大きくわけてトリプレットとダブレットがあり、さらに大きさの異なる  $T1 \sim T11(S)$  に分けられる。しかし、全てのチェンバーはさらにフォワードチェンバー (F タイプ)、バックワードチェンバー (B タイプ) の区別を持つ。これらはチェンバーの基幹部分の構造は全く同一で、ワイヤーチャンネルの読出し口の位置のみが異なる。この区別が作られた理由は、チェンバーを円盤状に並べた時に、ケーブリングの都合によりワイヤー読出し口をできるだけ近い場所に集中させたいからであった。図 3.17 に示す通り、ワイヤー読出し口は台形のチェンバーの斜辺部分にあるが、F タイプと B タイプではその左右のみが異なる。エンドキャップでは F、B を交互に並べることで隣り合う 2 つのチェンバーのワイヤー読出し口が一箇所に集中する。図 3.19 にビッグウィール、図 3.20 に EI/FI の、F、B の配置を示す。A サイドと C サイドの対応する位置で F と B が全て逆になっているのは ATLAS 検出器が z=0 の xy 平面に対して鏡像対称となるように設計されているためである。ただし図 3.18 に示す通り、ストリップのスタッガリングに関しては F タイプで共通のため、この鏡像対称性を破ることになる。スタッガリングが反対のチェンバーを導入すれば対称にできるが、チェンバーの種別をさらに 2 倍に増やすことなり、コストの面から断念された。ワイヤーは鏡像対称性が保たれている。

#### 3.1.4.4 チェンバー境界のオーバーラップ

隣合うチェンバー同士を少しずつオーバーラップさせることでチェンバー境界の不感領域を排除している。その領域でのデータの扱いは $\mathbf{r}$ 方向と $\phi$ 方向で少々異なる。

#### r方向に隣り合うチェンバー間のデータの取り扱い

ワイヤーでは隣り合うチェンバーのオーバーラップ部分のチャンネルに対して OR をとり、一つのトリガーセクターを単一のチェンバーのように扱う。ストリップは TGC3 では OR をとっていないが、TGC1 と TGC2 では同じ  $\phi$  座標に位置す

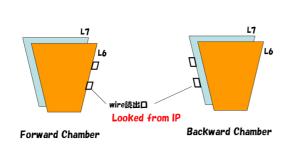


図 3.17 F タイプと B タイプの違い (TGC3の例)

衝突点から見て右側にワイヤー読出し口があるのが F タイプ、左側にあるのが B タイプ。

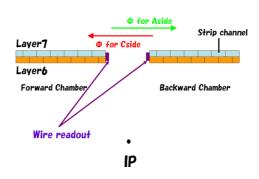


図 3.18 F タイプと B タイプにおけるスト リップチャンネルのスタッガリング (TGC3 の例)

左図で言えば真上からチェンバーを見た図。どちらのタイプもチェンバーの中身は共通なのでスタッガリングも等しい。このため A サイドと C サイドで F タイプと B タイプを向かい合わせた場合にストリップのスタッガリングが鏡像対称とならない。

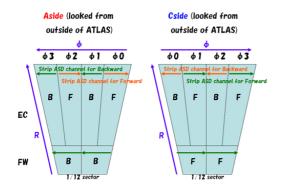


図 3.19 ビッグウィールの F タイプ、B タイプの配置 (1/12 セクター単位)

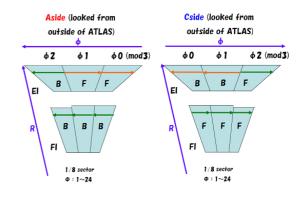
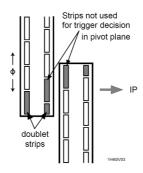


図 3.20 EI/FI の F タイプ、B タイプの配置 (オクタント単位)

るチャンネル間で OR をとっている。

◆ 方向に隣り合うチェンバー間のデータの取り扱い
 ◆ 方向に隣り合うチェンバーは異なるトリガーセクターに属するのでワイヤーもストリップも OR をとっていない。同一粒子によるヒットのダブルカウントを防ぐために、図 3.21 のように、TGC3 の φ 端のオーバーラップ領域のストリップチャンネルをマスクしている。



四角1つがストリップチャンネルを表す。黒くなっているのがマスクされるチャンネル。

# 3.2 TGC におけるミューオントリガーのスキーム

TGC ではワイヤー 7 層、ストリップ 6 層におけるヒット情報を段階を踏んでコインシデンス処理することでミューオンの横運動量  $(p_T)$  を決定し、トリガーを発行する。ワイヤー情報とストリップ情報は、TGC システムにおけるトリガー発行の最終判断を下すモジュールであるセクターロジックに達するまでは別々に処理される。以下で、TGC においてどのように  $p_T$  を決定しているか、そのロジックを示す。

まず、図 3.22 に  $p_T$  決定の概念図を示す。

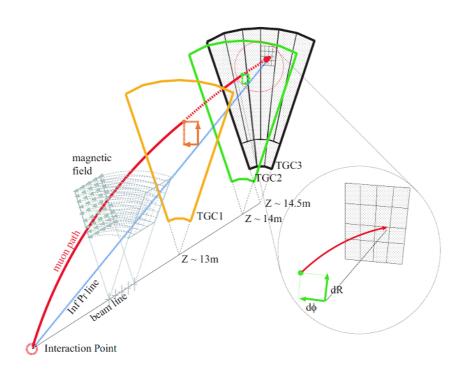


図 3.22 TGC における p<sub>T</sub> 決定の概念図 [18]

pT は次の手順で求められる。

- 1. TGC1 上のヒット位置と衝突点を直線で結んだトラック (Infinite  $p_T$  Line) を考える。これは無限大の運動量を持った粒子が磁場による影響を全く受けずに直進した場合のトラックに相当する。
- 2. TGC2 上の実際のヒット位置と、1. で求めた直線が TGC2 を通過する位置との差分を求める。ワイヤーとストリップで独立に処理を行い、この差分を  $\delta r$ , $\delta \phi$  と呼ぶ。衝突点、TGC2、TGC3 の 3 点を用いたサジッタ測定により  $p_T$  を決定することになるが、レベル 1 トリガーには  $2.5\mu s$  以内のトリガー発行という強い時間的制限があるためコンピュータで計算を行う時間はなく、エレクトロニクスによる  $p_T$  の高低の判断を行う。具体的には、 $p_T$  が高いほど  $\delta r$ , $\delta \phi$  は小さくなるため、それぞれの絶対値に上限値を儲け、それを下回るもののみを通過させるようにコインシデンスマトリックスを組む。 $\delta r$ - $\delta \phi$  空間でそれぞれの上限を下回る領域はちょうど四角い窓の形になるためコインシデンスウィンドウと呼ばれている。TGC3 と TGC2 は距離が近く、高い  $p_T$  になると区別がつかなくるため、この段階では  $p_T$  が約 6GeV より高いか低いかの判断をし、閾値を超えたものは LPT(Low  $p_T$ ) トリガーと呼ばれ、次の処理に進む。
- 3. 次に、全ての LPT に対して、衝突点、TGC3、TGC1 上のヒットを用いたサジッタ 測定を行う。TGC3 と TGC1 は距離が離れていて高い  $p_T$  においても判別が可能 なため、閾値を約  $20{\rm GeV}$  とする。同様に  $\delta r, \delta \phi$  を求め、コインシデンスマトリックスによる判別が行われる。閾値を超えたものは  ${\rm HPT}({\rm High}\ p_T)$  トリガーと呼ばれる。
- 4. LPT 及び、HPT 情報はセクターロジックに送られ、6 段階の閾値による  $p_T$  判別が行われる。ここで初めてワイヤーとストリップの情報が統合され、 $\delta r,\delta \phi$  の組合せからより正確な  $p_T$  を判断する。そのために、シミュレーションを用いて  $p_T$  による  $\delta r,\delta \phi$  の分布を調べ、各閾値に対するコインシデンスウィンドウを作成する。これまでの段階と違いウィンドウは四角ではない複雑な形となり、ジオメトリーの影響から同じ閾値でも各トリガーサブセクター毎に形が異なる。ウィンドウに基づき、全ての  $\delta r,\delta \phi$  の組み合わせに対して、どの  $p_T$  閾値を超えるかをテーブル化し、これを参照して  $p_T$  を判別している。このテーブルを LUT(Look Up Table) と呼ぶ。参照する LUT を変えることで、6 段階の閾値は如何様にも変えることができる。セクターロジックは 2 トリガーセクター毎に 1 つあり、1 つのセクターロジックが各閾値毎に最大 2 つのデータを MUCTPI に送る。このデータを SL トリガーと呼ぶ。HPT トリガーが 1 つ以下の場合は LPT トリガーが 1 のないでは、 最近におけるカーブが急激なほどいいウィンドウと言える。

# 3.3 TGC システムのデータ読出し系

TGC 検出器から出た信号は、TGC エレクトロニクスシステムで処理され、最終的にセクターロジックで TGC システムとしてのレベル 1 トリガーの発行を決定する。エレクトロニクスシステムには

- 1. 40MHz の高クロックに同期した動作が可能であること。
- 2. トリガーの発行 + 各種検出器へのトリガー配信にかかる時間が  $2.5\mu s$  以下であること。
- 3. ATLAS 実験ホールの強い放射線環境下で 10 年以上安定動作可能な高い耐放射線 性を持つこと。

という条件が課される。この条件を満たすために一部のモジュールでは既製品ではなく、 ASIC と呼ばれる専用に開発した集積回路を用いている。以下ではエレクトロニクスシス テムを構成する各モジュールの実験ホール内における配置および機能について述べる。

# 3.3.1 TGC エレクトロニクスシステムの構成

TGC エレクトロニクスシステムは次の3つに大別される。

トリガー系 25nsec 毎に流れるトリガー判定の為のデータを扱う。 リードアウト系 L1A が来ると読み出される TGC 各層でのヒット位置情報を扱う。 コントロール系 TGC の各モジュールをコントロールするための情報を扱う。

システムの全体像を図 3.23 に示す。赤線、青線、緑線はそれぞれトリガー系、リードアウト系、コントロール系を表す。

ビッグウィールでミューオンが検出されると、それらの信号は ASD(Amplifier Shaper Discriminator) で増幅、デジタル化され、PSB(Patch panel Slave board asic Board) 上にある PP(Patch Panel ASIC) へと送られる。PP ではチェンバー毎のケーブルディレイ差分などを調整し、データを、同じく PSB 上にある SLB(Slave Board ASIC) へと送る。SLB ではまずトリガー処理がなされ、そのトリガーはワイヤならワイヤー HPT(Wire High  $p_T$  Board) へ、ストリップならストリップ HPT(Strip High $p_T$  Board) へ送られる。トリガーを処理している間、データは SLB 中のレベル 1 バッファに溜められる。トリガー情報は HPT において r 方向と  $\phi$  方向についてそれぞれコインシデンスが取られ、SL(Sector Logic) へと送られる。SL で r 方向と  $\phi$  方向の情報が合わさり、MUCTPI へ送られる。そしてそのトリガー情報を元に L1A 信号が発行されると、TTC を通して SLB にも L1A が送られ、L1A を受け取った SLB はレベル 1 バッファに溜めてあったデータをデランダマ

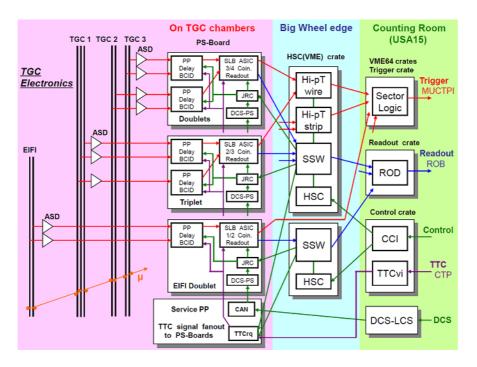


図 3.23 TGC エレクトロニクスシステムの構成 [16]

イザを通じて SSW(Star Switch) へと送る。SSW ではデータの圧縮などを行い、そのデータが ROD(Readout Driver) を通り ROB(ReadOut Buffer) へと送られる。そしてこれらのシステムのコントロールは HSC(High  $p_T$  Star Switch Controller Board) や CCI(Control Configuration Interface Board) といったモジュールを通して行われる。トリガー、リードアウト、コントロール系についてそれぞれ以下で説明を加える。

#### 3.3.1.1 トリガー系

トリガー系では図 3.24、図 3.25 に示すように、ASD, PP、SLB、HPT、SL の順に信号が処理される。TGC 検出器から出力されるアナログ信号は、検出器の読出し口に付けられた ASD によって、増幅、整形、デジタル化され、LVDS(Low Voltage Differential Signaling) 信号の形式で PP へと送られる。PP では、検出器上の各チャンネルへ粒子が到達するまで の飛行時間である TOF(Time of Flight) 差や、ケーブル長の差などから生じるタイミング のずれを調整し、バンチ識別を行う。SLB は PP からの信号を受け取り、TGC3 と TGC2 のダブレット合計 4 層の信号に対して 3/4(3 out of 4) コインシデンス処理が行われ、LPT トリガーの判定が行われる。またトリプレットの信号についても、まずはトリプレット独立でワイヤーが 2/3、ストリップが 1/2 のコインシデンス処理が行われる。HPT では SLB によるダブレットとトリプレットのコインシデンス処理の結果を合わせて、コインシデンス処理を行い HPT トリガー判定がなされる。次に SL で、ワイヤとストリップを合わせたコインシデンス処理を行い、TGC の最終的なトリガー情報として、 $p_T$  の大きい最大 2 つのトリガーデータを 1/12 セクター毎に選び出す。SL の結果は、MUCTPI に送られ、

RPC の情報と合わせて、ミューオンの最終的なトリガー判定が下される。

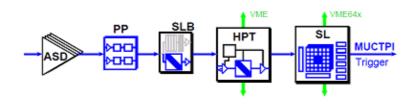


図 3.24 トリガーラインのモジュール構成 [16]

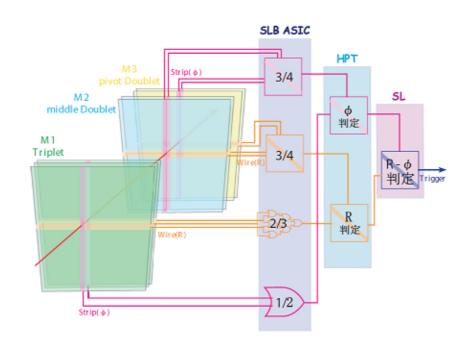


図 3.25 コインシデンス処理によるトリガー判定 [16]

#### 3.3.1.2 リードアウト系

リードアウト系の流れを図 3.26、図 3.27 に示す。PP から送られてきたデータは、SLB 中にあるレベル 1 バッファに蓄えられ、最大 128clk( $3.2\mu$ s) の間 L1A 信号を待つ。L1A 信号を受けたデータのみがデランダマイザを通じて、次段の SSW へと送られる。SSW はマルチプレクサーの役割を担っていて、複数の SLB からのデータを収集し、ゼロサプレスという方法で圧縮を行った上で、G-link 規格の光信号でエレキハットの ROD まで送る。このとき、SLB によるコインシデンス処理の結果で表すトリガー情報も生データと共に SSW、ROD へと送られる。ROD は複数の SSW からの情報を収集し、それらのデータと TTC から送られてくるバンチ ID やトリガー ID の情報との整合性を確認した上で ROB にデータを渡す。

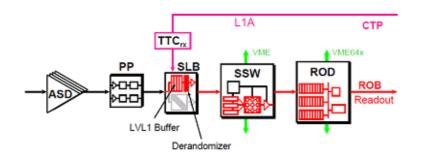


図 3.26 リードアウトラインのモジュール構成 [16]

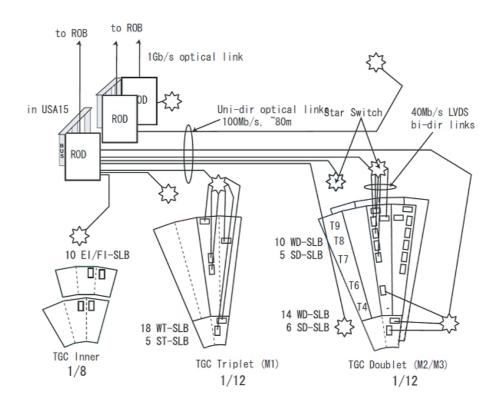


図 3.27 リードアウトデータの流れ [16]

## 3.3.1.3 コントロール系

ATLAS 実験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) が導入されている。TGC の場合は、ADC(Analog-Digital Converter)、DAC(Digital-Analog Converter)、eLMB(embedded Local Monitor Box) などを搭載した DCS カードが、実験ホール内のフロントエンドにある PSB 上に配置される。HPT や

SSW が搭載される VME \*<sup>1</sup>規格の HSC クレートは実験ホール外の CCI から HSC を介してコントロールされ、PSB 上の PP/SLB の設定は SSW を通して行う。また TGC では、DCS は温度状態管理や供給電源の監視に加えて、通常 SSW から行われる PP/SLB の設定を eLMB から行うことが可能で、バックアップの設定経路となる。また、PSB 上には JTAG \*<sup>2</sup>プロトコルの PP/SLB への経路選択を行うために JRC(JTAG Routing Controller)が設置される。図 3.28 にコントロール系のイメージ図を示す。

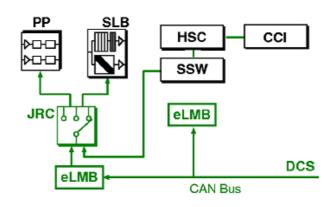


図 3.28 コントロール系の信号の流れ [16]

# 3.3.2 TGC エレクトロニクスの設置

TGC エレクトロニクスの設置場所は以下の 3 箇所に大別される。図 3.23 の背景の色は 設置場所を示している。

## 1. 実験ホール内の検出器上(図のピンク)

ASD はチェンバーの読出し口に直付けされている。複数の PSB をまとめたものである PS Pack はチェンバーの面上に図 3.29 の様に設置され PP 及び SLB はこの PSB 上に載っている ASIC である。トリプレットは衝突点側の面上に、ダブレットは TGC3 の衝突点と反対側の面上に設置される。

#### 2. ビッグウィールの端 (図の水色)

ビッグウィールの外縁には、HSC、HPT、SSW が搭載された、HSC クレートが

<sup>\*1</sup> VME とは、Versa Module Europe の略で、IEEE で規格化された産業用の標準バスである。96 ピン DIN コネクタを実装した 32 ビットバスで最大通信速度は 50MB/sec であり、高エネルギー物理の分野でも一般的に用いられている。

<sup>\*&</sup>lt;sup>2</sup> IC の検査方式の一種で、チップ内部にプローブテストと同様の挙動を行なう JTAG ボードと呼ばれる端子およびレジスタを構成し、外部からテストコードを入力してそれに対する IC の挙動を調査する方法。また、JTAG に対応した回路と TAP(Test Access Port) と呼ばれる 5 本の端子からなるインターフェイスを持たせ、テストデータの入出力や制御に用いることができる。

設置される。HSC クレートは 1/12 セクターにつき 1 台設置される。

## 3. カウンティングルーム (図の緑色)

USA15 と呼ばれるカウンティングルームに VME64x クレートが置かれ、CCI、SL、ROD が搭載される。

初めの 2 箇所は UX15 と呼ばれる実験ホール内にあたるため、ここに設置されるモジュールは強い放射線耐性を要求される。そのため放射線耐性がある Antifuse FPGA(Field Programmable Gate Array) といった IC が用いられる。カウンティングルームは実験ホールからコンクリート壁を隔て  $90 \sim 100$ m 離れているため、放射線耐性は要求されない。距離の離れた UX15 と USA15 間での信号送信は基本的に光信号が用いられる。図 3.31 と図 3.30 に各モジュールの設置場所のイメージ図を示す。

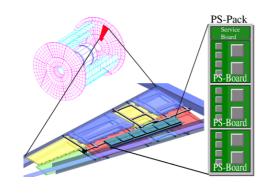


図 3.29 ビッグウィール上に設置される PS Pack[16]

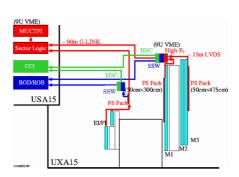


図 3.30 モジュールの配置 [16]

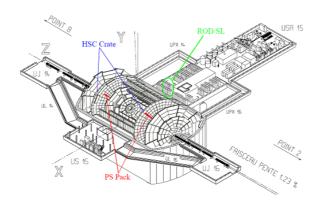


図 3.31 実験ホール (UX15) とカウンティングルーム (USA15) の位置関係 [16]

ROD と SL は USA15 の中でも検出器に最も近い壁を隔てたすぐのところにあるラックに設置される。これはトリガーに関与する検出器の信号の伝搬遅延を出来るだけ小さくするためである。

# 3.3.3 モジュールとエレクトロニクスの詳細

#### 3.3.3.1 ASD (ASD Board)

ASD はチェンバーの読出し口に直に取り付けられる。1 つのモジュールには ASD ASIC が 4 つ搭載され、ASIC1 つで 4 チャンネル分の信号処理が出来るため、1 モジュールで 16 チャンネル分の処理を行う。ASD ASIC は、チェンバーからのアナログ信号を増幅、整形し、ある閾値電圧を越えた信号に対してのみ LVDS 信号を出力する。また、ASD 以降のエレクトロニクスの動作チェックやタイミング調整のため、テストパルストリガーを受け、擬似的な TGC の出力信号 (テストパルス) を出力する機能も持っている。ASD は、後述する PP ASIC が設置される PSB とツイストケーブルで接続され、動作電源、閾値電圧、テストパルストリガーは全て PSB から供給される。また、ASD には 16 チャンネル目のアナログ信号をモニタするためのアナログ出力もついている。図 3.32、図 3.33 に ASD ボードの写真と ASD ASIC のブロック図を載せる。

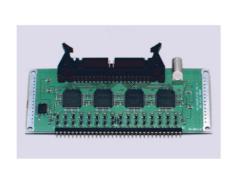


図 3.32 ASD ボードの写真 [16]

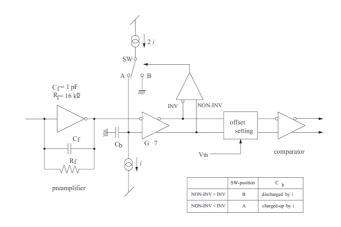


図 3.33 ASD ASIC のブロック図 [16]

#### 3.3.3.2 PSB(Patch panel Slave board asic Board)

PSB 上には図 3.34 に示すように、PP ASIC、SLB ASIC、JRC、eLMB が搭載される。 PSB では、ASD からの LVDS 信号を PP で受け、タイミング調節とバンチ識別を行い、TGC のオーバーラップ領域でのダブルカウントを防ぐための OR 論理回路を通して、SLB へ送られる。SLB でデータはトリガー系と読み出し系に分かれ、トリガーデータは HPT へ、読み出し用データは SSW へと、それぞれシリアライズされて LVDS 信号で送られる。また SSW あるいは eLMB から送られてくる PP/SLB を制御するための JTAG 信号は、JRC により PSB に設置される各 ASIC に分配される。さらに PSB は、ASD に電源電圧と閾値電圧を供給する役割も果たす。 PSB は後述する SPP(Service Patch Panel) を通して、TTC(Timing Trigger Control) によって供給される LHC グローバルの 40.08MHz のク

ロックや、各種リセット信号、テストパルストリガー信号等を受け取る。図 3.35 に PSB の写真を示す。

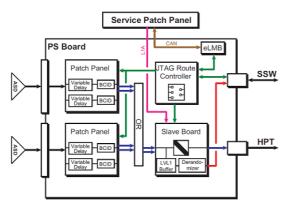




図 3.34 PSB のブロック図 [16]

図 3.35 PSB の写真 [16]

## 3.3.3.3 PP (Patch Panel ASIC)

ASD から送られてくる信号は、TOF 差やケーブル長差などで到達時間にずれが生じる。そこで、PP でタイミング調整とバンチ識別を行う。具体的には、ASD からの LVDS 信号を LVDS レシーバーにより CMOS レベルの信号に変換する。次に可変ディレイ回路で、各チャンネルにそれぞれ 0~25ns の範囲でディレイをかけることによりタイミングの調整を行う。このディレイは 25/31ns 単位で調節可能であり、ファインディレイと呼ばれる。タイミング調整された信号は BCID(バンチクロッシング ID) 回路に入り、TTC から供給される LHC クロックと同期が取ることでバンチ識別が行われる。最後に TGC のオーバーラップ部分のダブルカウントを防ぐため OR 論理回路を通し、同じ PSB 上の SLB に送られる。また PP は、ASD に向けてテストパルス発生の命令を下すテストパルストリガーを発行する回路も搭載している。テストパルスの振幅、タイミングは可変であり、JTAG プロトコルによって制御される。PP は一つの ASIC で 32 チャンネルを処理できる。図 3.36 に PP ASIC のブロック図を示す。

#### 3.3.3.4 SLB ASIC

SLB ASIC はトリガー部とリードアウト部にわけられる。SLB ASIC のブロック図を図 3.37 に載せる。以下、それぞれ分けて説明する。

#### トリガー部

担当する検出器に応じて (ワイヤー or ストリップ)×(ダブレット or トリプレット) に加えて EI/FI 用の 5 種類のコインシデンスマトリックスを切替えて使用する。図 3.38 にマトリックスのブロック図を示す。コインシデンスウィンドウは、ワイヤが  $\pm 7$ 、ストリッ

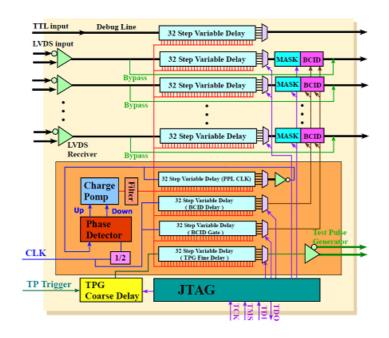


図 3.36 PP のブロック図 [16]

プが  $\pm 3$  であるが、ただし単位は TGC 一層における読出しチャンネルではなくて、スタッガリングを考慮したグラニュラリティに相当する 1/2 または 1/3 チャンネルである。トリプレット、ダブレットにはそれぞれ 2/3(ストリップは 1/2)、3/4 のコインシデンス条件が課される。また PP からの信号に 1/2 クロック単位でディレイをかける機能、チャンネル単位でマスクする機能、SLB 以降のエレクトロニクスの動作チェックやタイミング調整を行うためのテストパルスを出力する機能なども搭載されている。連続したチャンネルにヒットがあった際には、その中の 1 チャンネルを選択してトリガー判断に用いるようになっておりデクラスタリングと呼ぶ。デクラスタリングの概念を図 3.39 に示す。設定は JTAG 信号で行われる。

#### リードアウト部

リードアウト部は、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部分である。レベル 1 バッファとデランダマイザにより構成される。チェンバーからのデータは、コインシデンス処理後のトリガーデータを含めてレベル 1 バッファと呼ばれる、212bit×128 段のシフトレジスタに一旦蓄えられる。212bit の内訳はチェンバーからの入力データ 160bit、トリガーデータ 40bit、バンチ ID や L1AID 等のタグが 12bit となっている。このデータは CTP からの L1A を受け取るまで保持され、L1A を受け取ると該当するバンチのデータとその前後 1 バンチずつの、計 3 バンチ分のデータにそれぞれ、イベントカウンタの値 (4bit) が付加されデランダマイザにコピーされる。デランダマイザにコピーされた 3 バンチ分のデータは別々にシリアル変換し SSW に送られる。

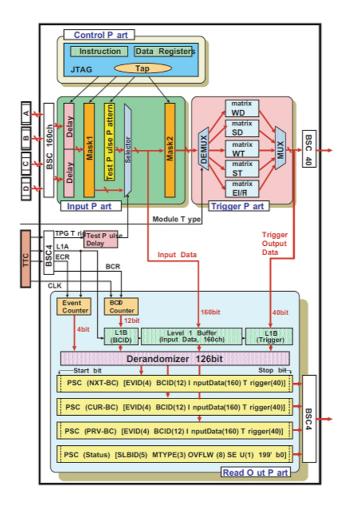


図 3.37 SLB のブロック図 [16]

#### 3.3.3.5 JRC(JTAG Routing Controler)

JRC は 2 系統の入力ポートと 7 系統の出力ポート、それらをコントロールするための 2 系統の JTAG ポートを持つスイッチングルータである。それぞれのラインは、TRST、TCK、TMS、TDI、TDO の 5 つの信号から成る。2 系統の入力ポートは SSW と eLMB からのもので、図 3.40 のように CA JTAG(または CB JTAG) が JRC 内のスイッチをコントロールすることで、Q1  $\sim$  Q7 のポートのうち 1 つを選択して DA JTAG(または DB JTAG) の信号をそのまま出力する。JRC は、PP/SLB にアクセスするためのインターフェイスであり、PP/SLB の設定は JRC を中継して行われる。7 系統の出力ポートは、4 つが PP  $\sim$  のもので、3 つが SLB  $\sim$ 0 ものである。JRC は Antifuse FPGA が使われている。

# 3.3.3.6 TGC DCS (TGC Detector Control System)

TGC DCS ボードは eLMB と呼ばれるサブモジュールを使用し、ADC(Analog-DigitalConverter) や DAC(Digital-Analog Converter) が搭載され、センサーからの信号を

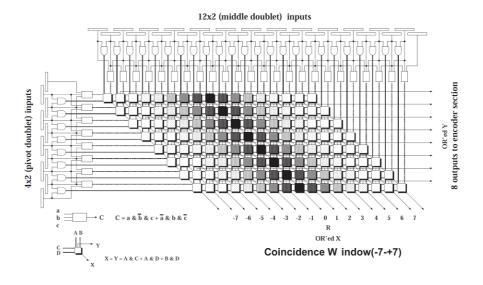


図 3.38 ダブレットワイヤーのコインシデンスマトリックス [16]

デジタル化してモニタし、制御用のアナログ信号を作り出せる。具体的には、温度モニタ、エレクトロニクスの電圧、電流モニタ、チェンバー位置モニタ、TGC のアノードワイヤーに印加する HV(High Voltage) 電源電圧のモニタとコントロール、ASD の閾値電圧の設定などを行う。eLMB は CAN バスを\*3通じてデータの読み書きが行われる。

#### 3.3.3.7 SPP (Service Patch Panel Board)

SPP には TTC の信号を受信する機能を持つ TTCrx(Timing Trigger Control レシーバー) が載せられ、TTC から LHC クロック、L1A、BCR(Bunch Counter Reset)、ECR(Event Counter Reset)、テストパルストリガー等の信号を受け取り、それらの信号を 10 又は 17 枚の PSB に分配する。SPP には、TTCrx の設定を行うために 12C プロトコルを受信する CAT6(Categoly 6) ケーブルのポートが搭載されている。また、HPT クレートへクロック とリセットを供給する CAT5 ケーブルのポートが搭載されている。図 3.42 に SPP の写真 を載せる。

#### 3.3.3.8 PS Pack

PSB と SPP は、図 3.43 に示すような PS Pack にまとめられ、TGC1 の衝突点側の面、及び TGC3 の衝突点の反対側の面に設置される。PS Pack は 1/12 セクター毎に 2 つ設置され、1 つの SPP と複数の PSB(トリプレットは 10 枚、ダブレットは 17 枚) から構成される。

<sup>\*&</sup>lt;sup>3</sup> CAN(Controller Area Network) はマルチマスターのシリアルバスシステムで、アドレスの概念がなく、送 信側は識別子を付けてメッセージを配信し、受信側はその識別子を見てメッセージを受信するかを決める プロトコル。

#### Rule for Declustering

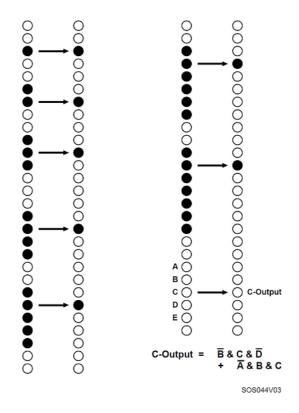


図 3.39 デクラスタリングのイメージ [16]

#### 3.3.3.9 HPT (High $p_T$ Board)

HPT はダブレットとトリプレットの情報を用いて HPT トリガー情報を生成する。HPT はまず、PSB から送られてきたシリアライズされたデータの LVDS 信号をパラレルに変換する。HPT では、SLB まで独立に処理されてきたダブレットとトリプレットのデータを統合して HPT トリガー情報を生成する。トリプレットはダブレットよりも衝突点に近く、しかもダブレット同士の間隔よりも離れた位置に設置されているため、トリプレットを用いることによりトロイダルマグネットによってあまり曲げられることがなかった高  $p_T$  を持つミューオンを選別できる。HPT ではワイヤとストリップは独立に処理が行われ、 $\delta r,\delta \phi$  を求め、SL に出力する。図 3.44 にワイヤー、図 3.45 にストリップのブロック図を載せる。出力データはシリアライズされ、オプティカル信号に変換されて、光ファイバーで実験室ホールから  $90 \sim 100$ m 離れたカウンティングルーム (USA15) に設置される SL に送信される。HPT はエンドキャップ領域用のワイヤーとストリップ用、フォワード領域用の計 3 種類作られる。1 枚のボード上には、フォワード領域用には 3 つ、エンドキャップ領域用には 4 つの HPT ASIC が搭載される。図 3.46 に HPT ボードの写真を示す。

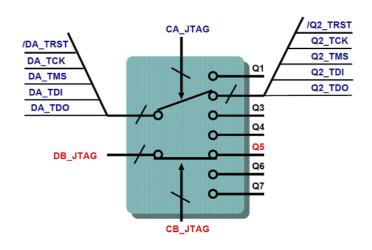


図 3.40 JRC によるルートのスイッチングのイメージ [16]



図 3.41 DCS の写真 [16]

### 3.3.3.10 SL (Sector Logic)

SL は TGC システムのトリガーデータが最終的に集められるモジュールであり、1 つのモジュールでトリガーセクター 2 つ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。まず SL は、HPT から送られてきたシリアライズされたオプティカル信号を受け取り、電気信号に変換し、さらにパラレル変換をする。そして、HPT まで独立に処理されていた r 方向 (ワイヤー) と  $\phi$  方向 (ストリップ) の HPT からのデータを合わせ、両者のコインシデンス (r- $\phi$  コインシデンス) を取ることにより、ミューオンのトラックを構築する。それらのトラックを、 $SSC(Sub\text{-}Sector\ Cluster:R\ 方向に <math>2$  つ、 $\phi$  方向に 4 つのサブセクターのあつまり) ごとに 6 段階の  $p_T$  閾値によって分類する。閾値は興味のある物理により実験中に自





図 3.42 SPP の写真 [16]

図 3.43 PSPack の写真 [16]

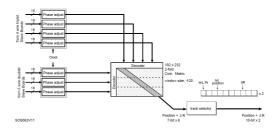


図 3.44 ワイヤー HPT のブロック図 [16]

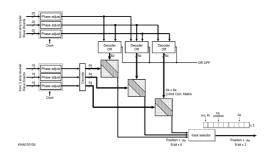


図 3.45 ストリップ HPT のブロック図 [16]

由に変更出来ることが要求されるため、書き換え可能な LUT(Look Up Table) によって実装される。プレトラックセレクターは、6 段階の  $p_T$  判定のそれぞれに用意され、 $p_T$  の大きい順に 2 つを選択して、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 1 トリガーセクター分のトラックから  $p_T$  の大きいものを 2 つ選択して、6 段階の  $p_T$  判定と位置情報を MUCTPI に送る。このロジックは FPGA に書き込まれる。SL が処理に使用した HPT からのデータと SL での処理の結果は、SL に搭載された SLB(SLSLB) から USA15 に設

置された SSW に送られる。SL には各セクタに対して一つずつ SLSLB が搭載され、JRC も搭載される。図 3.47 に SL の写真、図 3.48 にブロック図をのせる。



図 3.46 HPT ボードの写真 [16]

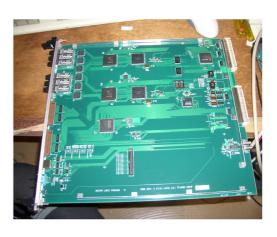


図 3.47 SL ボードの写真 [16]

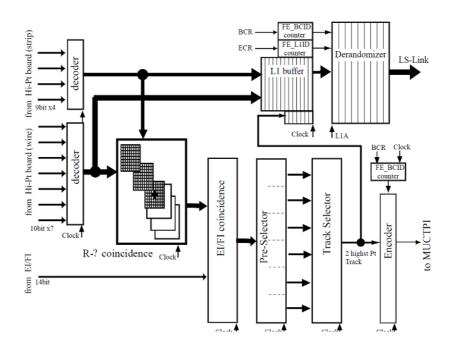


図 3.48 SL のブロック図 [16]

#### 3.3.3.11 SSW (Star Switch)

SSW の主な役割は、複数の SLB から送られてくるリードアウトデータを圧縮し、ROD にデータを送る前にデータ量を減らして、効率よい読み出しができるようにすることである。具体的なデータ圧縮は、データをセルと呼ばれる 8bit ごとの塊に分け、各セルにアドレスを付加し、値が全てゼロでないセル情報だけをアドレスと共に送る。TGC の全チャンネルのうちヒット信号を発生するのはごく一部なので、これによりデータを減らすことが出来る。1 つの SSW で最大 23 個の SLB のデータを受ける。SSW はまず、SLB からの LVDS レベルのシリアライズされたデータを受け取り、それをパラレルのデータに変換する。そのデータは SSWrx(レシーバー) に送られ、データの圧縮が行われる。その後データは、SSWtx(トランスミッター) に送られ、フォーマットされる。フォーマットされたデータはシリアライズされ、オプティカル信号に変換されて  $90 \sim 100$ m 離れた USA15にある ROD に送られる。また SSW は、PSB 上の PP、SLB に JTAG プロトコルによってレジスタ設定と、I2C による SPP 上の TTCrx の設定も行う。図 3.49 に SSW の写真を載せる。

#### 3.3.3.12 ROD (Read Out Driver)

ROD は TGC エレクトロニクスシステムの中でリードアウトのデータが最終的に集まるモジュールである。ROD は複数の SSW からシリアライズされた圧縮データを光ファイバーを通して受け取り、オプティカル信号を電気信号に変換した後、パラレル変換し、FIFO メモリーに一時格納する。このデータを、トリガー情報を元に同じイベントごとにまとめ、決められたフォーマットに従い、ヘッダー、トレーラーをつける。まとめられたデータは S-link という、フロントエンドとリードアウトのエレクトロニクスを繋ぐために CERN で開発された光信号の規格によって ROB に送信される。イベントの同定やヘッダー、トレーラーをつけるためには TTC からのトリガー情報が必要となるため、ROD には TTCrx が載せられたメザニンボードが搭載され、これにより TTC からの信号を受け取ることができるようになっている。ROD は 100kHz でこれらの処理ができるように求められている。図 3.50 に ROD の写真を載せる。

#### 3.3.3.13 HSC(High $p_T$ Star Switch Controller Board)

HSC は HPT、SSW と同じ HSC クレートに載せられる、VME マスターモジュールである。後述する CCI と光ファイバーで結ばれ、CCI からの命令を受け取る。命令を受け取ると、命令に対応した処理を行い、その後 CCI へ応答を返す。命令は HPT や SSW に対するもので、命令を受け取ると VME バスを支配しスレーブモジュール (HPT、SSW) に対して命令を伝える。また VME バス以外に JTAG バスも使用されている。このため







図 3.50 ROD の写真 [16]

HSC には、CCI との情報のエンコード、デコードのために 2 種類の機能が用意されている。ひとつは PPE(Primary Protocol Encoder) という JTAG 用のもので、リセットや JTAG のコントロールを行う。もう一方は SPE(Secondary Protocol Encoder) という VME 用のもので、VME のコントロールを行う。図 3.51 に HSC の写真を載せる。

### 3.3.3.14 CCI (Control Configuration Interface Board)

CCI はローカルホストからの命令を受け取り、命令専用レジスタに格納したあと HSC へと送信する。一方、HSC からの応答は、応答専用レジスタに格納されローカルホストが読み出す。これら以外にも状態監視用のレジスタや VME 優先割り込み用のレジスタが用意され、これらは VME 経由でアクセスすることが可能である。図 3.52 に CCI の写真を載せる。



図 3.51 HSC の写真 [16]



図 3.52 CCI の写真 [16]

### 3.3.4 TGC エレクトロニクスシステムのコントロール

TGC エレクトロニクスはそれぞれの動作が 25ns に同期して動作を行うように設計をされている為、ランの最中に内部の設定値を動的に変化をさせる事は無理である。その為、ラン開始前に全ての設定を行い、ラン開始後には制御を行わなくても動作するように設計がされている。つまり、TGC エレクトロニクスのコントロールソフトウェアもそれぞれのハードウェアをラン開始前に初期設定を行うように設計される必要がある。また、エレクトロニクスの設定では設定する順序が重要であり、次のように決められている。

- 1. TTC を初期化する。
- 2. 各モジュールのリセットをしてレジスタを初期化する。
- 3. CCI→SSW→PSB の順に設定をする。これは、CCI-HSC の先に SSW があり、SSW の先に PSB があるという構造のためである。
- 4. TTC の設定をする。
- 5. ROD の FIFO のクリア。これはコンフィギュアの最中に出てしまった SSW からの データを消すためである

0

図 3.53 は TGC エレクトロニクスのコントロールパスを示している。エレクトロニクスはクロックや ECR 等の TTC 信号による早いコントロール (赤線) と、JTAG、VME アクセスによるレジスタの設定の遅いコントロール (緑線) の二系統から成る。これら二系統の信号を SBC(Single Board Computer) からの VME アクセスによって制御する。

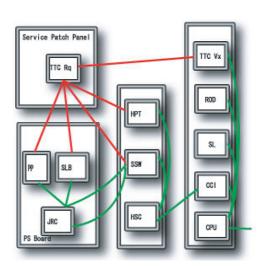


図 3.53 TGC エレクトロニクスのコントロールラインの概念図 [16]

SBC→CCI→HSC→SSW→JRC の流れでコントロールが行われる。

# 第4章

# TGC システムの構築と検査

TGC システムは 3498 層のガス検出器と、多数のエレクトロニクスからなる複雑で巨大なシステムである。要求される性能水準を満たし各部品を量産するのには大変な労力と時間が必要がかかった。現在、全ての検出器とエレクトロニクスの生産は完了し、ATLAS 地下実験ホールへインストール済みである。この章では、初めに TGC システム構築の歴史について述べる。次にセクター単位での地上動作試験及び、地下実験ホールへのインストールについて概要を説明する。最後に地下実験ホールにおける動作試験と試運転について述べる。

## 4.1 TGC システム構築の歴史

TGC システムは 1998 年にエレクトロニクスの開発がスタートしてから 10 年の月日をかけ、2008 年に全ての検出器とエレクトロニクスの生産及び、地下ホールへのインストールを終えた。図 4.1 に、その概観を示す。

### 4.1.1 エレクトロニクスの開発と量産

TGC システムのために日本グループで 7 種のエレクトロニクスモジュール (ASD,PSB,SSW,HPT,SL,HSC,CCI) と、それに載る 4 種の ASIC(ASD,PP,SLB,HPT) の開発が行われた。(各モジュールの詳細は第 3 章を参照。) モジュールの検査は主に日本の KEK、林栄精器、一部は CERN へ輸送後に行われた。地下実験ホール (UX15) に設置されるものは 2007 年に検査が完了し実際にインストールされた。2008 年にはカウンティングルーム (USA15) に設置されるものも含め全モジュールのインストールが完了し、TGC システムが組み上がった。ROD はイスラエルグループによって開発され、ハードウェアとしては完成しているが FPGA に書き込まれる論理にまだバグがあり完成を急いでいる。表 4.1 に TGC エレクトロニクスで用いられるモジュールの一覧を載せた。

### History of TGC System 1998 1999 2000 2001 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2002 2003 エレクトロニクスの開発と量産 TGC の量産 セクター組み立て commissioning 2008 年春学会 (24aZJ02 高橋など) 4 種類の ASIC を開発 TGC 量産@KEK Big Wheel 7種類のボードを製作 1/12 セクター組み立て@CERN 2008 年春学会 (24pZE03 石野) 2008 年春学会 (24pZE04 佐々木)

図 4.1 TGC 構築の歴史 [39]

表 4.1 TGC エレクトロニクスのモジュール一覧

モジュール名	必要な数
ASD	20704
PSB	1344
SSW	224
НРТ	192
SL	72
HSC	30
CCI	30
ROD	24

### 4.1.2 ガスチェンバーの開発と量産

ガスチェンバーは、LEP の OPAL 実験で使われていたものを基に日本グループにより設計され (3 参照)、約 6 年かけて量産と単体の動作試験を終えた。表 4.2 にチェンバーモジュールの一覧を示す。必要なモジュール数が約 1600 枚と多いため、量産は日本、イスラエル、中国の 3 グループにより分担して行われた。日本の KEK で行われたチェンバー製作の様子を図 4.2、図 4.3、図 4.4 に示す。検査は日本の場合は神戸大学で行われ、ガスリーク検査、宇宙線による検出効率試験、修復等が行われた。図 4.5、図 4.6、図 4.7 に神戸大学における検査、修理の様子を示す。



図 4.2 KEK における TGC の量産 1[22]



図 4.3 KEK における TGC の量産 2[22]



図 4.4 KEK における TGC の量産 3[22]



図 4.5 神戸大学におけるガ スリーク修理の様子 [42]

クリーナーでゴミをとった後に、圧 着する。



図 4.6 宇宙線を用いた検出 効率試験システム [42]

チェンバーの上下にシンチレーター と直交した 2 層のドリフトチューブ を配置し宇宙線の通過位置を求め、 対応チャンネルの挙動を見る。

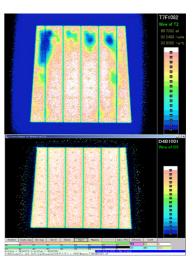


図 4.7 検出効率試験の結 果。[42]

上段:悪い例、下段:良い例。

表 4.2 ATLAS に必要な TGC モジュールの一覧

トリプレットモジュールは 3 層、ダブレットモジュール 2 層の TGC からなる。ただしトリプレットモジュールの中央の層はカソードストリップの読出しがないので、読出しは 2 層となる。TGC システムはモジュール総数 1578 枚、チェンバー総数 3498 層、チャンネル総数 318112 個の巨大システムである。実際には予備として少し多目に製作されている。各モジュールの配置に関しては図 3.12 を参照。T1 Triplet2 層目,T3 Triplet1 層目,T6 Triplet1 層目のワイヤーは他の層と 1 つだけチャンネル数が異なる。

TGC モジュール名	使用枚数	チャンネル数、層数			
		ワイヤー	層	ストリップ	層
T1 Triplet for TGC1	48	105(L2:104)	3	32	2
T3 Triplet for TGC1	96	91(L1:92)	3	32	2
T6 Triplet for TGC1	96	62(L1:61)	3	32	2
T7 Triplet for TGC1	96	23	3	32	2
T8 Triplet for TGC1	96	24	3	32	2
T2 Doublet for TGC2	48	125	2	32	2
T4 Doublet for TGC2	96	110	2	32	2
T6 Doublet for TGC2	96	103	2	32	2
T7 Doublet for TGC2	96	32	2	32	2
T8 Doublet for TGC2	96	32	2	32	2
T9 Doublet for TGC2	96	32	2	32	2
T2 Doublet for TGC3	48	122	2	32	2
T5 Doublet for TGC3	96	96	2	32	2
T6 Doublet for TGC3	96	106	2	32	2
T7 Doublet for TGC3	96	32	2	32	2
T8 Doublet for TGC3	96	32	2	32	2
T9 Doublet for TGC3	96	31	2	32	2
T10 Doublet for FI	32	32	2	32	2
T10S Doublet for FI	16	30	2	32	2
T11 Doublet for EI	26	24	2	32	2
T11S Doublet for EI	16	16	2	32	2
総計	1578	217120		100992	

### 1/12 セクター及びスモールウィールの組立

各国から CERN へ輸送された TGC モジュールは、ビッグウィールの場合、地上で 1/12 セクターの状態まで組立てられた後に地下実験ホールヘインストールされた。EI/FI は EI のみ先に地下ホールへ搬送され ATLAS に組み込まれ、FI は 24 枚を円盤状 (スモー ルウィール) にしてから円盤ごと地下に搬送された。1/12 セクター及びスモールウィー ルの組立は CERN の Meyrin site 内にある Bat.180 及び Bat.191 で行われた。図 4.8 に Bat.180、Bat.191、ATLAS 実験ホールの位置関係を示す。

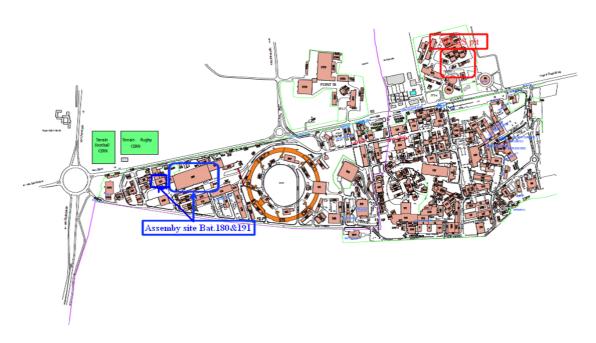


図 4.8 CERN の Meyrin site の地図 [39]

図中に青で示した Bat.180 でビッグウィール 1/12 セクターの、Bat.191 でスモールウィールの組立が行われた。 赤で示した ATLAS Pit が ATLAS 地下実験ホールのある場所である。



図 4.9 セクターの組 立 1[22]

ス.LV.HV の配線を行う。



図 4.10 セクターの 組立 2[22]

水平状態で構造体組立、ガ 垂直状態で構造体にチェン 組み立てが終わり検査を待 バーモジュールを取付。



図 4.11 セクターの 組立 3[22]

つ 1/12 セクター。



図 4.12 セクターの 組立 3[22]

組立てられ検査を待つス モールウィール。

### 4.2 地上動作試験

地下実験ホールへチェンバーをインストール後は各部へのアクセスが困難となるため可能なところまで地上で組立をし、動作検証を済ませておくことが望ましい。そのために前述の通り、ビッグウィールは 1/12 セクター、FI はスモールウィールの状態まで地上で組立てを済ませた。地上動作試験も組立てたのと同じ単位で、同じ場所で行われた。

試験はテストパルスと宇宙線を用いて行われ、それぞれ表 4.3 に示した項目を検査する。 ただし、TGC2 に関してはセクター上に PSB がない (TGC2 用の PSB は TGC3 の PSPack に搭載される) ため、Universal Board \*1を一時的に接続してやり、配線チェックのみが行われた。また EI に関しては、ATLAS の構造上、地下ホールへのインストールが非常に初期だったために、地上動作試験を行うことが出来なかった。

表 4.3 地上動作試験の検査項目

地上動作試験は、SLB テストパルス試験、ASD テストパルス試験、宇宙線試験の 3 つにわけられ、1 つのセクター、またはスモールウィールに対してこの順番で行われる。それぞれ以下の項目を検査する。

	検査項目
SLB テストパルス試験	JTAG による設定変更
	SLB のリードアウト出力
	SLB-SSW 間の接続
ASD テストパルス試験	PP の入出力
	SLB の入力
	ASD の動作
	DCS による ASD への閾値電圧の印加
	ASD-PP 間の接続
宇宙線試験	チェンバーの HV 印加
	SLB のトリガー出力
	チェンバーのチャンネル欠け

<sup>\*1</sup> Universal Board とは、トリプレットやダブレットといった用途に特化する前の基礎設計段階の PSB で、ASIC などはすべて同じで配線のみが異なる。

### 4.2.1 SLB テストパルス試験

SLB テストパルスは、SLB のリードアウト系の hit に関連する出力 160bit を強制的にオール 1 にした出力のことをそう呼んでいる。SLB はテスト用に好きなパターンの 160bit を強制的に出力することが出来るように作られており、TTC からのテストパルストリガー信号を受けて SLB 自身のパイプラインバッファに、設定した 160bit のパターンを入力する。L1A のかわりに TTC から、LHC のビーム周期と同じ約 10kHz の信号を、擬似 L1A として入力してやる。テストパルストリガー信号も擬似 L1A 同じく 10kHz 周期で発行されるが、常にテストパルストリガーの方が固定時間 (仮に X とする) だけ早く発行される。

エレクトロニクスは全て 40.08MHz のクロックで動作しているので、10kHz 周期だと 4000 クロックに 1 回しか SLB へのテストパルス入力がない。SLB のパイプラインバッファからデータを読み出すタイミングに注意する必要がある。PSB 上での信号の遅れを無視した場合、擬似 L1A はテストパルストリガーに対して、"X"だけ遅れて SLB に届く。この時間差の吸収は、SLB の設定値の 1 つである Depth の変更によって行う。Depth とは SLB のパイプラインバッファの何段目を読み出すかという設定であり、クロック単位での変更が可能である。図 4.13 に Depth の概念図を示す。

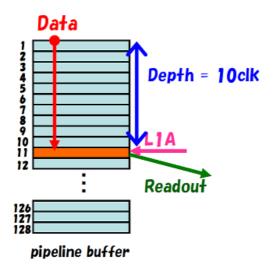


図 4.13 Depth の概念

パイプラインバッファは 1 クロック毎に新しいデータによって前のデータが深い段 (数字の大きい段) に押し出される仕組みになっているので、例えばテストパルスに対して L1A の到着が 10 クロック遅い場合、11 段目を読み出せば対応するテストパルスのデータが取得出来る。SLB のパイプラインバッファは 128 段用意されているので許される時間差は最大で  $3.2\mu s$  である。ATLAS のレベル 1 トリガーのレイテンシーは  $2.5\mu s$  以下となるよう設計されているのでこの深さで十分である。

擬似 L1A を受けた SLB は SSW にオール 1 のデータを送り出し、SSW はこれを Test ROD(地上試験用のテストモジュール) に送り出す。Test ROD は、SSW からの Byte Stream フォーマットのデータにヘッダーとトレイラーを付けるだけでデータ部分には何 も触らないモジュールである。このデータを PC に取り込み解析を行う。

なおビッグウィールの場合、PSB(PP,SLB) はセクターのチェンバー上に設置され、SSW はセクター横にミニラックと呼ばれる HSC クレートを用意し、そこに設置される。TTC、 Test ROD、PC はエレキハットと呼ばれるカウンティングルームに置かれ、ミニラックと の間は FPP  $^{*2}$ を通して光ファイバーで結ばれる。TTC のレシーバーにあたる TTCrq は PSB と一緒にチェンバー上に設置される SPP に載っている。スモールウィールの場合は、PSB、SSW、TTC、Test ROD は全てミニラックに設置され、PC もミニラックと一緒に チェンバーのすぐ横に置かれた。図 4.14、図 4.15 に SLB テストパルス試験のセットアップ及び信号の流れを示す。

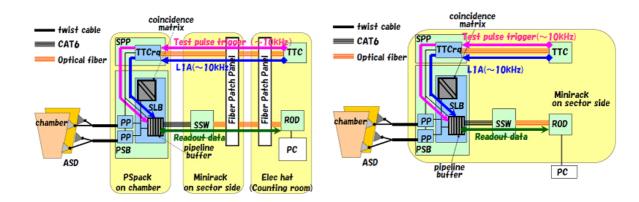


図 4.14 SLB テストパルス試験のセット アップ (1/12 セクター)

図 4.15 SLB テストパルス試験のセット アップ (スモールウィール)

#### 検査の手順は以下の通り。

- 1. PP,SLB,SSW の初期化を行い、PP,SLB が JTAG によって設定出来る事を確認する。
- 2. TTC からテストパルストリガーと、擬似 L1A を発行してデータを取得する。
- 3. データを解析しヒットマップを作り、SLB の出力や SSW との接続に問題がないか 確認する。
- 4. 問題があればまず配線を確認、必要ならば PSB やケーブルの交換を行う。
- 5. 問題なければ ASD テストパルス試験に進む。

以下に実際に取得したデータの例として FIの T10/T10S チェンバー (ワイヤー

<sup>\*2</sup> Fiber Patch Panel:複数のファイバー入出力を持つ箱同士を、ファイバーをひとまとめにして太く丈夫な構造で覆って保護したものでつないだモジュール。両側の箱の入出力は一対一で対応しており、折れやすい 光ファイバーを長距離つなぐ場合に用いられる。

32ch/30ch、ストリップ 32ch/32ch) のヒットマップを示す。横軸がチェンバーのチャ ンネルに対応し、縦軸はそのチャンネルにヒットがあったイベント数である。T10S はワ イヤーが 30 チャンネルしかないが、SLB テストパルスの場合はチェンバーからの信号 を用いないので 32ch 分全てあるように見える。図 4.16、図 4.17 は、それぞれワイヤー、 ストリップの正常なヒットマップ、図 4.18 は Depth が 1 クロックだけ小さい場合の例で ある。

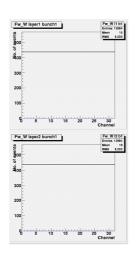


図 4.16 SLB テストパルス ヒットマップ (ワイヤー)

トがあったイベント数。黒が FI-C-\phi22,T10,Layer1/2\circ

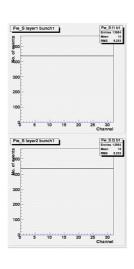


図 4.17 SLB テストパルス ヒットマップ (ストリップ)

問題がない場合の図。横軸がチャン 問題がない場合の図。横軸がチャン ネル、縦軸がそのチャンネルにヒッ ネル、縦軸がそのチャンネルにヒッ トがあったイベント数。黒が Current、赤が Previous、青が Next。Current、赤が Previous、青が Next。 FI-C-\phi12,T10,Layer1/2\circ

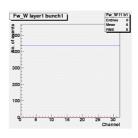


図 4.18 SLB テストパルス ヒットマップ (ワイヤー)

Depth が 1 クロック小さい場合。 SLB からは該当 Depth の前後計 3 クロック分が同時に読み出される仕 様になっており、1 クロックのずれ ならヒットが見える。Depth が 1 ク ロック小さいものは青 (Next)、大き いものは赤 (Previous) で表示する。 横軸がチャンネル、縦軸がそのチャ ンネルにヒットがあったイベント数。 黒が Current、赤が Previous、青が Next<sub>o</sub> FI-C- $\phi$ 11,T10S,Layer1<sub>o</sub>

#### ASD テストパルス試験 4.2.2

ASD は PP からのテストパルス信号を受けて、PP に信号を返す機能を持っており、こ れを ASD テストパルスと呼んでいる。テストパルストリガーは TTC から PP に送られ、 テストパルストリガーを受けた PP は設定に応じたディレイを経て ASD にシリアル信号 を送る。これを受けた ASD は 16 チャンネルに対応した 16 本のパラレル信号を PP に返 し、PP から見るとあたかもチェンバーのチャンネルが鳴って出てきた信号のように見え る。ASD から帰ってくる信号は必ず全 16 チャンネルが鳴った状態で、パターンの変更は 出来ない。ASD テストパルスでパルスパターンを変更したい場合は、PP の入力部分でマ

スクをかけることで対応する。テストパルストリガーは SLB テストパルス試験と同様に、 擬似 L1A 信号と同周期の約 10kHz で、固定時間"X"だけ早く TTC から発行される。ち なみにトリガー信号自体は SLB テストパルスと同じものだが、SLB 側の設定で Testpulse VETO という設定値を変更することで ASD テストパルスと使い分けることが出来る。

PSB 上での信号の遅れを無視し、PP でのテストパルス発行ディレイを設定しない場合、 擬似 L1A は ASD から帰ってくるテストパルスに対して、"X - (PP-ASD 間の信号の往 復時間)"だけ遅れて SLB に届く。電気信号の伝達にかかる時間は概ね 5nsec/m であるか ら、ケーブル長 2.5m あたり 1 クロックだけ時間差が縮まる。PP-ASD 間のケーブル長は チェンバー毎に異なるので、検査するチェンバー毎に Depth の値を適切に変更してやる。

ASD テストパルス試験のセットアップ及び信号の流れを図 4.19、図 4.20 に示す。セットアップは基本的に SLB テストパルスと同様であるが、ASD 閾値電圧をかける必要がある点だけ異なる。閾値電圧をかけない場合、ASD からのノイズにより綺麗なヒットマップが得られない。ビッグウィールは DCS を通じて閾値電圧をかけるが、スモールウィールは DCS が準備出来ていなかったために暫定処置として閾値電圧をかける専用のモジュールを作成し使用した。

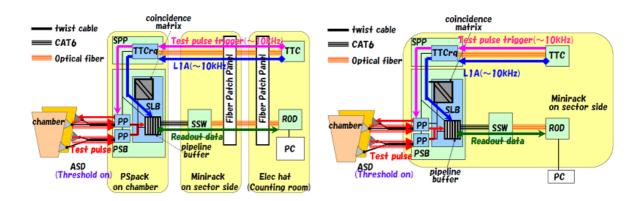


図 4.19 ASD テストパルス試験のセット アップ (1/12 セクター)

図 4.20 ASD テストパルス試験のセット アップ (スモールウィール)

#### 検査の手順は以下の通り。

- 1. PP,SLB,SSW の初期化と設定を行う。
- 2. DCS から、ASD へ閾値電圧を供給する。
- 3. TTC からテストパルストリガーと、擬似 L1A を発行してデータを取得する。
- 4. データを解析しヒットマップを作り、閾値電圧がかかっているか、ASD-PP 間の接続の正しさ、PP、SLB の入出力に問題がないか等をチェックする。
- 5. 問題があればまず配線を確認、必要ならば PSB や ASD、ケーブルの交換を行う。
- 6. 問題なければ宇宙線試験に進む。

以下に実際に取得したデータの例として FIの T10/T10S チェンバー (ワイヤー 32ch/30ch、ストリップ 32ch/32ch) のヒットマップを示す。横軸がチェンバーのチャ ンネルに対応し、縦軸はそのチャンネルにヒットがあったイベント数である。T10S はワ イヤーが 30 チャンネルしかないが、ASD のピンの数は共通であり、ピンのあるチャンネ ルはテストパルスが帰ってくるため 32ch 分全てあるように見える。図 4.21、図 4.22 は、 それぞれ ASD 欠損 (16ch 単位)、チャンネル欠損 (1ch 単位) がある場合、図 4.23 は閾値 電圧がうまくかかっていない場合の例である。

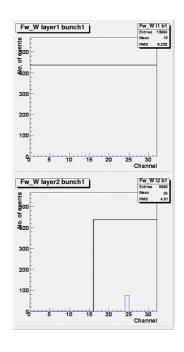


図 4.21 ASD テストパルス ヒットマップ (ワイヤー)

ASD 単位の欠損 (下段左半分 16ch) がある。片層に ASD 単位の欠損が ある場合 ASD の接続や不良を疑う。 両層の同じ部分の ASD 単位欠落は PSB 側コネクタを疑う (2 層の ASD が1つのコネクタに合流しているた め)。横軸がチャンネル、縦軸がその チャンネルにヒットがあったイベン ト数。黒が Current、赤が Previous、 青が Next。

FI-C-\phi11,T10S,Layer1/2\circ

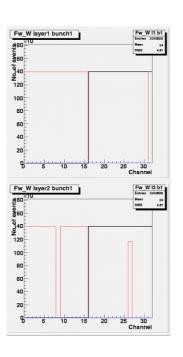


図 4.22 ASD テストパルス ヒットマップ (ワイヤー)

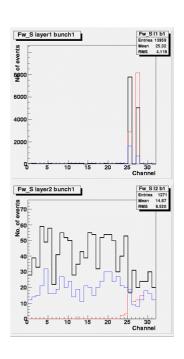


図 4.23 ASD テストパルス ヒットマップ (ストリップ)

チャンネル単位の欠損 (下段左下) が ASD 閾値電圧がうまくかかっていな FI-A- $\phi$ 9,T10,Layer1/2<sub>o</sub>

ある。コネクタピンの不良やケーブ い場合。ノイズが支配的となりテス ル中の断線を疑う。両層で左半分が トパルスが見えない。特に上段は特 赤いのは、ASD-PSB 間のケーブル 定のチャンネルが発振してしまって 長が右半分より短いため。層間では いる。ノイズはランダムに発生する ケーブル長の差はない。横軸がチャ のでタイミングも黒赤青にばらける。 ンネル、縦軸がそのチャンネルに 横軸がチャンネル、縦軸がそのチャ ヒットがあったイベント数。黒が ンネルにヒットがあったイベント数。 Current、赤が Previous、青が Next。 黒が Current、赤が Previous、青が Next<sub>o</sub> FI-A- $\phi$ 1,T10,Layer1/2<sub>o</sub>

#### 4.2.3 宇宙線試験

地上動作試験の最終段階として、宇宙線を用いてエレクトロニクス及びチェンバーの検査を行う。そのためにチェンバーにはガスを供給し、HV を印加して、宇宙線に反応してヒットを出す状態にしなくてはならない。TGC3 検査時のチェンバーのパラメータは表4.4 の通りである。

パラメーター	值
使用ガス	$CO_2$
HV	2800V
閾値電圧	ワイヤー:100mV、ストリップ:150mV
トリガー条件	ワイヤー 1/2 or ワイヤー 2/2

表 4.4 TGC3 の宇宙線検査時のパラメーター

セットアップの一番大きな違いは、L1A として TTC の発行する擬似 L1A 信号ではなく、宇宙線によるチェンバーのヒット信号を元にして実際に TGC のエレクトロニクスが発行するトリガー信号を用いる点である。そのためにビッグウィールでは CTM(Commissioning Trigger Module) という HPT の代替モジュールを用いた。HPT モジュールの動作にはダブレット PSB(TGC2/3) とトリプレット PSB(TGC1) の双方からの CAT6 ケーブル入力を必要とするが、CTM は単純に入力の OR を取るモジュールで、ダブレット単体、又はトリプレット単体からの CAT6 ケーブル入力に対し動作が可能である。地上動作試験において TGC1,2,3 は全て別々に検査がなされたため、PSB からのトリガー信号処理には CTM を用いるのが都合が良かった。CTM で OR 処理されたトリガー信号は TTC へ送られ、TTCrq を通して L1A として PSB に戻ってくる。よって Depth の設定は、SLB→CTM→TTC→SLB という一連の信号伝播に要する時間によって決まる。

一方スモールウィールの場合は、PSB からのトリガー出力が光ファイバーであるため、本番と同様にトリガー出力を直接 SL へ入力した。この SL は、地上動作試験用に CMT 同様の単純な OR を取る特殊な論理を FPGA に焼き込んだもので、他のモジュール同様にチェンバー横のミニラックに設置された。図 4.24、図 4.25 に宇宙線試験におけるセットアップと信号の流れを示す。

TGC3 の検査の場合もう一つ特殊な事情がある。それは TGC2,3 はダブレット 2 枚を合わせた 4 層のうち 3/4、又は 4/4 のコインシデンスをとってトリガー信号を出す仕組みになっているという点である。地上動作試験の場合、TGC3 単体での検査となるのでこのままでは宇宙線によるヒットでトリガー信号が発行されることはない。そこで、SLB のマ

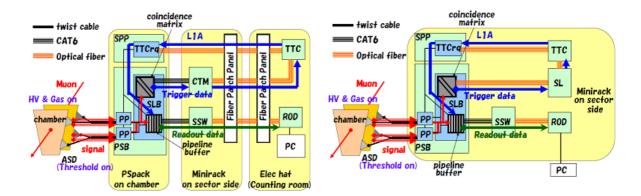


図 4.24 宇宙線試験のセットアップ (1/12 セクター)

図 4.25 宇宙線試験のセットアップ (ス モールウィール)

スク機能を用いて、TGC2 のヒットに対応する bit にダミーヒットを埋め込んでやる。こうすることで 3/4、4/4 コインシデンスは、それぞれ TGC3 上での 1/2、2/2 コインシデンスを要求することになる。

検査の手順は以下の通り。

- 1. PP,SLB,SSW の初期化と設定を行う。
- 2. DCS から、ASD へ閾値電圧を供給する。
- 3. 片レイヤーのみに HV を印加し 1/2 トリガーでデータ取得し、レイヤー間の HV や信号線のスワップの有無を確認する。
- 4. 両レイヤー HV を印加し 2/2 トリガーでデータを取得し、欠損チャンネルの有無等、チェンバーの動作を確認する。
- 5. 問題があればまず配線を確認、必要ならば PSB、ASD、ケーブル、チェンバーの交換を行う。

以下に実際に取得したデータの例として FI の T10/T10S チェンバー (ワイヤー32ch/30ch、ストリップ 32ch/32ch) のヒットマップを示す。横軸がチェンバーのチャンネルに対応し、縦軸はそのチャンネルにヒットがあったイベント数である。T10S はワイヤーが 30 チャンネルしかないため、宇宙船試験では端の 31,32ch が欠けて見える。図 4.26 はレイヤー 2 のみ HV を印加した場合、図 4.27 は両レイヤーに印加した場合、図 4.28 は発振チャンネルや、欠損チャンネルがあった場合の例である。

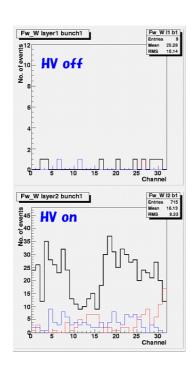


図 4.26 宇宙線試験ヒット マップ (ワイヤー)

レイヤー 2 のみ 2800V の HV を印加し 1/2 ワイヤーコインシデンスでトリガーをかけた場合。HV をかけた層と逆の層に宇宙線が見えた場合、HV 又は ASD の配線疑う。テストパルス試験では両レイヤー同時にパルスを入れるのでレイヤー間スワップは発見出来なかった。横軸がチャンネル、縦軸がそのチャンネルにヒットがあったイベント数。黒がCurrent、赤が Previous、青が Next。FI-C-φ12,T10,Layer1/2。

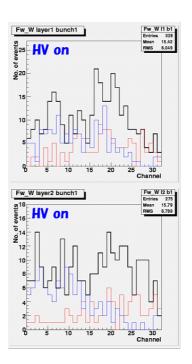


図 4.27 宇宙線試験ヒット マップ (ワイヤー)

両層に 2800V の HV を印加し 2/2 ワイヤーコインシデンスでトリガーをかけた場合。両層にヒット分布が見える。宇宙線試験によってチェンバーに起因するチャンネル欠けと、エレクトロニクスのトリガー論理の作動が検査できる。横軸がチャンネル、縦軸がそのチャンネルにヒットがあったイベント数。黒が Current、赤が Previous、青が Next。FI-C-φ19,T10,Layer1/2。

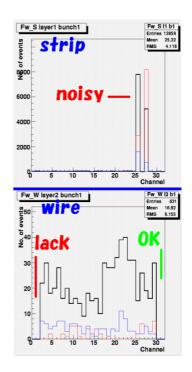


図 4.28 宇宙線試験ヒット マップ (上:ストリップ、下: ワイヤー)

上:2 チャンネルが発振して常に鳴り続けているのがわかる。下:左端の2 チャンネルはチャンネル欠け。 右端の2 チャンネルは T10S チェンバーはワイヤーが30 チャンネルしかないためで正常。横軸がチャンネル、縦軸がそのチャンネルにヒットがあったイベント数。黒が Current、

赤が Previous、青が Next。 上:FI-A- $\phi$ 1,T10,Layer1, 下:FI-C- $\phi$ 11,T10S,Layer2。

### 4.2.4 地上動作試験の成果

地上動作試験の結果、対処できるヒューマンエラーは全て排除された。我々が担当した TGC3 とスモールウィールに対して地上動作試験で発見、修復した問題の一覧を表 4.5 に 示す。また、表 4.6 には検査が行われた全チェンバーで発見され修復が出来なかった問題 チャンネルの数を示す。これらはチェンバーの内部に起因するため対処がほぼ不可能なも のであるが、全体の 0.013% に抑えることができた。欠損チャンネルに関しては個々が各 チェンバーにばらけて存在しており、数も少ないため全体に与える影響は軽微である。発 振チャンネルは地下ホールヘインストール後にも発振が確認されるようであれば、PSB 上でマスクをかけ、そのチャンネルを使用しないことで対処することになった。

表 4.5 地上動作試験で発見され対処された問題

	HV 配線スワップ	チェンバー交換	PSB 交換
A サイド TGC3	4/242	2/242	7/198
C サイド TGC3	2/242	4/242	17/198

表 4.6 地上動作試験で発見された問題のあるチャンネル

サイド	ステーション	ステーション 欠損 + 発振 / 全チャンネル数 (割合)	
A サイド	TGC1	4+0 / 50160 (0.008%)	
	TGC2	0+0 / 52560 (0%)	
	TGC3	11+0 / 51072 (0.02%)	
	FI	1+2 / 3040 (0.1%)	
Cサイド	TGC1	5+0 / 50160 (0.01%)	
	TGC2	3+0 / 52560 (0.006%)	
	TGC3	10+0 / 51072 (0.02%)	
	FI	2+2 / 3040 (0.1%)	
計		36+4 / 313664 (0.013%)	

### 4.3 地下実験ホールへのインストール

### 4.3.1 チェンバーのインストール

地上動作試験を終えた TGC は、順次 ATLAS 地下実験ホールへインストールされた。インストールが滞りなく進むように検査の優先順位が決められたが、前述の通り、EI に関しては地上検査をする前に地下へインストールせざるを得なかった。図  $4.29 \sim 20$  4.34 に、TGC が Bat.180 及び Bat.191 から ATLAS 地下実験ホールへ運ばれ、インストールされる様子を載せた。



図 4.29 セクターの地下ホールへの移動 [22]



図 4.30 セクターをクレーン で地下に降ろす様子 [22]



図 4.31 セクターを地下 ホールで円盤状に組立 [22]



図 4.32 検査を終え移動を待 つスモールウィール

TCG の上についているのは MDT の EIL。



図 4.33 Bat.191 から地下実験ホールへ運ばれる様子



図 4.34 クレーンで地下 に降ろす様子

### 4.3.2 エレクトロニクスのインストール

チェンバーのインストールと並行して、エレクトロニクスの地下実験ホールへのインストールも進めていった。地下実験ホールでのエレクトロニクスの配置に関しては第3章で説明したが、ここで再確認しておく。設置場所は 1. チェンバー上 (UX15)、2. チェンバー端 HSC クレート (UX15)、3. カウンティングルーム (USA15) の 3 箇所に大別され、各エレクトロニクスはそれぞれの場所に図 4.35 に示すように配置される。ただし EI/FI 用のHSC クレートだけは例外的に、UX15 内の ATLAS 検出器の横の足場に独立して設置される。HSC クレートはビッグウィール 1/12 セクターあたり 1 台、EI/FI は片サイド 1 台となるので、全部で  $12\times2+1\times2=26$  台ある。HSC クレートと USA15 の間は FPP を通して光ファイバーで結ばれ、USA15 にある ROD はビッグウィールの HSC クレート 1 台に対して 1 枚用いられる。

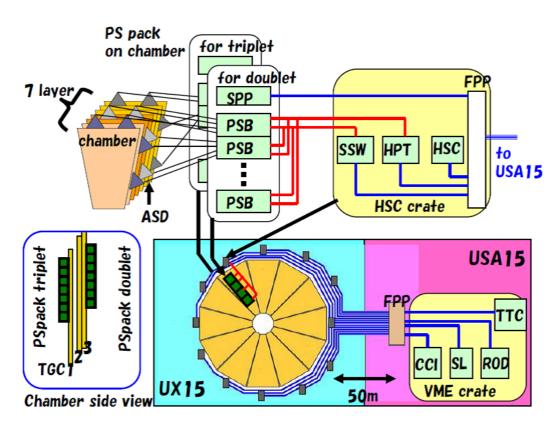


図 4.35 地下実験ホールにおける TGC 及びエレクトロニクスの配置

図の左下は TGC ビッグウィールのイメージ図で、チェンバー上に PS pack、端に HSE クレートが載る。PS pack はダブレット用が TGC3 上の衝突点から遠い側に、トリプレット用が TGC1 上の衝突点に近い側にある。1/12 セクター 1 つに含まれる 4 つの PS pack からの出力は 1 つの HSC クレートの SSW、HPT で処理され、結果は FPP を通して UX15 から約 50m 離れた USA15 へ光ファイバーで送られる。図中の青線は光ファイバーを、赤線は CAT6 ケーブルを表す。USA15 においてトリガー情報は SL、リードアウト情報は ROD で処理される。

### 図 4.36~図 4.39 に、UX15、USA15 の PS pack、クレート、モジュールの写真を載せた。





図 4.37 HSC クレート

図 4.36 PSPack と HSC クレート [39] 左下に見える青い箱が HSC クレート。赤で囲まれているのが が HPT、右側の黒いボードが SSW。 PSB から PS pack.

HSC クレートの拡大写真。左側の緑色のボード の CAT6 ケーブル入力を外した状態の写真。



図 4.38 USA15 の VME クレート [39]

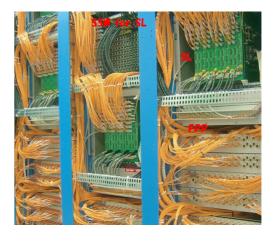


図 4.39 USA15 の VME クレート

USA15 の VME クレートの写真。右側の赤枠内に見え CAT6 ケーブルをはずした状態の VME クレートの拡大 るのが ROD。左側は光ファイバーと CAT6 ケーブルで 写真。右下の白いモジュールが FPP。右上の緑色が 覆われて見えないが UX15 と繋がる FPP や、SL、CCI SL、中上段の黒いボードは SSW だが、SL からのトリ ガー情報をまとめて ROD に送信する役割を持つ。 が設置されている。

### 4.4 地下ホールにおける動作試験と試運転

2008年夏、全てのチェンバー、エレクトロニクスの地下ホールへの設置が完了し、エレクトロニクス間の配線も一通り終えた。そして TGC 単独での試運転や ATLAS 全体での統合試運転 (Milestone run と呼ぶ)を通し、実験開始に備えたパラメータ調整や、システムの動作の最終確認が行われた。この節では、実験本番開始へ向けて行われた準備のうちタイミング関連のパラメータの調整に関して説明する。次にリードアウト、トリガー、コントロールラインの動作確認の手法について述べる。他検出器の導入や修理等の際、ビッグウィール全体を動かす必要がある場合に、一度接続を完了した配線を一旦外さなければならない状況が度々あった。また故障により TGC システムのモジュールを交換しなければならない場合もある。そのような状況は今後新たに発生する可能性も否定はできない。そのため、配線復帰後に速やかに TGC の動作を確認できる手法が確立された。そして最後に、2008年9月の LHC ファーストビームでハローを捕らえたデータを紹介する。

### 4.4.1 タイミングパラメーターの調整

ATLAS の様な巨大検出器では正しいタイミングでのデータ取得のために、ケーブル長の差等による信号タイミング差を見積もり、事前にパラメータを調整する事は非常に重要である。トリガー情報は、 $SLB \rightarrow HPT \rightarrow SL \rightarrow MIOCT \rightarrow CTP \rightarrow LTP \rightarrow TTC \rightarrow SPP \rightarrow SLB$  という経路を通り、その間に多数のケーブル及び論理回路を経る。TGC では各エレクトロニクス上に可変ディレイを設け、各段階で信号のタイミングをあわせる設計になっている。表 4.7 にタイミングパラメータとそれが実装される場所、その役割の一覧を載せる。

表 4.7 タイミングパラメータの種類

パラメータ	実装場所	役割	
Signal delay	PP	正しいバンチ ID を付与し LHC クロックとの同期を取る	
BCID delay		Singnal(0-25nsec 幅,25/30 nsec 単位 ),BCID(clk 単位)	
SLB delay	SLB	同じ SLB に入るレイヤー間差を調整 ( 0-3clk 幅, 0.5 clk 単位 )	
L1A Depth	SLB	L1A 信号とリードアウト情報の時間差を調整 (clk 単位)	
TTCrx delay	SPP	CTP-SPP 間ファイバーによる L1A 到着時間差を調整 (clc 単位)	
HPT delay	НРТ,НРТ	同 HPT へ入る PSB 間差を調整 (clk 単位)	
SL delay	НРТ,НРТ	同 SL に入る wire,strip の HPT 間の差を調整 (clk 単位) 未使用	
MIOCT delay	MIOCT	HPT-SL 間ファイバーによるセクター間差を調整 (clk 単位)	

現在の設定値は、BCID delay は TGC2 の PP のみ 1 クロック、SLB delay は TGC1/3 のみに 1 クロック、HPT delay は TGC1 のみ 1 クロックを設定している。SL delay は HPT の時点でワイヤーとストリップのタイミングが揃っているので現在使用していない。Signal delay については後述するが、PP によって細かく異なっている。セクター間のタイミング差 (HPT-SL 間の光ファイバー長の差に起因) に関して、トリガー情報の往路は MIOCT delay で、復路は SPP 上の TTCrx の delay で吸収している。TGC1 と 2/3 の PSpack では SPP-PSB 間のケーブル長差が 1.7m あり、TTCrx delay の設定値にはその差も反映される。L1A Depth は SLB から出たトリガー情報が TTC を経て SLB に戻ってくる間にあるケーブル長と論理遅延、そして上述のディレイ値によって決まる。図 4.40 に各部のケーブルで生じる信号の遅れを示す。図中の数字の単位はクロック (25nsec) である。ディレイによって往路は CTP の時点で、復路は SPP の時点でタイミングが揃うようにしているので、現在 Depth の値は全 SLB で共通の値となっている。

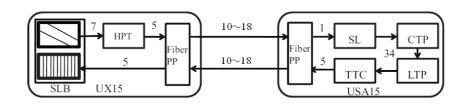


図 4.40 Depth を決定する信号の遅れ [18]

数字の単位は LHC の 1 クロック (25nsec)

#### 4.4.1.1 UX15-USA15 間の光ファイバー長スキャン

HPT-SL 間の光ファイバー長の差は最大で約 40m あり、最も大きな影響を与えるので実際に長さを測定し正しい遅延時間を知るのが望ましい。そこで UX15 と USA15 の FPP 間の信号往復時間を実際に測定した。図 4.41 に示した通り、光ファイバーはチェンバー端の HSC クレートから出てビッグウィールの縁を沿うようにして一箇所にまとめられる。よって UX15 から最も遠い側にある A01 及び C01 セクターの光ファイバーが最も長く 90.4m、一番近い側にある A07、C07 が最も短く 50.2m ある。図 4.42 に測定結果を示す。

#### 4.4.1.2 Signal ディレイスキャン

衝突点で生じた粒子に起因するミューオンが TGC を通過して信号が発生し、ASD を通して PP に入るまでの間生じるタイミングの差は、1.TOF によるもの、2.ASD-PP 間ケーブルによるもの、が考えられる。PP では ASD からの信号を LHC クロックと同期させ、バンチ ID を付与する回路 (Bunch-ID 回路) が搭載されており、同じイベントの信号は全て同じバンチ ID を持つよう同期のタイミングを合わせなくてはならない。。そのために

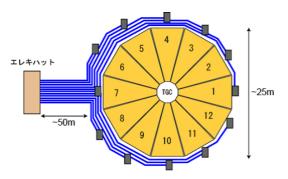


図 4.41 HSC クレート-USA15 間のファイ バー長差 [39]

セクター 07 が最も USA15 に近く、セクター 01 が最 も遠い。光ファイバー (青線) は HSC クレートから出 左:A サイド、右:C サイドの結果。横軸はセクター番号 た後ウィールの縁に沿って一箇所にまとめられる。

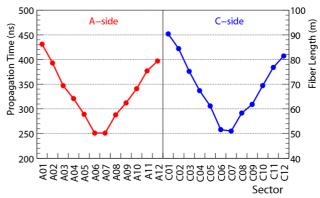


図 4.42 HSC クレート-USA15 間のファイ バー長スキャン[39]

(01~12)、縦軸の左目盛りが信号伝播の片道にかかる時 間 [ns]、右目盛りがファイバー長 [m]。

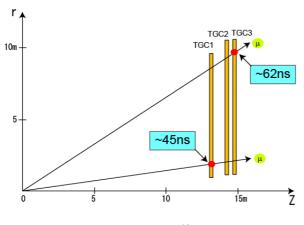


図 4.43 TOF の差 [39]

 $(1.8m \sim 12.5m)$ 

図 4.44 ASD-PSB 間のケーブル長差 [39]

最大の点 (62ns)、その差は 18ns になる。

最短で TGC1 の r 最小の点 (45ns)、最長で TGC3 の r 写真は TGC1。最短で 1.8m、最長で 12.5m と実に 10.7m の差 (約2 クロック分に相当) がある。

ASD 信号をサブナノ秒 (25/30sec) 単位で遅らせる Signal delay と、バンチのカウントを ずらす(クロック単位でのタイミング調整に相当する)、BCIDdelay が実装されている。

これらの数値は、TOF やケーブル長の差から計算し求められるが、それが正しいことを 確認するために、Signal delay をサブナノ秒単位でずらしながらデータのタイミングの遷 移を観察するという手法をとった。図 4.43、図 4.44 に、TOF の差、ASD-PP 間ケーブル 長差のイメージを示す。

具体的な手順は以下の通りである。

- 1. TOF+ASD-PP 間差を ASD テストパルスによってエミュレートする。
- 2. 資料から計算した設定値を用いてテストパルスのデータを取得する。
- 3. Signal delay をずらしながらデータの取得を繰り返し最適値を探る。

ASD テストパルスの発行タイミングは、PP上に実装された Fine delay と Coarse delay という 2 種類の可変ディレイによって変更することができる。前者は Signal delay と同様の 25/30ns 単位、後者は SLB delay と同様のクロック単位となっていて、各 PP における設定値を細かく設定することで、衝突点からの無限運動量の直線トラックを仮定した場合の TOF、及びケーブル長を反映した信号のエミュレートが行える。この時に注意しなくてはならないのは ASD テストパルスは実際の信号と異なり ASD-PP 間を往復すること、そしてツイストケーブル伝播時の信号の減衰による効果が存在することである。図 4.45 に、信号の減衰の様子を示す。信号がケーブル間を伝播する間にパルスの立ち上がりが甘くなり、パルスとして認識されるまでの時間に差が生じてしまう。サブナノ秒単位でのタイミング調整なので、このような効果も無視できない。そこで実際に使用しているものと同じツイストケーブルを用いてこの減衰による効果の見積もりを行った結果が図 4.46 である。





図 4.45 ケーブル伝播による信号の減衰の 様子 [41]

左が 2.8m ケーブルを伝播後のパルス形、右が 47.3m ケーブルを伝播後のパルス形。ケーブルが長くなるとパルスの立ち上がり (下がり) が甘くなっているのがわかる。テストパルスは PP から ASD へ向かう信号、LVDS は ASD から PP へ向かう信号である。

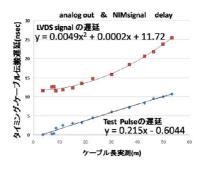


図 4.46 ケーブル長と減衰効果による遅れ の関係 [41]

横軸がケーブル長、縦軸が信号の減衰によって生じるパルス認識の遅れである。テストパルスは PP から ASD へ向かう信号、LVDS は ASD から PP へ向かう信号である。

トラックをエミュレートしたテストパルス用のパラメータが用意出来たら実際にデータの取得を行う。前述した通り、SLB では L1A に対して対応するバンチの前後をあわせた 3 バンチ分のデータを読み出しているので、Signal delay を 25/30ns 単位でずらしていく と、どこかで Previous(Next) バンチと Current バンチが入れ替わる。計算によって事前に 求めた理論値は、Previous から Current へ移る (Current が立ち上がる) タイミングになる

ようにしているので、もしこれがずれていたら何らかの問題があることがわかる。図 4.47 に理論値と実測値が一致している場合の結果を載せる。理論値に計算間違いがなければ、ケーブル長やコネクタ等に問題があるということになる。実際に、この Signal ディレイスキャンによる理論値との不一致から、他の検査で発見できなかったケーブルスワップが複数発見され、修理された。

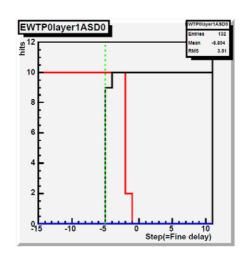


図 4.47 ディレイスキャン [41]

横軸は Signal delay(25/30ns 単位)。絶対値には意味がなく、相対的なディレイ値の差のみを見ている。縦軸は、そのディレイ値の時にテストパルスのヒットのうち、そのバンチに入った数を表す。赤は Preivious、黒は Current のバンチに入った数を表す。緑色の縦線が理論的に Current が立ち上がるはずのタイミング。理論値と 実際の Current の立ち上がりが一致している。

現在ほとんどの場所で理論値と実測値が一致することが確認されているが、一部の一致しない場所の原因の一つとして、ASD における閾値電圧の違いが考えられている。ただし閾値電圧は実験開始後も変化する値なので、テストパルスによるエミュレートに組み込むことはできない。閾値電圧の変化による、タイミングのずれの概念を図 4.48、図 4.49 に載せた。

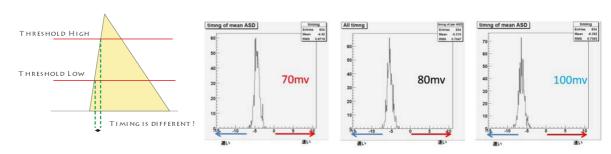


図 4.48 閾値電圧の差に よる信号認識の時間差 [17]

図 4.49 閾値電圧の差による信号の立上がりの時間差 [41] 横軸で左にいくほど立ち上がりが遅い。閾値電圧が高いほど遅くなる。

### 4.4.2 リードアウトライン試験

リードアウトライン試験は、地上動作試験で行われたテストパルス試験及び宇宙線試験と同様のことを地下で行い、チェンバーの動作及び、エレクトロニクスの動作を確認した。異なるのは、HPT、SL という本番と同じトリガーモジュールを用いること、L1A信号は  $SL \rightarrow CTP \rightarrow LTP \rightarrow TTC$  と大回りしてから UX15 の SLB に配信されること、そして ASD-PSB 間のツイストケーブル、HSC クレート-USA15 間の光ファイバーの長さの差等、タイミング差を生じさせる要因が大きいことである。タイミングの調整に関しては前述の通りである。また、EI/FI に関しては本番のセットアップではセルフトリガーが発行できないため、ASD テストパルスまでをスタンドアローンで行い、宇宙線試験はビッグウィールと一緒に統合試運転に参加した際などのデータを用いて動作を確認した。図 4.50 ~ 図 4.50 ~ 区 4.50 で 4.50 に 4.50 で 4.50 で 4.50 に 4.50 に 4.50 で 4.50 に 4.50 で 4.50 に 4.50 に 4.50 に 4.50 に 4.50 で 4.50 に 4.

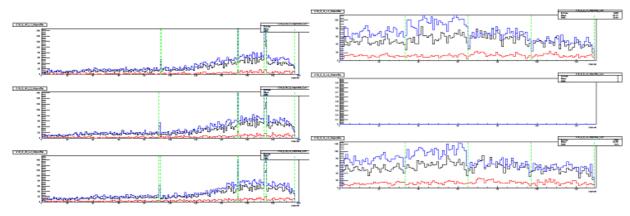


図 4.50 TGC1 の Ec のヒット (ワイヤー)

横軸はチェンバーのチャンネル、縦軸はチャンネルが鳴ったイベント数。ただしチャンネルはトリガーセクター内で、rが最小となるチャンネルから連続した数字をつけた。緑色の縦線がチェンバー境界を表し、境界上のチャンネルは2つのチェンバーに属するためヒット数が多くなっている。上から順にレイヤー 1,2,3。

図 4.51 TGC1 の Ec のヒット (ストリップ)

横軸はチェンバーのチャンネル、縦軸はチャンネルが鳴ったイベント数。ただしチャンネルはトリガーセクター内で、r 小側に位置するチェンバーから連続した数字をつけた。チェンバー内では $\phi$  小側から順に番号を振った。緑色の縦線はチェンバーの切れ目を表す。上から順にレイヤー 1,2,3。トリプレットのストリップなのでレイヤー 2 はない。

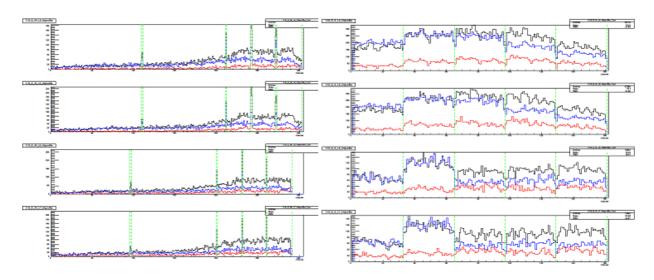


図 4.52 TGC2/3 の Ec のヒット (ワイヤー)

図 4.53 TGC2/3 の Ec のヒット (ストリップ)

横軸はチェンバーのチャンネル、縦軸はチャンネルが 横軸はチェンバーのチャンネル、縦軸はチャンネルが 数が多くなっている。上から順にレイヤー 4,5,6,7。

鳴ったイベント数。ただしチャンネルはトリガーセク 鳴ったイベント数。ただしチャンネルはトリガーセク ター内で、r が最小となるチャンネルから連続した数字 ター内で、r 小側に位置するチェンバーから連続した数 をつけた。緑色の縦線がチェンバー境界を表し、境界上 字をつけた。チェンバー内では φ 小側から順に番号を のチャンネルは2つのチェンバーに属するためヒット 振った。緑色の縦線はチェンバーの切れ目を表す。上か ら順にレイヤー 4,5,6,7。

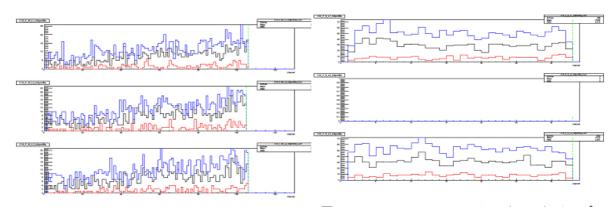
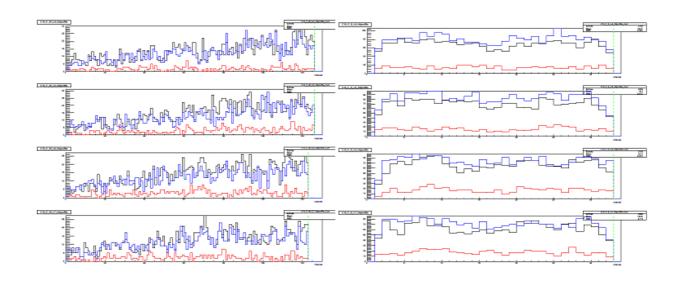


図 4.54 TGC2/3 の Fw のヒット (ワイヤー)

横軸はチェンバーのチャンネル、縦軸はチャンネルが 鳴ったイベント数。チャンネル番号は r 小側から振って  $\tau$  ている。上から順にレイヤー 1,2,3。トリプレットのス いる。上から順にレイヤー 1,2,3。

図 4.55 TGC2/3 の Fw のヒット (ストリップ)

横軸はチェンバーのチャンネル、縦軸はチャンネルが 鳴ったイベント数。チャンネル番号は φ 小側から振っ トリップなのでレイヤー 2 はない。



横軸はチェンバーのチャンネル、縦軸はチャンネルが 横軸はチェンバーのチャンネル、縦軸はチャンネルが鳴ったイベント数。チャンネル番号は r 小側から振って 鳴ったイベント数。チャンネル番号は  $\phi$  小側から振っいる。上から順にレイヤー 4,5,6,7。 ている。上から順にレイヤー 4,5,6,7。

図 4.56 TGC2/3 の Fw のヒット (ワイヤー)

図 4.57 TGC2/3 の Fw のヒット (ストリップ)

地上試験と同様に、チャンネル欠損や ASD 欠損の発見され、場合によっては 1 つのチェンバーまるごと信号が欠けていることもあり、その都度原因を追究し、エレクトロニクス、配線、チェンバーの修理、交換等を行った。その結果新たに発見されたものも含めて、74 チャンネルのチャンネル欠損に抑えることが出来た。これは全 318112 チャンネルの 0.023% に相当し、TGC の目指す検出効率 99% を阻害する大きさではない。

### 4.4.3 トリガーライン試験

SLB テストパルスを用いて、TGC のトリガー用エレクトロニクス (SLB,HPT,SL) が無限運動量粒子のトラックに対して正しくトリガーを出すことを確認した。SLB テストパルスは任意のパルスパターンを出すことが出来る。よって、TGC3 上の各トリガーサブセクター (ROI) 上の適当な 1 点と衝突点を結んだ直線を考えて、直線が TGC1,2,3 を通過する際に対応するチャンネルを求め、そのチャンネルに対応する bit だけを立てるようなテストパルスのパターンを用意することで、擬似的な無限運動量トラックヒットパターンを生成できる。全ての ROI に対してこのようなテストパルスパターンを用意し、トリガーデータと、リードアウトデータを照合することで、TGC エレクトロニクスが衝突点から飛来する粒子に対して正しいトリガーデータを出すことが出来るか確認できる。図 4.58に正しく機能している場合のワイヤーの結果を示す。図中の右上がトリガーデータとリードアウトデータの相関を表したもので正しい相関がとれている。

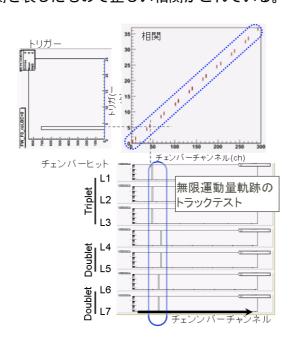


図 4.58 トリガーライン試験の結果 citesugimotojps

図中の右上がトリガーデータとリードアウトデータの相関を表したもので、縦軸が  $ROI_{column}$  番号 (付録 A.4 参照)、横軸がチャンネル番号。ただしここでのチャンネル番号は r 大側から小さな番号を振って、 $ROI_{column}$  と正相関がとれるようにしている。図中左がトリガーデータで、横軸が  $ROI_{column}$ 、縦軸がその  $ROI_{column}$  のトリガーが出たイベント数。図中下がリードアウトデータで、横軸がヒットのあったチャンネル番号、縦軸がそのチャンネルにヒットのあったイベント数、上からレイヤー  $1 \sim 7$ 。

#### 4.4.4 コントロールライン試験

レジスタに値を書き込み ightarrow 読出し ightarrow 値を変更 ightarrow 読出しという作業を繰り返し、全て のモジュールの全てのレジスタの全 bit に書き込みが行えるかをチェックした。不調が見 つかった場合にはモジュールの交換等が行われた。

### LHC ファーストビームのデータ

2008 年 9 月に LHC のメインリング内をビームがはじめて一周した。この記念すべき イベントにおけるビームハローを ATLAS によって捕らえたイベントのディスプレイが図 4.61 である。カロリメータや MDT によって捕らえられた粒子の様子が見て取れる。

また、TGC でもビーム由来のデータをとらえることに成功した。この時のビームは C サイド側から A サイド側へ向かうビームで、ATLAS の実験ホールの 100m ほど手前で ビームを障害物にあてて散乱させるということを行った。そこで生じたビーム由来の粒子 が ATLAS 実験ホールへ到達するタイミングにあわせて ATLAS 全体に L1A を発行して データを取得した。その図が 4.59 である。横軸がバンチ ID で、縦軸がそのバンチに属す るヒットの数である。C サイドのヒットに対して約4バンチ(~100nsec)遅れて A サイド にヒットが発生しているのがわかる。これは C サイド側の TGC から A サイド側の TGC への TOF に相当する数字である。それを表すイメージ図が図 4.60 である。

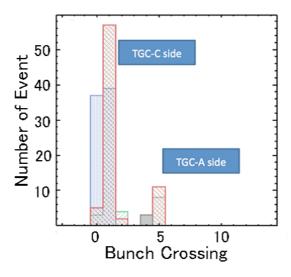
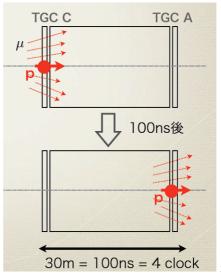


図 4.59 LHC ビームによるデータ [40]

横軸がバンチ ID、縦軸がそのバンチのヒット数。C サ イドに対して A サイドのヒットが 4 バンチ ( $100 \mathrm{ns}$ ) 程  $\phantom{0}$  C サイドから A サイドの約  $30 \mathrm{m}$  を飛ぶのに約  $100 \mathrm{ns}$ 遅れている。

図 4.60 C サイド TGC から A サイド TGC への TOF[40]



かかる。

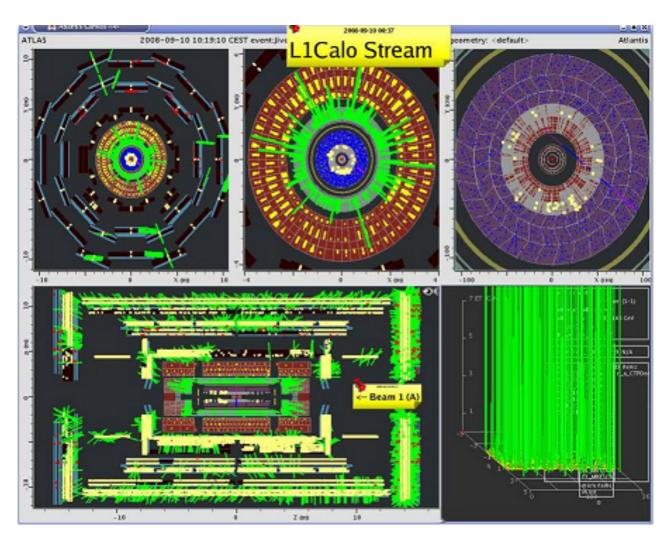


図 4.61 LHC first beam のイベントディスプレイ [24]

# 第5章

# オフラインデータ処理システム

ATLAS のオフラインデータ処理システムに求められる性能は、ATLAS の大量のデータを素早く処理し無駄なく永続的に保存すること、そして世界中の研究者が迅速にデータにアクセス可能であることである。Tier-0、Tier-1、Tier-2 という階層構造を持たせ、Tier-1以降を世界中に分散させ Grid コンピューティングによってリソースを効率的に共有することでこれを実現している。EFトリガーを通過したイベントの RAW データは、まずTier-0 に送られ、データ処理を挟みつつ Tier-1、Tier-2 と順に下流に流れていく。処理の過程で RAW データからは ESD、AOD といった解析用のデータファイル及び、それらのTAG 情報等が生成され、RAW データと共に保存される。貴重な実験データの破損を防ぐため常に複数個所に同じデータのレプリカを保存する仕組みになっている。Tier-0 はCERNに、Tier-1 は世界中の主要拠点 10 箇所に作られた。Tier-2 は国単位で 1~4 箇所程度、全体で 34 箇所となる予定である。この章では、初めにオフラインデータフォーマットの概要及び、オフラインシステムの概要を述べる。次に、Tier-0 上で走る、TGC 用のRAW データデコードプログラムの概要とその開発について述べる。

# 5.1 ATLAS のデータ保存フォーマット

# 5.1.1 RAW (ByteStream Data)

各検出器のエレクトロニクスで処理された生データは ROD でまとめられ、規定のフォーマットで並べられる。これを RAW データと呼んでいる。フォーマットは ByteStream と呼ばれる 0 と 1 のシリアルデータで、特定の 0 と 1 の並びによってデータの始まりを表すヘッダーと、終わりを表すトレイラー、及びそれに挟まれたデータ部分からなる。 RAW データのサイズは 1.6MB/event と見積もられている。 EF トリガーを通過したイベントは、 EF 内に  $30 \sim 50$  個ある SFOs(Sub-Farm Output managers) に適当に振り分けられ、1000 イベント又は 2GB を単位として 1 つのファイルにまとめられる。1 つのファイルができる

毎に SFOs は Tier-0 にファイルを送信する。EF での処理順にイベントが割り振られるために、ファイル内の各イベントはトリガーの種類や時系列順にソートはされていない。ただし run の切れ目ではファイルを一旦閉じるため、1 つのファイル内に異なる run のイベントが混在することはない。RAW データは以下の4種類のストリームから構成される。

• physics:メインの物理データ(~260MB/S)

• calibration/alignment: キャリブレーションデータ生成用 (45MB/s)

● express: HLT、検出器アルゴリズムのチューニング用 (~6MB/s)

● pathological: 異常データ (極少量)

physics がメインデータで、通常の物理トリガーによるデータである。calibration/alignment はキャリブレーショントリガーによるもので、よく知られた物理を含んでいる可能性が最も高いイベント群である。メインデータのリコンストラクションの精度を上げるためのキャリブレーションデータを作るのに用いられる。express はハイレベルトリガーや検出器のアルゴリズムのチューニングに用いられる。pathological は EF で異常が検知されたデータの一部を送信するようになっている。

# 5.1.2 ESD (Event Summary Data)

ESD は RAW データを解読した結果である各検出器におけるヒット情報、トリガー情報のオブジェクトや、それを基に再構成されたトラック情報、エネルギークラスタ情報等のデータを含む。ESD に含まれるデータからは解析者が自身のアルゴリズムを使ってトラックやジェットを再構成することも可能である。POOL ROOT file という複雑な構成をしたフォーマットで、1 つの RAW データファイルに対して 1 つの ESD ファイルが作られる。データサイズは 500KB/event、625MB/file と見積もられている。

# 5.1.3 AOD (Analysis Object Data)

AOD は ESD からさらに抽象化を進め事象の情報に特化したもので、検出器レベルの情報は含まない。ESD 同様 POOL ROOT file 形式で作られ、データサイズは 100KB/eventと軽い。一般的な物理解析の手法としては、まず AOD にアクセスし必要な物理情報を含むイベントを探し、荒い解析をし、それから必要な場合に ESD、場合によっては後述する RDO のレベルまで遡って詳しい解析を行うという手順とる。そのため、AOD は他のデータと比較して最も頻繁にアクセスされると予想され、目的とする物理チャンネルに属する AOD へ効率的にアクセス可能な仕組みが必要となる。そこで、AOD が作られる際には 10 種類のストリームにグループ分けされ、物理的にクラスター化されて保存される。実際には物理チャンネルは多様であり 10 種類では足りないのだが、細分化したチャンネ

ルに AOD を振り分けていくと、1 つのイベントが複数のチャンネルに属する場合が多々あるために、重複して保存されるイベントが頻繁に生じてしまう。そこで、細かな振り分けは後述の TAG による分類に託し、ストリームでは、重複の生じない、かつ予測されるアクセスパターンに対してなるべく効率的なグルーピングを模索し、その結果が現在の10 種類の分類となった。AOD は一度 10MB/file 程度の小さな AOD を作った後に、ストリームを考慮して 50 ファイルを結合し 500MB/file 程度にする。これは細かいファイルが散乱しているとアクセスが遅くなるからである。

### 5.1.4 TAG

TAG 情報は AOD と同時に生成され、イベントレベルのメタデータとそのイベントに対するポインタからなる。全イベント、ストリーム毎、物理チャンネル毎など、様々なレベルで細分化した TAG のコレクションが作られる。1 つのイベントは複数のコレクションに属するのが通常であり、物理解析を行う際にはこのコレクションを活用することで効率的なデータの収集を行うことが可能となる。データそのものではなくポインタをコレクション化することでリソースの節約を実現しており、データサイズは AOD の 1/100 程度である。

# 5.2 オフラインシステムのコンピューティングモデル

ATLAS のオフラインデータ処理システムの構成は Tier-0、Tier-1、Tier-2 と 3 階層になっていて、Tier-0 は CERN のコンピューターファームに実装される。Tier-1 は全世界の主要な拠点 10 箇所に作られ、それぞれが全体の 1/10 程度のデータの保存及び Tier-2 への配信を担当する。Tier-2 は各 Tier-1 の下に複数あり、世界中の研究者へのデータの配信、及びコンピューターリソースの提供を行う。Tier-1 とその傘下の Tier-2 の 1 グループを Cloud と呼んでいる。(図 5.1) この節では、RAW データがオフラインシステム上でどのような流れで処理され、上で述べた ESD、AOD、TAG といったデータが生成されるのかを説明する。

#### 5.2.1 Tier-0

Tier-0 は CERN 内に実装される。図 5.2 に示す通り、Castor、CPU farm、DDMS、T0MSの 4 つのサプシステムからなり、

- EF から送られてきた RAW データを迅速にリコンストラクトし ESD、AOD、TAG を生成する。(first pass processing)
- RAW データ、first pass リコンストラクトデータを Castor テープに永久保存する。

# Cloudモデル

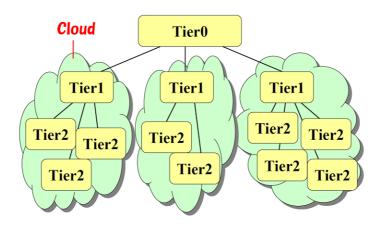


図 5.1 Cloud モデルの概念図 [35]

● 下流に位置する 10 箇所の Tier-1 に RAW データ及びリコンストラクトデータを分配する。

といった役割を担う。Tier-0 は CERN 一箇所にしかないので、アクセスの集中を避けるために、Castor 上のデータへのアクセスはは central production group 及び、first-pass calibration group のみに制限される。以下に各サブシステムの役割について述べる。

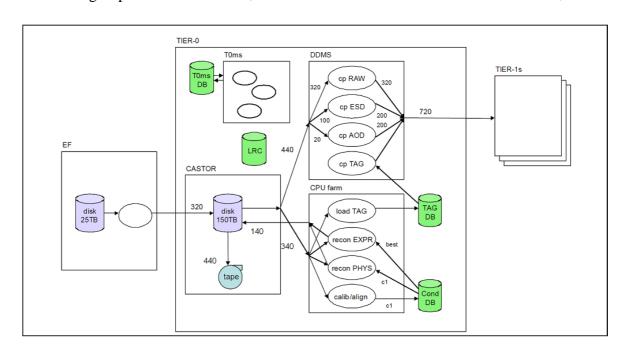


図 5.2 Tier-0 の全体図 [2]

図中に示した数字はデータの転送速度 [MB/s]

#### 5.2.1.1 Castor

Castor は記憶媒体として一時保存用のディスクと、永久保存用のテープを持っている。Castor は EF の SFOs から送られてきた RAW データファイルをディスクに一時保存し、テープに永久保存する。RAW データを基に Tier-0 の CPU farm において生成された ESD、AOD、TAG ファイルも同様にディスクを経由してテープに永久保存される。また、DDMS は Tier-1 以下にデータを分配するためにディスクから RAW 及びリコンストラクトデータを読み出す。この一連の処理が終了するまでの間、Castor ディスクはこれらの情報を保存しておかなければならない。一秒間に EF から送られてくる RAW データは 1.6MB/event  $\times$  200Hz = 320MB/s、そこから作られるデータが ESD:100MB/s、AOD:20MB/s、TAG:0.2MB/s で、テープへの書き込みは約 440MB/s となる。一日分のEF からの入力データは最大で約 25TB と見積もられており、ディスク容量は入力用が125TB、アウトプット用が25TB 確保されている。処理には数日の時間がかかる場合もあるのでディスクに処理待ちの RAW データが溜まる場合もあるが、90% 以上は2 日以内に処理が終わると見積もられており、5 日分の余裕で十分だと考えられる。

#### 5.2.1.2 CPU farm

キャリブレーションデータ (Conditon DB) の生成、リコンストラクション、TAG DB 生成のジョブが実行される Tier-0 の心臓部である。約 5MSI2k の演算能力を持つ。Castorのディスクからのデータの読み出しは、RAW:320MB/s + AOD:20MB/s + TAG:0.2MB/s = 計 340MB/s、書き込みは ESD:100MB/s + AOD:20MB/s×2 + TAG:0.2MB/s = 約 140MB/s 程度が見込まれている。以下、それぞれのジョブの概要を説明する。

#### Conditon DB の生成

RAW データの calibration/alignment ストリームを最初にリコンストラクトすることで、メインデータのリコンストラクション用の参照データベースを生成する。このストリームに含まれるのはすでによく知られた物理を含むイベントで、これを解析することで run 毎に異なる細かい補正を与える。

#### first pass リコンストラクション

physics、express ストリームのリコンストラクションを行い、ESD、AOD、TAG ファイルを生成する。この際 Condition DB を参照することで、より正確なリコンストラクションを行うことが可能となっている。ジョブは 2 段階にわかれており、初段では 1 つの RAW データファイルに対して 1 つの ESD と 10 個の小さな AOD が作られる。この生成データは一旦 Castor に戻され、ESD はそのままテープに保存される。AOD 結合ジョブが Castor から小さな AOD ファイルを読み出し、ストリームを考慮して 50 個を 1 ファイル

にまとめ大きな AOD を作る。この merged AOD は Castor に戻されテープに保存される。 当初の計画では初段では AOD は作らず、Castor から ESD をまとめて読み出して大きな AOD を作るというスキームも考えられていたが、この場合 Castor からの ESD 読み出し に 100 MB/s のトラフィックが必要となる。一方現在の方式だと読み出しに余分に必要と なるのは AOD の 20 MB/s のトラフィックで済む。

#### TAG DB の生成

リコンストラクションで生成された TAG ファイルをディスクから読み出し、その run の全イベントの情報を含んだ TAG DB を生成する。

# 5.2.1.3 DDMS (ATLAS Distributed Data Management System)

DDMS は Tier-1 へのデータの分配を行う。ディスクから読み出した RAW データ及び、ESD、AOD、そして TAG DB を 10 箇所の Tier-1 に分配する。RAW データはそれぞれ 全体の 1/10 程度を均等に各 Tier-1 に、ESD は 1/5 を各 Tier-1 に、AOD 及び TAG は全 データが全ての Tier-1 にコピーされる。よって必要なトラフィックは、RAW:320MB + ESD:100MB/s×2 + AOD:20MB/s×10 + TAG:0.2MB/s×10 = 約 720MB/s と見積もられる。

# 5.2.1.4 TOMS (Tier-0 Management System)

TOMS は名前の通り、Tier-0 におけるオペレーションの管理を行う。CPU farm で行われる各種のジョブや、Castor から DDMS へのデータ転送の実行の順番やタイミングを管理してパフォーマンスを最適化する。

### 5.2.2 Tier-1

Tier-1 は世界の大規模計算機センター 10 箇所に実装される。表 5.1 に一覧を示す。その役割は以下の通り。

- RAW データ及び first pass リコンストラクションデータの保存。
- RAW データからの再度のリコンストラクション (reprocessing)、その結果の保存。
- Tier-2 への AOD 及び TAG DB の分配。
- Tier-2 で作られたシミュレーションデータの保存、Cloud 内のファイルカタログ、 Condition DB の管理、提供。

1 箇所の Tier-1 には全 RAW データの 1/10、全 ESD の 1/5、全 AOD 及び TAG DB が保存される。自己が保存する ESD のさらに半分、正味全体の 1/10 に対して保存の主要な責任を負い、残り半分は他の Tier-1 のバックアップとなる。主要な責任を負う 1/10 の ESD は、自身が保存する 1/10 の RAW データと対応した ESD となる。残りの半分

は他の Tier-1 が主要な責任を負い、そのバックアップとしてデータを保存する。最初の reprocessing はデータが取得されてから数ヵ月後に行われることになっており、この際に は、calibration/alignment ストリームだけでなく、first pass で生成された physics ストリームの ESD もキャリブレーションに用いて、より精度の高いリコンストラクションを目指す。以後は毎年、前年までのデータを用いたキャリブレーションデータと最新のアルゴリズムを用いて reprocessing を繰り返す予定である。なお、2008 年 12 月には、2008 年の 10 月に取得された宇宙線データに対して最初の reprocessing が実行された。最新のリコンストラクションによる ESD、AOD、TAG DB は Tier-1 上のディスクに保持され、迅速なアクセスが可能であることが要求される。一方、RAW データ及び古いバージョンの ESD、AOD、TAG DB は Tier-1 のテープ上に永久保存され、アクセス速度は遅くなる。Tier-1 のデータへのフルアクセスは ATLAS の各グループの production manager 及び central production group の reprocessing 担当班のみに制限される。

### 5.2.3 Tier-2

Tier-2 は比較的大きな計算機資源を持つ大学や研究所等に実装され、解析の拠点となる。現在は国単位で 1~5 箇所程度、全体で 37 箇所ある。シミュレーションデータの生成、データの解析のためのリソースの提供、解析グループへの AOD と TAG のアクセスの提供を役割とする。AOD は Cloud 内でフルデータを保持するように Tier-2 間で分散保持し、TAG は全ての Tier-2 がフルデータを保持する。一部の Tier-2 では少量の RAWデータ及び ESD もコード開発用に保持する。また、細かい物理解析の目的毎に AOD から引き出した DPD(Derived Physics Data) も Cloud 内で管理され Tier-2 で保持される。図 5.4、図 5.3 に日本の東京大学 ICEPP にある Tier2 の写真を示す。表 5.2 に 2008 年末時点の Tier2 の一覧を示す。



図 5.3 ICEPP Tier-2 の CPU farm[35]



図 5.4 ICEPP Tier-2 のテープライブラリ (テープの集合体)[35]

表 5.1 2008 年末時点の Tier-1 一覧 [34]

研究所名	国	CPU[MSI2K]	DISK[PB]	TAPE[PB]
TRIUMF	カナダ	1.06	0.62	0.4
CC-IN2P3	フランス	3.02	1.76	1.15
FZK	ドイツ	2.4	1.44	0.9
CNAF	イタリア	1.76	0.8	0.67
NDGC	北欧	1.46	0.62	0.62
SARA	オランダ	3.05	1.78	1.16
PIC	スペイン	1.2	0.72	0.45
ASGC	台湾	1.87	0.83	0.71
RAL	イギリス	1.57	0.89	1.03
BNL	アメリカ	5.3	3.09	2.02
Total		22.69	12.55	9.11

表 5.2 Tier-2 一覧 [34]

研究所名	国	研究所名	国
University of Melbourne	オーストラリア	Grid London	イギリス
UIBK Innsbruck	オーストリア	North Grid	イギリス
Beijing LCG2	中国	Scot Grid	イギリス
FZU AS	チェコ	South Grid	イギリス
CC-IN2P3 AF	フランス	Boston/Harvard ATLAS T2	アメリカ
France GRIF Paris	フランス	Southwest ATLAST2	アメリカ
France LPC Clermont-F	フランス	Midwest ATLAST2	アメリカ
LAPP Annesy	フランス	Grate Lakes ATLAS T2	アメリカ
LIP	ポルトガル	SLAC ATLAS T2	アメリカ
DESY	ドイツ	Brazilian Tier-2 Federation	ブラジル
Freiburg University	ドイツ	Taiwan Analysis Facility Federation	台湾
Wuppertal University	ドイツ	Russian Federation RDIG	ロシア
ATLAS Federation Munich	ドイツ	ATLAS Federation	スペイン
INFN-Tier-2 Federation	イタリア	HEP-IL Federation	イスラエル
ICEPP	日本	East Tier-2 Federation	カナダ
Polish Tier-2 Federation	ポーランド	West Tier-2 Federation	カナダ
Romanian Tier-2 Federation	ルーマニア	SIGMA	ノルウエイ
CSCS	スイス	SNIC	スエーデン
SiGNET	スロベニア		

# 5.2.4 オフラインシステムにおける処理の流れ

オフラインシステムにおけるデータ処理の流れを時系列で簡単に示す。図 5.5、図 5.6 には、Tier-0、Tier-1 におけるデータの流れのイメージ及び、想定されるデータ量を示した。

- 1. RAW データが EF の SFOs から Tier-0 の Castor ディスクへ送られ、テープに永久 保存される。
- 2. DDMS を通して RAW データが Tier-1 にコピーされる。
- 3. calibration/alignment ストリームから Condition DB が作られる。
- 4. Tier-0 で express ストリームのリコンストラクションが行われ、結果は Castor へ。
- 5. Tier-0 で physics ストリームのリコンストラクションが行われ、結果は Castor へ。
- 6. DDMS を通して first pass ESD が Tier-1 にコピーされる。
- 7. DDMS を通して first pass AOD が Tier-1 にコピーされる。
- 8. AOD が Tier-1 から Tier-2 ヘコピーされる。
- 9. DDMS を通して TAG DB が Tier-1 にコピーされる。
- 10. TAG DB が Tier-1 から Tier-2 ヘコピーされる。
- 11. 定期的に Tier-1 において reprocessing が行われる。
- 12. 新バージョンの AOD と TAG が Tier-2 にコピーされる。
- 13. 旧バージョンの ESD や AOD は Tier-1 のテープ上のみに保存され、ディスクから 消去される。

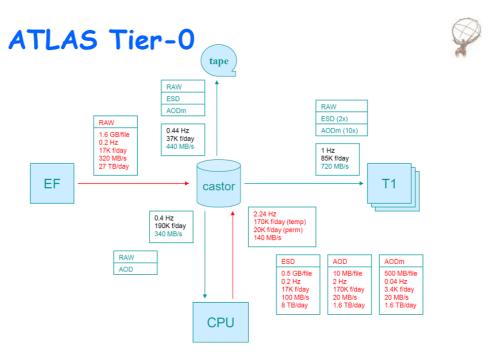


図 5.5 Tier-0 のデータの流れ [34]

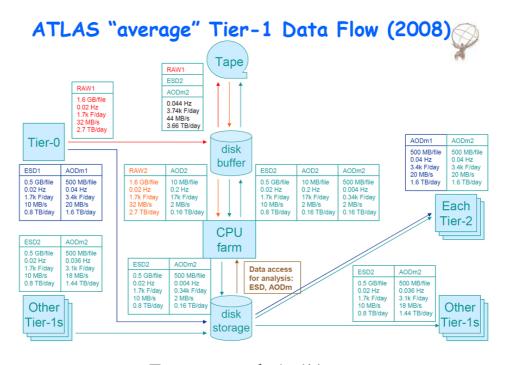


図 5.6 Tier-1 のデータの流れ [34]

# 5.3 オフラインソフトウェアの概要

ATLAS のソフトウェアは Athena という C++ と python をベースとしたフレームワークで開発されている。ATLAS のような大規模実験では、保存されるデータの型やそれを作る仕組みが長期間にわたって、容易にメンテナンス可能あることが求められる。それを満たすために各検出器グループ間やシミュレーショングループ間でコードシェアを行い、クラスの共有や継承をしている。例えば、電磁カロリメータとハドロンカロリメータでは RAW データの段階ではデータの型は全く異なるが、そこから作られる Calo Cell, Calo Tower, Energy Cluster といったデータオブジェクトは型を共有しており、それらを処理するアルゴリズムも共通である。他にも、内部飛跡検出器と MDT でトラックオブジェクトの基本型を共有し、トラッキングのアルゴリズムも一本化している。図 5.7、図 5.8 にそれぞれのトラックオブジェクトの成り立ちを示す。TrkPrepRawData という基本となるトラック型を共有しているのがわかる。

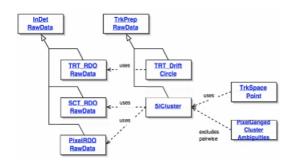


図 5.7 内部飛跡検出器のトラックオブジェクトクラスの成り立ち [24]

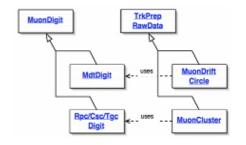


図 5.8 MDT のトラックオブジェクトクラ スの成り立ち [24]

# 5.3.1 ソフトウェアのバージョン管理

ATLAS で使われるソフトウェアは CVS(Concurrent Versions System) を使ってバージョン管理される。関連するソフトウェアをまとめたものはプロジェクトと呼ばれ、公式なリリースのバージョンアップはプロジェクト単位で行われる。プロジェクトには様々な依存関係があるが、同じバージョンのプロジェクトを利用すれば動くようにバージョンは管理される。図 5.9 にプロジェクトの依存関係を示す。(オンラインソフトウェアも含む) 例えば AtlasProduction\_13.0.30 は、AtlasAnalysis\_13.0.30 に依存しており、AtlasProduction の14.0.0 を作りたい時は同時に依存する AtlasAnalysis にも 14.0.0 を用意する必要があり、各プロジェクトの開発グループ間で連携をとってアップデートを進めていかねばならない。プロジェクトの中で各ソフトウェアはパッケージ、サブパッケージとさらに細かいグルーピングがされ、同様にプロジェクト内でも連携をとってアップデートを進めていく。

Tier-0 で行われる first pass processing に用いられるデコード及びリコンストラクションのソフトウェア群は AtlasTier0 というプロジェクトで管理され、Tier-1 で行われる reprocessing に用いられるものは、AtlasProduction プロジェクトで管理される。中に含まれるパッケージ等の構成は共通であるが細かい点で各コードの中身が異なり、特に AtlasTier0 プロジェクトはなによりも安定性が重視される。これは Tier-0 のプロセスで処理が止まると検出器からのデータがロストする恐れがあるためである。

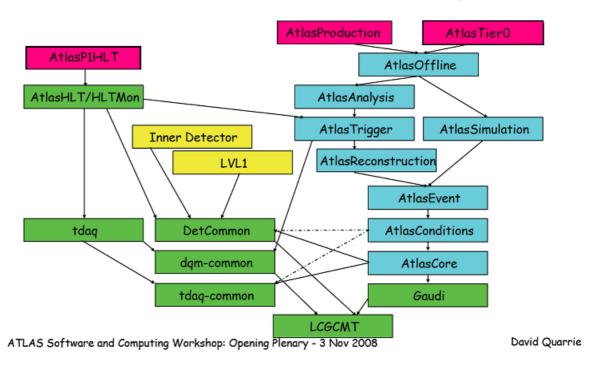


図 5.9 ATLAS のプロジェクトの依存関係 [36]

紫の AtlasProduction,AtlasTier(),AtlasP1HLT が最前線のプロジェクト。HLT はオンライン DAQ のトリガーを 司るプロジェクト。

# 5.4 オフラインデコードの流れ

実験の実データは RAW  $\to$  RDO  $\to$  PRD  $\to$  ESD  $\to$  AOD と変換される。またシミュレーションによる生成データは RDO レベルで統合され、以後の流れは実データと共通である。ここではまず RDO と PRD という中間のデータフォーマットと、シミュレーションデータの流れについて説明する。次にミューオンスペクトロメータのデコードの流れについて説明する。

# 5.4.1 RDO (Raw Data Object)

Byte Stream フォーマットの RAW データを読み取り、各検出器におけるヒット情報やトリガー情報をオブジェクト化したものが RDO である。それぞれのオブジェクトの持つデータは検出器によって様々であるが、エレクトロニクスのモジュールやチップの ID やチャンネルの番号付けなど、ByteStream 上の数値がそのまま入っている。オブジェクトの構成は各検出器のモジュールの構成等を反映するため、それぞれ大きく異なる。そのため、システムのコミッショニングには RDO レベルの情報が非常に有用である一方、その検出器システムに精通していないと理解が難しい。

# 5.4.2 PRD (Prepared Raw Data)

RDO の情報からさらに抽象化を進め、ヒットやトリガーの位置座標や、どのチェンバー上の情報かなど、よりグローバルな人々が理解できる形に直したデータである。そのためオブジェクトの型には各検出器グループ間で取り決めた、ある程度の制約がある。ESDには PRD レベルの情報は全て含まれることになっている。その他の ESD に含まれる情報は、リコンストラクションによって得られたトラック情報やカロリメータのエネルギークラスタ情報、そしてイベントのタグ情報等である。

# 5.4.3 シミュレーションデータ生成の流れ

図 5.10 にシミュレーションの場合のデータの流れを示す。初めにイベントジェネレータ (pythia や single particle gun がよく使われる) によって粒子のデータ (MCTruth) を生成する。このデータを Geant4 を用いて ATLAS 検出器との相互作用の物理シミュレートを行う。シミュレーションの大半の時間はここに費やされ、ATLAS のジオメトリを様々に変化させた複数通りのシミュレーションが行われている。次に、相互作用シミュレーションの結果の物理データを、ATLAS の各検出器システムの出力に変換するディジタイゼーションを行う。この段階のデータ (Digit) は実データの RDO に対応し、以降のPRD→ESD→AOD という処理は実データと全く同様に行われる。またフルシミュレーションは時間がかかるため、MCTruth から直に AOD を作る Fast シミュレーションが用意されている。

# 5.4.4 ミューオンスペクトロメータのデコードの流れ

図 5.11 にミューオンスペクトロメータの RAW データからのデコードの流れを示す。 図の左側がシミュレーションデータ、右側は実データである。各検出器のデータの変換は

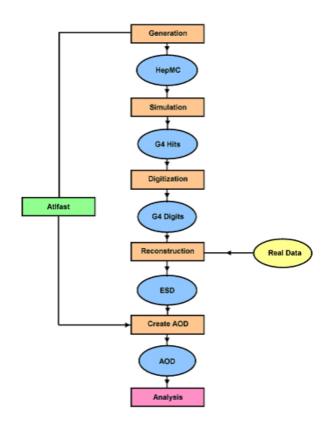


図 5.10 シミュレーションデータ生成の流れ [38]

独立に行われるが、出力は同じファイルにまとめて格納される。ByteStream から RDO へ の変換は ByteStreamConverter によって行われる。ByteStreamConverter はヘッダーやト レイラーを見つけると、その間の検出器データをフォーマットに従い読み取って数値化し、 RDO オブジェクトの変数に代入する。こうして出来た RDO オブジェクトは Collection 化され Container に入れられる。次に RDOToPRDConverter は、これらの Container を呼 び出して、各検出器毎に RDO の変数から PRD の変数の値を計算して PRD オブジェクト を作り同様に Collection 化して Container に格納する。この際、各検出器とそれらの読み 出しシステムの配線を反映した Cabling Service が用いられる。例えば、エレクトロニク スの X 番のモジュールの ID: Y のチップは検出器上のチャンネル Z に対応するというよ うな関係がある時、(X,Y) Zの相互変換が Cabling Service の持つ関数を利用するだけ で可能である。MDT のみ、BS から PRD へ直接変換され、Condition DB を参照したリ コンストラクションが行われ、Moore や Mboy といった異なるアルゴリズムを用いたト ラッキングが行われる。図のところどころで右側の AANtuple への出力があるが、これは Athena Aware Ntuple というフォーマットの略で、各段階での情報を AANtuple 形式で出 力してやることで、プログラムのデバッグを行う。AANtuple は root の入力として直接読 みこませるが可能なため頻繁なデバッグに適している。PRD 及びトラック情報は ESD に そのまま格納される。

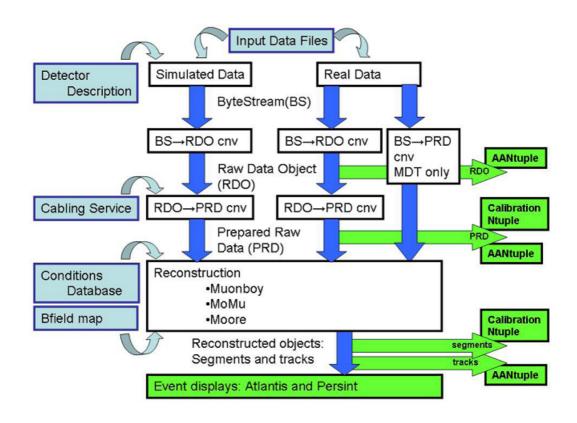


図 5.11 RAW データから PRD までの流れ [37]

# 5.5 TGC オフラインデコードソフトウェアの概要

この節では、以下の TGC データのオフラインデコードプログラムについて述べる。

- その際に使用される"TGCcablingInterface", "TGCcabling12", "TGCcabling"
- RAW→RDO→PRD の変換を行う"MuonTGC\_CnvTools"
- デバッグやキャリブレーションのために AANtuple へ TGC の RDO や PRD を格 納する"MuonCommAlgs"
- RDO オブジェクトを定義する"MuonRDO"
- PRD オブジェクトを定義する"MuonPrepRawData","MuonTrigCoinData"

ミューオン全体のパッケージである MuonSpectrometer は、Cabling や Converter 等の役割毎にサブパッケージとして分類され、サブパッケージがさらに階層構造を持つ場合もある。プログラムはいずれかのパッケージに属し、その中の他のプログラムと共にバージョン管理される。また各プログラム自体も複数のコードからなるため、プログラム内でも足並みを揃えたバージョン管理が必要である。図 5.12 にパッケージ構成を示す。

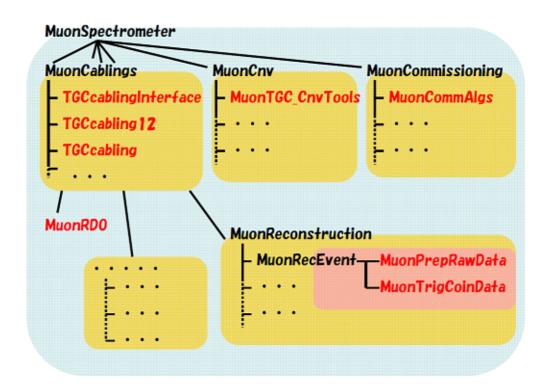


図 5.12 TGC デコードプログラムのパッケージ構成

# 5.5.1 Cabling Service

ATLAS のような大きな検出器になると、読み出しチャンネルが膨大になり、当然それらのチャンネルの信号を処理するエレクトロニクスの数や種類も膨大な数に及ぶ。例えばTGC だけでも 30 万を超える読み出しチャンネルがあり、使用されるエレクトロニクスモジュールは主要な 5 種だけでも合計 3 万個近い。さらにそれらモジュール間の配線は非常に複雑なものになり、特定のチャンネルからの信号の流れを追うのには大変な労力を要し、間違いも生じやすい。そこでこれらの配線やジオメトリを考慮したデータベースを作り、読み出しチャンネルとエレクトロニクス系の ID 情報の対応を即座に正確にとれるようにした。配線やジオメトリのデータベースを一箇所に集中することでメンテナンスも容易となるメリットもある。この実装が Cabling Service である。TGC 部分は以下の 3 つのプログラムからなる。

- 1. TGCcablingInterface 名前の通り TGC の Cabling Service を使用する際の窓口となるベース部分である。
- TGCcabling12
   現在の 1/12 セクターに基づく 12 回対称性の配線を考慮した CablingService の本体部分。実データでは基本的にこちらを使用する。

### 3. TGCcabling

過去の 8 回対称性の配線を考慮したもの。シミュレーションでは長らくこちらが使用されてきたが 2008 年後半から徐々に 12 回対称性への移行準備が整ってきた。

#### 5.5.1.1 Offlineld

Cabling Service では OfflineId という ID が用いられる。OfflineId は、チェンバー上の1つのチャンネルに対して1つ割り振られ、TGCの30万以上あるどのチャンネルの間でも重複することはない。Cabling Sevice の関数を用いると、OfflineId から、そのチャンネルの信号読み出しシステム上にある全てのエレクトロニクスの ID を得ることができる。また逆に、チャンネルを1つに特定するのに十分なエレクトロニクスの ID の集合があれば、それらから OfflineId を求めることも出来るようになっている。エレクトロニクスの ID の集合は、組合せによって ReadoutId や HighPtId などと呼ばれる。これについては、MuonRDO クラスについて説明するところで後述する。

### 5.5.2 MuonTGC\_CnvTools

RAW→RDO→PRD の変換を行うのがこのプログラムである。図 5.13 にクラスの構成を示す。RAW→RDO を担う、ByteStreamConverter 部分と、RDO→PRD を担う RdoToPrdConverter 部分からなる。

# 5.5.2.1 ByteStreamConverter

TGCのRAWデータは、SSW 及びRODにおいて、決められたフォーマットに従ってヘッダーとトレイラーを付けて並べられたByteStreamデータである。ByteStreamConverterはヘッダーを起点にして何番目のbitを読めば何の数値が入っているかを知っているため、RAWデータの特定bitを切り出して読み取り、それをRDOオブジェクトの変数へ代入していく。なお、TGCには現在RAWデータのフォーマットが2種類存在している。「Readout」フォーマットと、「RawData」フォーマットである。これはRODが未完成であるための暫定的な処置で、最終的にRODが完成すればReadoutフォーマットのみが使用される予定である。しかしながらコミッショニングのために正しいデータが必要なので、現在はSSWからの出力にヘッダーとトレイラーを付けただけのRawDataフォーマットも同時に出力させている。両フォーマットへの対応は2種類の「TGC\_RodDecorder」(Readout 用)と「TgcROD\_Decorder」(RawData 用)というコードを、ジョブオプションによって切り替えて使い分けることで実現している。Readoutフォーマットの出力にはバグがあるため、本論文も含め、検出器のコミッショニングに用いているのは全てRawDataフォーマットデータをデコードしたものである。

### 5.5.2.2 RdoToPrdConverter

RDO オブジェクトのコンテナを呼び出して、RDO の変数から PRD の変数を計算して PRD オブジェクトの変数に代入する。この際には、Cabling Service がフルに活用される。 TGC における実装のメインは TgcRdoToPrepDataTool というコードである。このコード のアルゴリズムについては後に述べる。

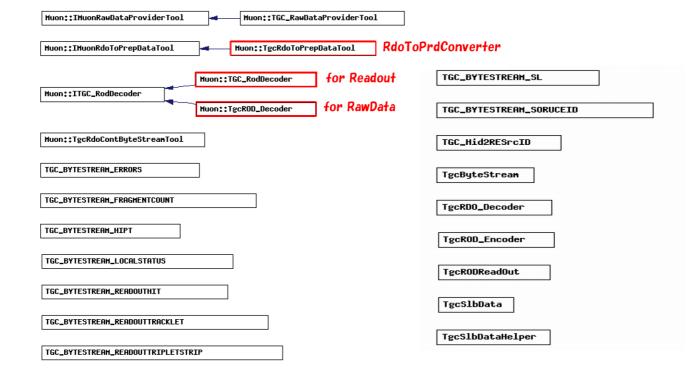


図 5.13 MuonTGC\_CnvTools のクラス図 [37]

# 5.5.3 MuonCommAlgs

Converter によって作られた RDO、PRD のコンテナを呼び出して、イベント内の RDO、PRD オブジェクトに対してループさせその変数を AANtuple に格納するという役割を持つプログラムである。TGC 部分は TgcPrepRawDataNtuple というコードが受け持つ。このコードをいじることで、どの変数を AANtuple に格納するかを変えることができる。AANtuple はデバッグやキャリブレーションに用いられる。公式リリースでは PRD 変数のみを入れるようにしているが、後に述べる RdoToPrdConverter のローカルのデバッグ作業の際には、RDO と PRD の変数を比較するために RDO の情報も入れるように変更して用いた。

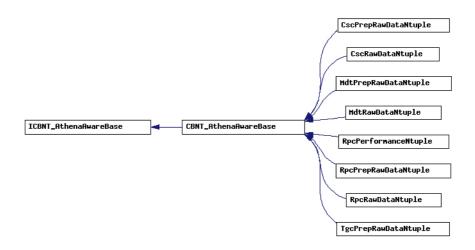


図 5.14 MuonCommAlgs のクラス図 [37]

### 5.5.4 MuonRDO

ミューオンの RDO の型はここで定義される。図 5.15 にクラスの構成を示す。

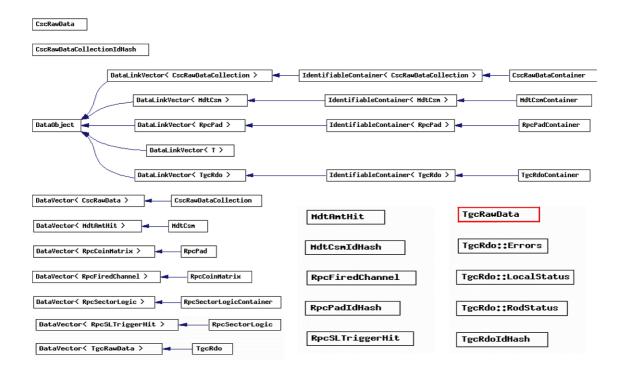


図 5.15 RDO のクラス図 [37]

TGC の RDO の型を定義しているのはこの中の TgcRawData というコードである。付録 A.2 に TGC の RDO の持つ変数の一覧を示す。表に示した通り、TGC の RDO には hit、tracklet、highpt、sl の 4 タイプが存在している。まず共通の変数について説明する。

### • bcTag

SLB は L1A を受け取りパイプラインバッファからデータを読み出す際に、対応バンチの前後 1 バンチと合わせ 3 バンチ分読み出すが、「bcTag」はその 3 バンチを識別するための値である。L1A 対応バンチが Current、時系列で 1 つ前が Previous、1 つ後が Next である。

#### • 11Id

TGC の PSB でカウントしたレベル 1 トリガー信号の番号。ECR(Event Counter Reset) 信号を受け取るとカウントは 0 に戻る。

#### • bcId

TGC の PSB でカウントしたバンチの番号。ビームがメインリングを一周するのにかかる時間が約  $89\mu s$  で、バンチ間隔は 25ns なので、メインリング一周分で約 3500 バンチが存在しうる。リング一周に同期した BCReset 信号によってカウントが 0 に戻るため、取りうる数値は  $0 \sim 3500$  程度。

#### subDetectorId

ATLAS の各検出器毎に割り振られた ID で、TGC の A サイドは 103、C サイドが 104 となっている。

#### • rodId

ROD は 1/12 セクターに 1 つずつ割り当てられるので片サイドに 12 個あり、それぞれが  $1 \sim 12$  の ID を持つ。

以下で各タイプについて説明する。

#### 5.5.4.1 hit

TGC の SLB リードアウト系の出力データ (付録 A.5 参照) をもとに作られる。SLB のリードアウト出力 200bit のうち、40-199bit が 1bit ずつ検出器の 1 チャンネルに対応しており、hit があれば bit が立つ。立っている bit1 つにつき、1 つの hitRDO が作られる。例えば 50bit 目、60bit 目に対応する 2 つのチャンネルに hit があった場合、2 つの RDO が作られ、それぞれのオブジェクトの変数 「channel」には 50、60 という数値が代入される。

#### sswId

その信号が通ってきた SSW の ID。BW は 1/12 セクター毎に 8 枚、EI/FI は片サイドで 4 枚の SSW が用いられる。1/12 セクター内で SSW の区別がつくように 0 ~ 8 の ID が割り振られる。

#### slbId

SLB の ID は  $0\sim9$  までしかないのでそのままでは 1 つの SSW につながる SLB の ID に重複が生じてしまう。そこで SSW 内での重複が生じないように割り振られ

たのが sbLoc という ID である。

slbTypeSLB がどのタイプのチェンバー用のものか。

#### • adj

隣り合うワイヤー領域をカバーする SLB 同士は、コインシデンスを取る都合上、端の数チャンネルを共有している。よってその領域のチャンネルに hit があると 2 つの SLB の bit が立ち、RDO が 2 つ作られてしまう。そこで hit オブジェクトを重複してカウントしないように片方の SLB では adjacent というタグを付けてやる。現在は adjacent のオブジェクトは RDO $\rightarrow$ PRD の変換を行わないようにしている。

#### • channel

上述の通り、その SLB が受け持つ最大 160 チャンネルのうち、どのチャンネルの hit かを表す。

#### ReaoutId

subDetectoerId、rodId、sswId、sbLoc、channel、adjacent の 6 つをあわせて ReadoutId と呼ぶ。これらの情報を合わせると、「A サイドの、セクター 2 の、SSW4 に繋がる、sbLoc0 の SLB の担当する、68bit 目」は、「 $\phi$ 4、EWD レイヤー 7 の r 最大のチャンネルである」と 30 万以上あるチャンネルから 1 つに絞り込めるようになっている。Cabling Service の「getReadoutIDfromOfflineID」関数、「getOfflineIDfromReadoutID」関数を用いて OfflineID との相互変換が可能である。

### 5.5.4.2 tracklet

TGC の SLB リードアウト系の出力データをもとに作られる。SLB のリードアウト出力 200bit のうち、0-39bit 目には SLB でのコインシデンスの結果が出力される。トリプレットワイヤーは 1 つの SLB から最大 3 個、トリプレットストリップは最大 8 個、その他は最大 2 個のコインシデンス情報が含まれる。なお、trackletRDO 自体は全ての SLB から作られるが、PRD へ変換されるのはダブレットの SLB のもののみである。コインシデンス情報では検出器のチャンネル単位よりも細かい trgch という単位で位置情報を与える。これは、ダブレットであれば 2 層のスタッガリングにより 1/2 チャンネル、トリプレットワイヤーであれば 3 層による 1/3 チャンネルの単位に相当する。

#### • delta

TGC2 と 3 のヒット間の位置のずれ (trgch 単位)。ワイヤーでは、数値が正ならば、TGC3 のヒットに比べて、TGC2 のヒットが  $\eta$  大 (r 小) にずれている。ストリップでは少々複雑な関係にあり、A サイド F タイプチェンバーと C サイド B タイプチェンバーでは、delta 正ならば TGC2 のヒットが  $\phi$  大側にずれている。C サイド

F タイプチェンバーと A サイド B タイプチェンバーでは、delta 正ならば TGC2 の ヒットが  $\phi$  小側にずれている。ワイヤーのオブジェクトでは- $7 \sim 7$ 、ストリップのオブジェクトでは- $3 \sim 3$  を取る。これはダブレット用 SLB のコインシデンスウィンドウの大きさに対応している。

#### • seg

トリプレットストリップは 1 つの SLB で 2 層  $\times$  64 チャンネルを扱うため、32 ずつにわけて TRIGA(seg=0)、TRIGB(seg=1) と区別している。

#### • sub

slbsubMatrix と呼ばれる。1 つの slbsubMatrix からは1 イベントで1 つのコインシデンス情報しか出てこない。複数のヒットがあった場合デクラスタリングが行われる。また、1 つの slbsuubMatrix は 32trgch からなる。

• rphi

slbsubMatrix 内のどの trgch でコインシデンスがとれたかという情報。TGC3 上の値。

#### LowPtCoincidenceId

subDetectoerId、rodId、sswId、sbLoc、slbsubMatrix、rphiのセットをこう呼ぶ。ReadoutId 同様に Cabling Service の「getOfflineIDfromLowPtCoincidenceID」関数等を用いて OfflineId との相互変換が可能である。TGC2 と 3 は trackletRDO では 1 つのオブジェクトにまとめられるため、LowPtCoincidenceId から OfflineId を求める時は「middle」というオプションで、true なら TGC2、false なら TGC3 の OfflineId を求めるように選択できる。

#### 5.5.4.3 highpt

SLB のトリガー出力は HPT ボードを経由して SL に届く。HPT の出力は SL でのコインシデンス処理結果と共に SL の SLB から出力される。highptRDO は SLSLB の出力をもとに作られる。HPT では位置情報を ROI 単位で扱う。なお、現在は hipt=1 の RDO のみを PRD へ変換している。

#### • strip/forward

経由した HPT がワイヤー or ストリップ、エンドキャップ or フォワードのいずれのタイプか。

- sector
  - 1/12 セクター内のどのトリガーサブセクターのトリガー情報か。
- chipHPT ボードの何番目のチップを通ったか。
- index

1 つの HPT チップから最大 2 つのトリガー候補が出るが、その 1 番目か 2 番目か。

• hipt

対応する TGC1 と TGC2/3 のコインシデンスがとれたものは 1、TGC2/3 でしかとれなかったものは 0。

• hitId

HPT チップ内が 6 個のマトリックスに分けられていて、そのうちのどのマトリックスを通ってきたか。

• sub

6 個のマトリックスの中はさらに上半分下半分の hptsubMatrix にわかれる。0 が上、1 が下に対応する。hptsubMatrix1 つが ROI1 つに対応する。

• delta

hipt=1 の場合は、TGC1 と TGC2/3 の間の位置のずれ (trgch 単位)。ワイヤーで-15~15、ストリップで-7~7 をとる。これは HPT におけるコインシデンスウィンドウの大きさに対応している。注意点として絶対値の大きいところでは delta は trgch の差分そのものの値を表さない。ワイヤーの  $11 \le |\text{delta}|$  は、trgch 差 12,14,16,18,20 に、ストリップの  $5 \le |\text{delta}|$  は、trgch 差 7,9,12 に対応する。hipt=0 の場合は、SLB から来た TGC2 と 3 の間の位置のずれがそのまま入っているのでワイヤーで-7~7、ストリップで-3~3 をとる。

### HighPtld

subDetectorId,rodId,strip,forward,sector,chip,hitId,hptsubMatrix のあわせると TGC3 上の どの ROI から来た情報かを特定できる。このセットを HighPtId と呼ぶ。ただしワイヤーなら r 方向、ストリップなら  $\phi$  方向の ROI 判別しかできない。Cabling Service の 「getOfflineIDfromHighPtID」関数等を用いて、OfflineId との相互変換が可能である。た だし、HighPtId 側から OfflineId を求める時は、ROI(概ね 8 チャンネル分に相当) までし か特定できないので、Cabling 関数では ROI の中心のチャンネルの OfflineId を取ってくるようになっている。

SimHighptId ソフトウェア開発の初期段階では highptId は少し異なる構成をしていた。これを SimHighPtId と呼ぶ。シミュレーションで生成される Digit に含まれるオブジェクトが持つのは現在でも SimHighptId のままである。また、現在でも Cabling Service の各関数の入出力も SimHighptId のままである。そこで実データで関数を用いる際に、HighPtId SimHighptId の変換が必要となる。これは Cabling Service の「getRDOHighPtIDfromSimHighPtID」、「getSimHighPtIDfromRDOHighPtID」によって実装された。

エンドキャップストリップの HPT のバグ

エンドキャップストリップの HPT ボードにバグが発見されており、chip=1 の、hitId=5,6 の出力が、hitId=3,4 になってしまうことがわかっている。しかし HPT ボードはすでに地下実験ホールにインストール済みで、このバグを修正するにはチップの再生産が必要となるため修復は断念された。そこで、妥協案として該当 HPT ボードで chip=1,hitId=3,4 の出力があった際に、chip=1,hitId=5,6 のオブジェクトも同時に作るようにした。この場合、highptRDO が余分に作られることになるが、不要なイベントをトリガーしてしまう可能性よりも必要なイベントを漏らさないことを優先した。

#### 5.5.4.4 sl

SL において HPT からのワイヤーとストリップの入力のコインシデンスをとった情報をもとに作られる。LUT を用いた 6 段階の  $p_T$  の判別が行われ、1 つの SL からはより大きな  $p_T$  を持つ最大 2 つの sl トリガー情報が出力される。

- index2 つの sl トリガー候補のうち 1 番目か 2 番目か。
- muplus 粒子の電荷の正負。
- threshold6 段階のうちどの p<sub>T</sub> 閾値を超えたのか。
- roi TGC3 上のどの ROI からのトリガー情報か。

# Slld

subDetectorId,rodId,sector,roi,forward から ROI を特定し、ワイヤー、ストリップ双方の OfflineId を得ることが出来る。ただし、Cabling 関数で得られるのは ROI の真ん中のチャンネルの OfflineId である。

# 5.5.5 MuonPrepRawData/MuonTrigCoinData

TGC の PRD の型はこれらで定義される。PRD にも同様に hit,tracklet,highpt,sl の 4 タイプがあり、hit は MuonPrepRawData の中の TgcPrepData で、残りは MuonTrigCoinData の中の TgcCoinData で定義される。図 5.16、A.1 にそれぞれのクラス構成を、付録 A.3 には変数の一覧を載せた。

各タイプの PRD は対応する RDO の情報をもとに作られる。PRD は必ず OfflineId を 1 つ以上持っていて、その OfflineId は RDO の ReadoutId や HighptId 等から Cabling Service

を通して得たものである。また、OfflineId とセットで対応する TgcReadoutElement へのポインタも持っている。TgcReadoutElement とは TGC のチェンバー 1 枚に対応したオブジェクトであり、これと OfflineId を組み合わせることで ATLAS のグローバルな座標系における位置情報を得ることが可能である。

tracklet,highpt,sl の持つ trackletId という数値は、1 つのイベント内でそこからは最大 1 つのトリガー情報しか出さないという単位にチェンバーの領域をわけて ID を振ったものである。具体的にはこの単位は slbsubMatrix が対応する。この値を使うと、同じイベント内で同じ trackletId を持つ trackletPRD、highptPRD、slPRD は同じ hit を起源とするものであるという対応がとれる。

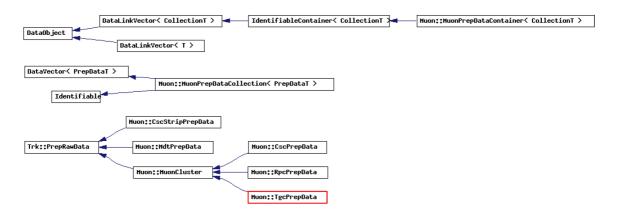


図 5.16 ヒット PRD のクラス図 [37]

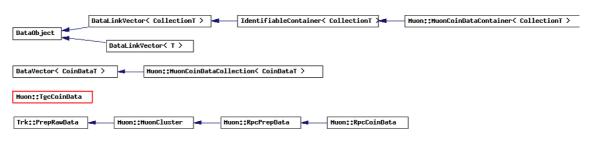


図 5.17 トリガー PRD のクラス図 [37]

以下で各タイプについて簡単に説明する。

#### 5.5.5.1 hit

hit に対応したチャンネルの OfflineId を持つ。オブジェクトとして持つ位置情報 locpos は TgcReadoutElement 内でのローカル位置座標 (チェンバーの中心を 0 とした 2 次元座標系) だが、Cabling Service を通してグローバルな 3 次元デカルト座標に変換可能である。また、その他の基本的な情報 (Ec/Fw, トリプレット/ダブレット, トリガーセクター番号、レイヤー、チェンバー内でのチャンネル番号等) はやはり Cabling Service の TgcIdHelper

というクラスを通して OfflineId から得ることができる。

#### 5.5.5.2 tracklet

現在はダブレットの trackletRDO からのみ作られ、トリプレットの RDO からは作らない。TGC2 の hit と、TGC3 の hit に由来するコインシデンス情報なので、それぞれの hit に対応した 2 つの OfflineId を持つ。同様に位置情報やチャンネル幅もそれぞれ 2 つずつの値を持つ。delta の値は RDO のものがそのまま入る。

#### 5.5.5.3 highpt

現在は hipt=1 の highptRDO からのみ作られる。TGC1 と TGC2/3 の hit からのコインシデンスであり、TGC1 と TGC3 の hit に対応した OfflineId を持つ。ただし ROI レベルでの位置情報しか持たないので OfflineId は ROI の中心のチャンネルのもので代表する。位置座標も同様である。ただし Width という変数はそのチャンネルの幅ではなく、その ROI の幅である。delta の値は RDO のものがそのまま入る。

#### 5.5.5.4 sl

全ての sIRDO が PRD に変換される。ワイヤーとストリップのコインシデンス情報であり、ワイヤーとストリップそれぞれの OfflineId を 1 つずつ持つ。この OfflineId は対応する ROI の中心にある TGC3 のチャンネルで代表する。roi と pt には RDO の roi と threshold の値がそのまま入る。errMat は現在は位置座標のエラーではなくて、ROI の幅がそのまま入っている。

# 5.6 TgcRdoToPrepDataTool の開発

この節では、TGC の RDO→PRD の変換を担う TgcRdoToPrepDataTool というクラスの開発について述べる。

# 5.6.1 要求される役割

Converter として、hit,tracklet,highpt,sl の RDO を正しく過不足なく PRD へ変換できることはもちろんだが、壊れたデータを入力しても正しくエラーメッセージを出して処理を終了出来、途中で止まらないことは最重要である。このプログラムは Tier-0 で走るので、もし処理の途中でスタックしてしまったら他の検出器も含めて ATLAS 全体に多大な損害を与える可能性があるためである。そのため、何か処理を行うたびに、想定外の数値を検出したらエラーを吐いて次の処理に進むような分岐を挟むよう心掛けた。

クラスの持つ主要なメソッドは「decode]、「decodeHits」、「decodeTracklet」、「decodeHiPt」、「decodeSL」の5つである。decode は、RDOのコンテナを読み込んで、イベント毎に全てのRDOに対してループし処理を行う。トリプレットのtrackletRDOや、hipt=0のhighptRDOに大して変換を行わないという設定はここで行っている。読み込んだRDOのタイプに従ってdecodeHits、decodeTracklet、decodeHiPt、decodeSLの各メソッドを呼び出して実際の変換を行う。以下では、実際の変換を担うメソッドのアルゴリズムについて簡単に説明する。

# 5.6.2 アルゴリズム

#### 5.6.2.1 decodeHits

- 1. RDO の ReadoutID から、Cabling の「getOfflineIDfromReadoutID」関数を用いて OfflineId を得る。
- 2. OfflineId をそのイベントの OfflineId のリストに加える。またすでに同じ ID が無いか、重複のチェックも行う。
- 3. OfflineId から対応する TgcReadoutElement を得て、そのチェンバー上での 2 次元 ローカル座標、チャンネル幅を計算する。
- 4.  $\frac{f + \nu \lambda \lambda \mu_{\parallel}}{\sqrt{12}}$  を計算し、これを位置情報のエラーとする。(一様分布の標準偏差)
- 5. hitPRD のコンストラクタに求めた値を代入し、PRD のオブジェクトを作る。
- 6. PRD を対応する PRD コレクションに入れる。なお、コレクションは ReadoutId によって決められる。

#### 5.6.2.2 decodeTracklet

- RDOのLowPtCoincidenceIDから「getOfflineIDfromLowPtCoincidenceID」関数を用いてOfflineIdを得る。なお、ここで求めたOfflineIdはTGC3上のチャンネルのものである。
- 2. RDO の delta と、rphi(trgch 単位の位置座標) から、TGC2 のチャンネルの Low-PtCoincidenceID を求める。この際、TGC3 と TGC2 で異なる slbsubMatrix 及び、SLB に属する場合があり、その場合 rphi だけでなく sbLoc や sub 等の値も変化する。また、ワイヤーの場合 delta が正ならば、TGC3 のヒットに比べて、TGC2 のヒットが  $\eta$  大 (r 小) にずれている。ストリップの場合、A サイド F タイプチェンバーと C サイド B タイプチェンバーでは、delta 正ならば TGC2 のヒットが  $\phi$  大側にずれている。C サイド F タイプチェンバーと A サイド B タイプチェンバーでは、delta 正ならば TGC2 のヒットが  $\phi$  小側にずれている。という関係にあることにも注意しなくてはならない。
- 3. 2. で求めた TGC2 の LowPtCoincidenceID から、TGC2 の OfflineId を得る。
- 4. TGC3 の OfflineId から対応する PRD コレクションを決め、同じコレクション中に 重複する ID が既にないかチェックする。
- 5. 2 つの OfflineId からそれぞれの TgcReadoutElement を得て、2 次元ローカル座標、チャンネル幅を計算する。
- 6. trackletId を計算する。(2×sbLoc+slbsubMatrix)
- 7. PRD のコンストラクタに各変数を代入し、PRD をコレクションに入れる。

#### 5.6.2.3 decodeHiPt

- 1. RDOの HighPtId を、Cablingの「getSimHighPtIDfromRDOHighPtID」関数を用いて SimHighPtId に変換する。
- 2. Cabling 関数を使って SimHighPtId から OfflineId、roi、ReadoutId を求める。ここで求めた OfflineId は ROI 中心のチャンネルかつレイヤー 7 のものである。
- 3. 独自の関数を使って ROI の両端の OfflineId と ReadoutId を求める。共に TGC3 の チャンネルの OfflineId である。
- 4. 3 つの OfflineId と、delta の値を使って TGC1 上の 3 チャンネルの ReadoutId を求める。ROI 両端のチャンネルから求めた TGC1 上の 2 チャンネルに挟まれる領域を便宜上、TGC1 上の ROI と呼ぶことにする。delta とチャンネルのずれの向きの関係は tracklet と同じである。例えばワイヤーの highpt で delta7 なら、TGC3 のヒット位置 (trgch 単位) に比べて、TGC1 のヒット位置が trgch 単位で 7 だけ η 大 (r 小) 側にずれている。

- 5. 6 つの OfflineId から、6 つの TgcReadoutElement 及び、ローカルな 2 次元位置座標を求める。
- 6. ワイヤーの highpt の場合のみ、TGC1 と 3、それぞれの ROI の両端 2 チャンネルのローカル 2 次元座標からグローバルな 3 次元座標を求める。チャンネルがレイヤー 3 又は 7 では無い場合は、衝突点とチャンネルを結ぶ直線の、レイヤー 3 又は 7 上への射影点の座標を求める。このような変換を行う理由は、チェンバー境界上に位置する ROI では両端のチャンネルが異なる TgcReadoutElement に属するので、ローカル座標のままでは差分を取れないからである。ストリップの highpt の場合は ROI がチェンバーを跨ぐことがないのでローカルな座標のままで良い。
- 7. TGC1 と 3、それぞれの ROI 端チャンネルの座標の差分を取ることで ROI の幅を求める。ワイヤーの highpt なら r 方向の、ストリップの highpt なら  $\phi$  方向の幅が求まる。
- 8. TGC3 と 1 の ROI 中心のチャンネルの ReadoutId から trackletId を計算する。 (2×sbLoc+slbsubMatrix)
- 9. PRD のコンストラクタに各変数を代入し、PRD をコレクションに入れる。OfflineId は、TGC3 と 1 の ROI 中心のチャンネルの 2 つを入れる。TgcReadoutElement、ローカル位置座標も同様である。

#### 5.6.2.4 decodeSL

- 1. RDO の SIId から TGC3 ワイヤーの OfflineId を求める。ただし Cabling 関数を用いた場合、ROI の中心に位置するチャンネルの OfflineId しか得られないので、独自に関数を作り、ROI の両端と中心の 3 チャンネルの OfflineId を得ている。この時、中心チャンネルはレイヤー 7(最外) のチャンネルを取るようしている。これは、このチャンネルの OfflineId が最終的に slPRD を代表するので、レイヤーを統一しておきたいためである。
- 2. ROI 中心チャンネルの OfflineId によって対応する PRD を決め、重複する ID が既にないかチェックする。
- 3. ストリップに関しても同様のことをしてやり3 チャンネルの OfflineId を得る。
- 4. 6 つの OfflineId に対して TgcReadoutElement を得て、各チャンネルのローカルな 位置座標を求める。
- 5. ローカルな2次元座標からグローバルな3次元座標を求める。
- 6. チャンネルがレイヤー 7 では無い場合には、衝突点とチャンネルを結ぶ直線のレイヤー 7 上への射影点の座標を求める。
- 7. ワイヤー、ストリップそれぞれの ROI 端チャンネルのレイヤー 7 上での座標 の差分を取ることで r 方向、 $\phi$  方向の ROI の幅を求める。このような変換を行

う理由は、チェンバー境界上に位置する ROI では両端のチャンネルが異なる TgcReadoutElement に属するので、ローカル座標のままでは差分を取れないからである。

- 8. Cabling 関数を用いて、ワイヤー、ストリップそれぞれの ROI 中心の OfflineId から、ReadoutId を求める。
- 9. それぞれの ReadoutId から trackletId を計算する。(2×sbLoc+slbsubMatrix)
- 10. PRD のコンストラクタに各変数を代入し、PRD をコレクションに入れる。OffineId、TgcReadoutElement、ローカル位置座標はワイヤーの ROI 中心のものが代表して入れられる。ROI 幅に関しては、変数名は errMat となっているものの、 $\sqrt{12}$  で割らず、求めた幅をそのまま  $2\times 2$  の対角行列に入れたものである。第一成分が r 方向、第 2 成分が  $\phi$  方向の幅である。

# 5.7 RDO→PRD の検証

TgcRdoToPrepDataTool が正しく変換を出来ているか、処理中にスタックすることがないか検証を行った。2008 年 7 月  $\sim$  10 月の試運転で採取された宇宙線データを用いた。

# 5.7.1 エラーデータに対する耐久性チェック

上記期間のデータ 20 万イベントを処理しスタックがないことを確認したが、この期間中の試運転には EI/FI が含まれなかった。後に、9 月の EI/FI 参加ランのデータを用いることで、decodeHits メソッド中に、EI/FI 関連のバグが見つかり修正された。その後、2008 年 10 月に行われた EI/FI を含む長時間ランのデータを使用した検証では 100 万イベント以上を処理したがスタックは生じていない。現在、Tier-0 上で走るパッケージがまとめられているプロジェクト「AtlasTier0」及び、Tier-1 での reprocessing に用いられる「AtlasProduction」に、上で述べたアルゴリズムを実装した TgcRdoToPrepDataTool がタグされており、すでに 2008 年 12 月に行われた第一回の reproccessing で実際に使用され、耐久性に問題ないことが確認されている。今後、試運転や本運転が行われる際には、Tier-0 においてもこのコードが走ることになる。

# 5.7.2 データ変換の正しさの検証

MuonCommAlgs を改造し、RDO と PRD のデータを両方とも AANtuple に落とすように設定し、AANtuple を root で解析することで変換の正しさのチェックを行った。以下に TGC 全セクターが参加した 2008 年 10 月の RUN91627 の宇宙線データ (57000 イベント)を使用した検証の例をいくつか示す。

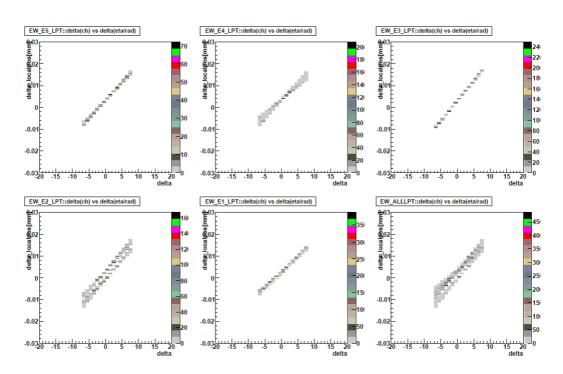


図 5.18 tracklet, A サイド, EW: delta vs  $\Delta pos(\eta)$ 

エンドキャップワイヤーの tracklet オブジェクトのプロット。delta を横軸に、(TGC2 上のヒット位置 - TGC3 上のヒット位置) を縦軸にとった。位置は η で差をとっている。上段左から順に TGC3 上のヒット位置が T5,T6,T7,T8,T9 のもの、下段右は全てのチェンバーのプロットを重ねたもの。2009 年 1 月現在、Cabling Service を通してグローバルな位置座標を求める際に使用する AtlasGeometry にバグが見つかっており、 TGC3,T8, レイヤー 6,7 のワイヤー座標が 1 チャンネル分 r 小側にずれることがわかっている。下段左の T8 の プロットはまさにそのバグを反映した結果となっている。

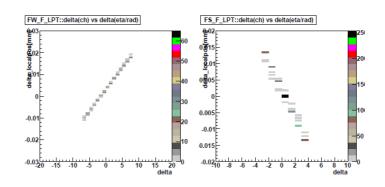


図 5.19 tracklet, A サイド, FW(左)/FS(右): delta vs  $\Delta pos(\eta/\phi)$ 

フォワードワイヤー (左)、フォワードストリップ (右) の tracklet オブジェクトのプロット。delta を横軸に、 (TGC2 上のヒット位置 - TGC3 上のヒット位置) を縦軸にとった。位置はワイヤーは擬ラピディティ  $\eta$ 、ストリップは  $\phi$ [rad] で差をとっている。A サイドフォワードは B タイプチェンバーなのでストリップは負相関になる。 つまり delta 正の時、TGC2 の方が  $\phi$  が小さい。(5.5.4 参照)

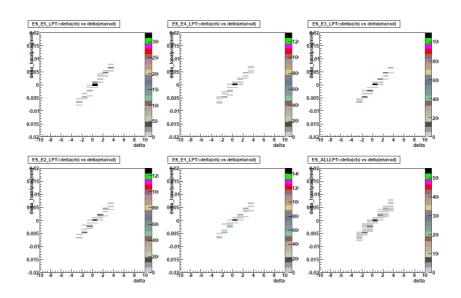


図 5.20 tracklet, C サイド偶数  $\phi$ -ES : delta vs  $\Delta$ pos( $\phi$ )

エンドキャップストリップ,C サイド, 偶数  $\phi$  トリガーセクター (付録 A.1 参照) の tracklet オブジェクトのプロット。delta を横軸に、(TGC2 上のヒット位置 - TGC3 上のヒット位置) を縦軸にとった。位置は  $\phi$ [rad] で差をとっている。上段左から順に TGC3 上のヒット位置が T5,T6,T7,T8,T9 のもの、下段右は全てのチェンバーのプロットを重ねたもの。C サイドエンドキャップ偶数  $\phi$  は B タイプチェンバーなので正相関になる。(5.5.4

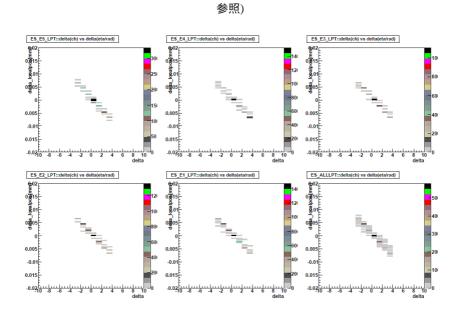


図 5.21 tracklet, C サイド奇数  $\phi$ -ES: delta vs  $\Delta$ pos( $\phi$ )

エンドキャップストリップ,C サイド, 奇数  $\phi$  トリガーセクター (付録 A.1 参照) の tracklet オブジェクトのプロット。delta を横軸に、(TGC2 上のヒット位置 - TGC3 上のヒット位置) を縦軸にとった。位置は  $\phi$ [rad] で差をとっている。上段左から順に TGC3 上のヒット位置が T5,T6,T7,T8,T9 のもの、下段右は全てのチェンバーのプロットを重ねたもの。C サイドエンドキャップ奇数  $\phi$  は F タイプチェンバーなので負相関になる。(5.5.4 参照)

137

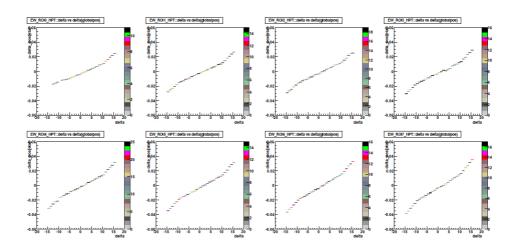


図 5.22 highpt, A サイド, EW,  $ROI_{column}$ 0-7: delta vs  $\Delta pos(\eta)$ 

A サイド, エンドキャップワイヤーの highpt オブジェクトのプロット。delta を横軸に、(TGC1 上のヒット位置 - TGC3 上のヒット位置) を縦軸にとった。位置は  $\eta$  で差をとっている。上段左から順に TGC3 上のヒット位置 が  $\mathrm{ROI}_{\mathrm{column}}$ 0,1,2,3,4,5,6,7 のもの。(付録 A.4 参照)  $11 \leq |\mathrm{delta}|$  の領域で傾きが約 2 倍になっているが、5.5.4.3 で述べた delta と trgch 差分の関係を正しく反映している。

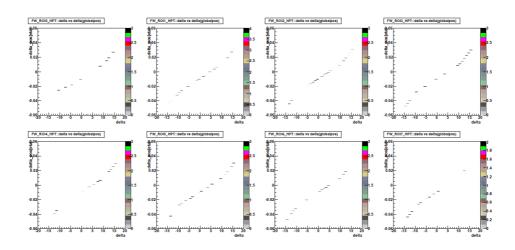


図 5.23 highpt, A サイド, FW,  $ROI_{column}$ 0-7: delta vs  $\Delta pos(\eta)$ 

A サイド, フォワードワイヤーの highpt オブジェクトのプロット。delta を横軸に、(TGC1 上のヒット位置 - TGC3 上のヒット位置) を縦軸にとった。位置は  $\eta$  で差をとっている。上段左から順に TGC3 上のヒット位置が ROI $_{
m column}$ 8,9,10,11,12,13,14,15 もの。(付録 A.4 参照)  $11 \le |{
m delta}|$  の領域で傾きが約 2 倍になっているが、 5.5.4.3 で述べた delta と trgch 差分の関係を正しく反映している。

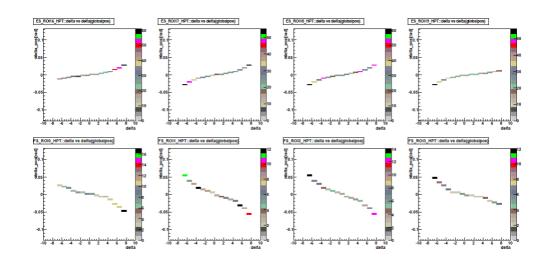


図 5.24 highpt, A サイド,ES 偶数  $\phi(\pm)/FS\phi(2)$ : delta vs  $\Delta pos(\phi)$ 

A サイドの、エンドキャップストリップ偶数  $\phi$  トリガーセクター及び、フォワードストリップ  $\phi$ 2 トリガーセクター (付録 A.1 参照) の highpt オブジェクトのプロット。delta を横軸に、(TGC1 上のヒット位置 - TGC3 上のヒット位置) を縦軸にとった。位置は  $\phi$ [rad] で差をとっている。上段左から TGC3 ヒット位置が T5 チェンバー (ROI $_{row}$ 16,17,18,19) のもの、下段左から TGC3 ヒット位置が T2 チェンバー (ROI $_{row}$ 0,1,2,3) のもの (付録 A.4 参照)。A サイドはエンドキャップ偶数  $\phi$  は F タイプチェンバー、フォワードは B タイプチェンバーなので、それぞれ正相関、負相関になる。(5.5.4 参照)

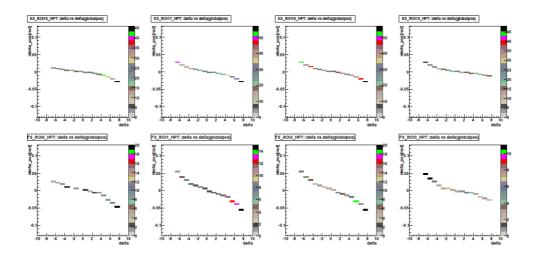


図 5.25 highpt, A サイド,ES 奇数  $\phi$ (上)/FS $\phi$ 2(下): delta vs  $\Delta$ pos( $\phi$ )

A サイドの、エンドキャップストリップ奇数  $\phi$  トリガーセクター及び、フォワードストリップ  $\phi$ 0 トリガーセクター (付録 A.1 参照) の highpt オブジェクトのプロット。delta を横軸に、(TGC1 上のヒット位置 - TGC3 上のヒット位置) を縦軸にとった。位置は  $\phi$ [rad] で差をとっている。上段左から TGC3 ヒット位置が T5 チェンバー (ROI $_{row}$ 16,17,18,19) のもの、下段左から TGC3 ヒット位置が T2 チェンバー (ROI $_{row}$ 0,1,2,3) のもの (付録 A.4 参照)。A サイドはエンドキャップ奇数  $\phi$  とフォワードは B タイプチェンバーなので、共に負相関になる。 (5.5.4 参照)

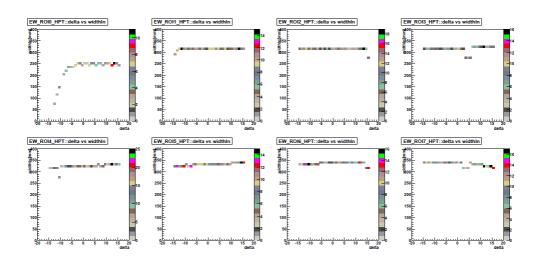


図 5.26 highpt, A サイド, EW,  $ROI_{column}$ 0-7: delta vs widthIn

A サイド、エンドキャップワイヤーの highpt オブジェクトのプロット。delta を横軸に、widthIn(=TGC1 上の ROI 幅 [mm]) を縦軸にとった。(5.6.2.3、付録 A.3 参照) 上段左から順に TGC3 上のヒット位置が ROI<sub>column</sub>0,1,2,3,4,5,6,7 のもの。(付録 A.4 参照) 左上の ROI<sub>column</sub>0 はワイヤーの r 大側の端にあたるため、delta が小さくなる (TGC1 上の位置が r 大側にずれる) につれて ROI 幅が狭くなっていくという特徴が正しく 表れている。いくつかある不連続な点は、チェンバー境界の OR チャンネルの影響で 1 チャンネル分 ROI 幅が ずれてしまうというアルゴリズム上の仕様である。

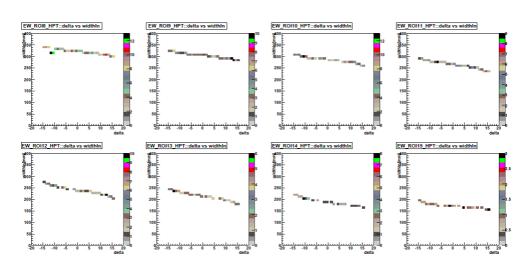


図 5.27 highpt, A サイド, EW, ROI<sub>column</sub>8-15: delta vs widthIn

A サイド、エンドキャップワイヤーの highpt オブジェクトのプロット。delta を横軸に、widthIn(=TGC1 上の ROI 幅 [mm]) を縦軸にとった。(5.6.2.3、付録 A.3 参照) 上段左から順に TGC3 上のヒット位置が ROI<sub>column</sub>8,9,10,11,12,13,14,15 のもの。(付録 A.4 参照) TGC は r 小側のチェンバーほど 1 チャンネルの持つワイヤーの本数が少なくなる (チャンネル幅が狭くなる) という特徴を持つが、ROI<sub>column</sub> が大きくなるにつれて widthIn が小さくなっていくのはこの特徴の表れである。

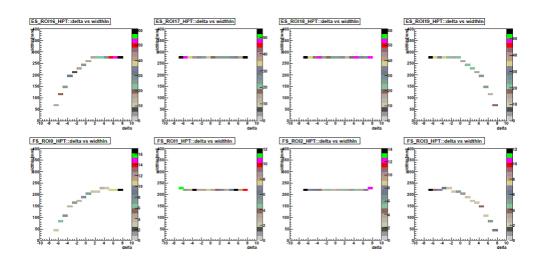


図 5.28 highpt, A サイド, ES T5(上)/FS(下): delta vs widthIn

A サイドの、エンドキャップストリップ及びフォワードストリップの highpt オブジェクトのプロット。delta を 横軸に、widthIn(=TGC1 上の ROI 幅 [mm]) を縦軸にとった。(5.6.2.3, 付録 A.3 参照) 上段左から TGC3 ヒット位置が T5 チェンバー (ROI $_{row}$ 16,17,18,19) のもの、下段左から TGC3 ヒット位置が T2 チェンバー (ROI $_{row}$ 0,1,2,3) のもの (付録 A.4 参照)。上下段の両端はチェンバー端にあたるため、delta がチェンバー端側に いくにつれて ROI 幅が狭くなっていくという特徴が正しく表れている。

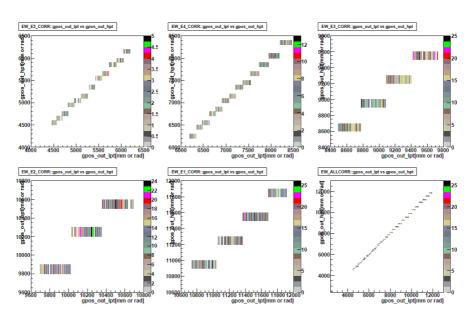


図 5.29 A サイド, EW, tracklet pos vs highpt pos

TGC3 のヒット位置を、A サイド、エンドキャップワイヤーの、対応する tracklet(横軸) と highpt(縦軸) オブジェクト間で比較したもの。ヒット位置は ATLAS グローバル円筒座標 (2.1.1.1) における r[mm] で比較している。上段左からヒット位置が T5,T6,T7,T8,T9 のもの、下段右は全てのチェンバーをあわせたもの。highpt における位置は ROI の中央のチャンネルで代表するため、縦方向は ROI の境目で不連続になる。綺麗に ROI の構造が見えており、正しい相関がとれているのがわかる。

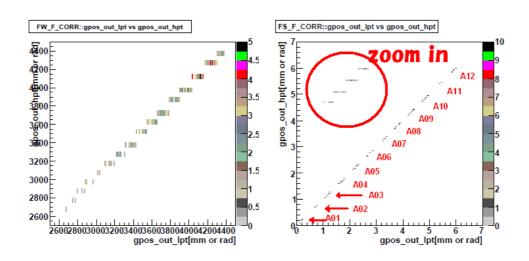


図 5.30 A サイド, FW(左) / FS(右),  $\phi$ 2 トリガーセクター: tracklet pos vs highpt pos

TGC3 のヒット位置を、A サイド、フォワードの対応する tracklet(横軸) と highpt(縦軸) オブジェクト間で比較したもの。ヒット位置はワイヤーとストリップそれぞれ、ATLAS グローバル円筒座標 (2.1.1.1) における r[mm] と  $\phi$  で比較している。highpt における位置は ROI の中央のチャンネルで代表するため、縦方向は ROI の境目で不連続になる。ワイヤーでは綺麗に ROI の構造が見えており、正しい相関がとれているのがわかる。ストリップは 12 個の塊があるように見え、A01~A12 の 1/12 セクターの中の  $\phi$ 2 トリガーセクターに相当する。この図ではプロットしていないが、間に  $\phi$ 0 トリガーセクターに対応する塊が入れば連続になる。フォワードのトリガーセクターは 1 チェンバーからなり、塊を拡大すると図中の赤丸内のような 4 つの ROI 構造が見える。

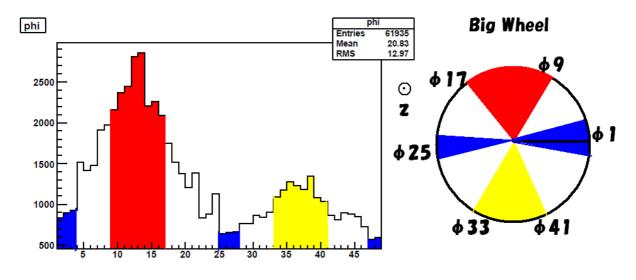


図 5.31 SL, A サイド: ø vs SL オブジェクト数

横軸はビッグウィールを  $\phi$  方向に 48 分割して番号を振ったもの。(図右側参照) 縦軸はその  $\phi$  で作られた SL オブジェクトの数。SL オブジェクトの数は、そのまま TGC によってトリガーされた宇宙船の数に対応する。図中の赤と黄色の領域は数多く、青の領域は数が少ない。これは天頂角方向から飛来する宇宙線が多いことを反映している。横方向のセクターのストリップでは delta が大き過ぎるものが多く多くアクセプタンスが低下する。

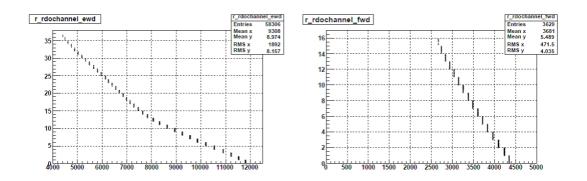


図 5.32 SL, A サイド EW(左) / FW(右): pos(r) vs ROI<sub>column</sub>

A サイドの SL オブジェクトの位置と ROI の相関をワイヤー方向に取ったもの。横軸は SL オブジェクトの位置情報を ATLAS グローバル円筒座標 (2.1.1.1) における r[mm] で表した。縦軸は  $ROI_{column}$ (付録 A.4 参照)。 rが大きくなるにつれて傾きが緩やかになるのは、チャンネル幅の増加によって 1 つの ROI が担当する領域が広くなることを反映している。

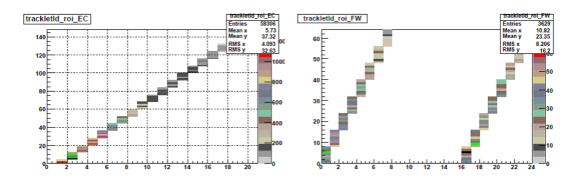


図 5.33 SL, A サイド E(左)/ F(右): trackletId vs ROI

A サイドの SL オブジェクトの trackletId(横軸) と ROI 番号 (付録 A.4 参照) の相関を取ったもの。正しく対応がとれている。

### 第6章

# TGC の動作検証

4 で述べたように TGC は現在、設計、量産、インストールの工程をほぼ終え、最終調整 段階に入っている。2008 年の 9 月  $\sim$  10 月に行われた ATLAS 全体の統合試運転にはビッグウィール全 24 セクター + EI/FI のフルセクターで参加し、長時間のランでも比較的安定した動作を見せた。試運転時の長時間ランの宇宙線データを用いて TGC システムが設計通りの動作をしているか現在検証中である。検証の一例として、第 5 章で述べた PRD コンバータの動作確認の意味合いも兼ねて、リードアウトラインとトリガーラインのデータの整合性の確認を行った。また、チェンバーの検出効率を求め、HV(印加電圧)の異なる4 つの長時間ランのデータを比較することで HV の適正値の見積もりを行った。以下でそれぞれについて説明する。

### 6.1 リードアウトデータとトリガーデータの位置情報の整 合性

PRD の 4 種類のオブジェクトには、それぞれ位置情報が含まれている。具体的には、hit にはそのヒット位置情報、tracklet には対応する TGC2 と 3 上のヒット位置情報、highpt には対応する TGC1 と 3 上の ROI 幅と ROI 中心位置情報、sl には TGC3 上の ROI 幅と ROI 中心位置情報が入っている。TGC が正常に機能しており、PRD コンバータが正しい 変換を行っていれば、リードアウトデータである hit と、残る 3 つのトリガーデータの位置情報は一致するはずである。図 6.1 に実際に位置情報を比較した図を示す。sl 以外のオブジェクトはワイヤーとストリップが独立しているので、1 つのオブジェクトから得られるのはそれぞれ r 方向、 $\phi$  方向の位置情報のみである。ワイヤーとストリップの2つのオブジェクトの位置情報の交点を求めて位置を決定することになる。ただし highpt と sl の位置情報は幅をもっているので一点には定まらない。実際に highpt と sl から求まる領域の中で、hit 及び tracklet のワイヤーとストリップの位置を表す直線が交わっている。

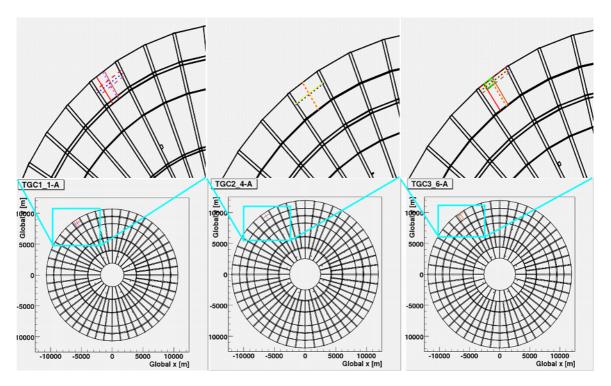


図 6.1 イベントディスプレイによる hit,tracklet,highpt,sl の位置情報の比較

左から TGC1,2,3。上段は下段を拡大したもの。円盤は TGC のビッグウィールを ATLAS の外側から見たもの。 縦軸は ATLAS グローバルの y 軸 [mm]、横軸は x 軸 [mm]。TGC1 と 3 にある赤と茶の点線と線で囲まれた領域はワイヤーとストリップの highpt の WidthIn と WidthOut から求めた ROI の領域。TGC2 と 3 にある黄色の線は tracklet の位置。青とピンクはワイヤーとストリップの hit の位置。ただし hit はトリガー条件を満たすもののみを選び表示している。 TGC3 のみにある緑色の四角は sl の位置及び errMat(r 方向、φ 方向の ROI幅) から求めた領域。sl 及び、highpt から求めた ROI の内側で tracklet 及び hit の、ワイヤーとストリップの線が交わっているのが見て取れる。

#### 6.2 PRD オブジェクトの階層構造の確認

トリガーデータの 3 つの PRD(tracklet, highpt, sl) はそれぞれ、TGC のトリガースキーム (3.2 参照) の LPT トリガー、HPT トリガー、SL トリガーに対応するものである。LPT トリガー (TGC2-3 間のコインシデンスの要求)、HPT トリガー (LPT + TGC1-3 間のコインシデンスの要求)、SL トリガー (ワイヤー、ストリップ双方の HPT トリガーを要求 論理ファイルの書き換えにより変更可能) と進むにつれて条件は厳しくなっていく。よって、上位のトリガーデータに対しては必ずその元となった下位のトリガーデータが存在 するはずである。実際にそのような階層構造になっているかを確認した結果を表 6.1 に示す。対応は tracklet,highpt,sl のトリガーデータ間では trackletId(5.5.5 参照) を用いて行った。tracklet に対応する hit を探す際は OfflineId(5.5.1.1 参照) を用いて行った。計算の際

には、ストリップ HPT ボードのバグ (5.5.4.3 参照) による影響は除いている。sl を起点にした場合、ワイヤー、ストリップ共に 96% 程度しか下位のオブジェクトが見つかっていない。なお、ストリップで highpt/sl を計算していないのは、データ取得時のトリガー条件が、「ワイヤーの HPT トリガー ストリップの LPT トリガー」であったからである。この場合、ストリップ highpt が無くても SL トリガーが発行されるので、sl を起点に highpt を探しても低い割合でしか見つからない。また、ストリップの hit/tracklet も 96% しか見つかっていない。他の場合は 99.5% 以上見つかっており、データ送信中のビット化け等がある事も考慮すればこの部分は正しいと言える。問題点は

- 1. sl に対して下位トリガーデータが見つからない場合がある。
- 2. ストリップで hit と tracklet のどちらかの OfflineId がおかしい場合がある。

の2種類である。tracklet/highpt はワイヤー、ストリップ共に正しいと思われるので、前者は SL における SL トリガー判定に原因がある可能性がある。SL モジュールの FPGA に焼きこむ論理ファイルは現在も改良中であり、SL が USA15 に設置されるおかげで今後もアクセスは比較的容易である。よって今後 SL 関連のアップデートにより数値が改善される可能性は十分にある。次に後者だが、可能性の 1 つは PRD へのコンバータや Cabling Sevice 関連のソフトウェア上のバグであり、現在も検証中である。他の可能性は SLB、SSW、ROD 等のエレクトロニクス上のバグだが、この場合は修復困難となる。

表 6.1 PRD 間の階層チェック

分母のオブジェクトを起点として、対応する分子のオブジェクトがあるかどうかを探す。対応は tracklet,highpt,sl のトリガーデータ間では trackletId を用いて行う。 tracklet に対応する hit を探す場合は OfflineId を用いて行う。

分子 / 分母	数の比	割合
Wire		
hit / tracklet	992010 / 996567	99.54%
tracklet / highpt	162456 / 162457	99.99%
tracklet / sl	864019 / 884743	97.66%
highpt / sl	151070 / 151186	96.66%
Strip		
hit / tracklet	1011336 / 1053554	96.99%
tracklet / highpt	272539 / 272563	99.99%
tracklet / sl	850322 / 884743	96.11%

#### 6.3 検出効率

チェンバーが宇宙線の通過に対して、どれくらいの割合で信号を出すか (検出効率) を評価した。用いたデータの一覧を表 6.2 に示す。ビッグウィール 24 セクターは 4 つのラン全てに参加し、実際にトリガーを発行していた。その際のトリガー条件は前述の通り、「ワイヤーの HPT トリガー (TGC1-3 間のコインシデンス) ストリップの LPT トリガー (TGC2-3 間のコインシデンス)」である。

表 6.2 検出効率の評価に用いたデータの一覧

RUN	HV	闘電圧	E [mV]	Gate <sup>[</sup>	幅 [ns]	データ採取日時	気圧
Number	[V]	wire	strip	wire	strip	年/月/日/時	[hPa]
91800	2650	80	80	35	45	08/10/15/18:44:00-08/10/16/00:07:07	976.6
90525	2750	80	80	35	45	08/10/01/22:27:35-08/10/02/08:52:14	969.1
90413	2800	80	80	30	45	08/09/30/20:19:11-08/10/01/05:15:30	972.9
91636	2850	80	80	35	45	08/10/14/12:37:32-08/10/14/17:42:29	980.0

例として、RUN91800(ワイヤー:図 6.2, ストリップ:図 6.4)、RUN90413(ワイヤー:図 6.3, ストリップ:図 6.5) の検出効率を図にまとめた。ワイヤーでもストリップでも、HV を上げることで全体的に検出効率が大きく上がっている。ところどころにある、色のついていないチェンバーは、HV のトリップや DCS の不調等で HV をかけることが出来なかったチェンバーである。また著しく検出効率が低いチェンバーは、HV や ASD の閾値電圧がうまくかからなったこと等に起因する。

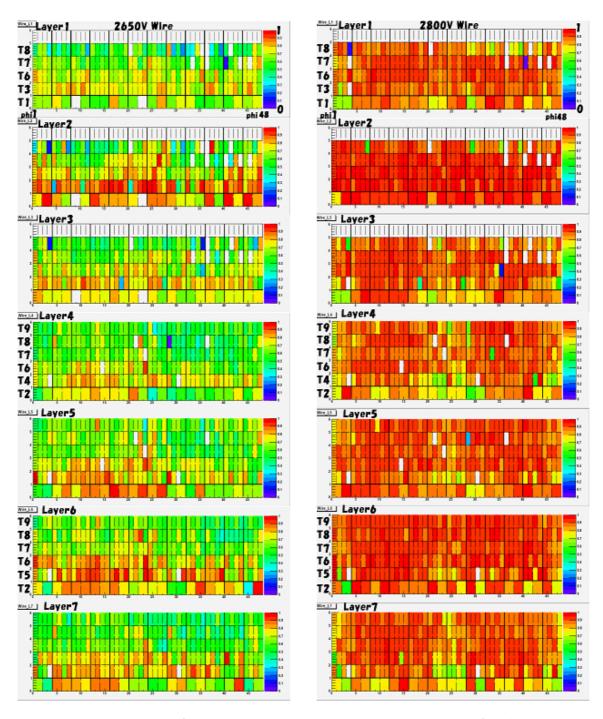


図 6.2 2650V:A サイドビッグウィールの ワイヤー検出効率

図 6.3 2800V:A サイドビッグウィールの ワイヤー検出効率

横軸に phi 番号 (A.1 参照)、縦軸はチェンバーの種類を 横軸に phi 番号 (A.1 参照)、縦軸はチェンバーの種類を表す。ただし T1/2 は phi1-24 しかないので横軸 2 目盛表す。ただし T1/2 は phi1-24 しかないので横軸 2 目盛で 1 チェンバーである。色がそのチェンバーのワイで 1 チェンバーである。色がそのチェンバーのワイヤーの検出効率を表す。HV:2650Vの RUN91800のヤーの検出効率を表す。HV:2800Vの RUN90413のデータで、緑色が多く検出効率は全体的に低い。データで、赤色が多く検出効率は全体的に高い。

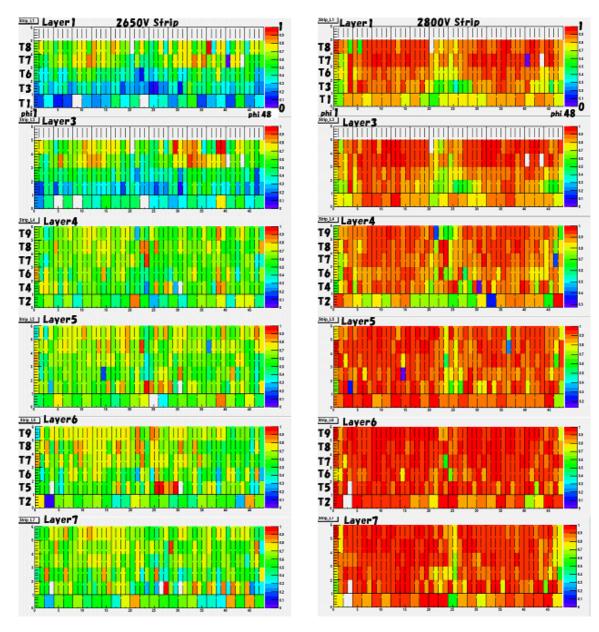


図 6.4 2650V:A サイドビッグウィールの ストリップ検出効率

図 6.5 2800V:A サイドビッグウィールの ストリップ検出効率

横軸に phi 番号 (A.1 参照)、縦軸はチェンバーの種類を 横軸に phi 番号 (A.1 参照)、縦軸はチェンバーの種類を表す。ただし T1/2 は phi1-24 しかないので横軸 2 目盛表す。ただし T1/2 は phi1-24 しかないので横軸 2 目盛で 1 チェンバーである。色がそのチェンバーのストで 1 チェンバーである。色がそのチェンバーのストリップの検出効率を表す。HV:2650Vの RUN91800の リップの検出効率を表す。HV:2800Vの RUN90413のデータで、緑色が多く検出効率は全体的に低い。 データで、赤色が多く検出効率は全体的に高い。

#### 6.3.0.1 検出効率と HV の関係

4 つのラン全てを使って、HV の値とワイヤーの検出効率の関係をレイヤー毎に求めたものが図 6.6 である。1 つのグラフの中には、チェンバーの種類毎にわけて検出効率を求めたものと、全てのチェンバーを合算して求めたものを示した。エラーは、検出効率を求める際の分母を n、検出効率を  $\varepsilon$  として、2 項分布の標準偏差  $\sqrt{\frac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{n}}$  を用いた。チェンバーの種類毎に、HV に変化に対する検出率の変化の大きさは異なっているが、基本的な方向性としては、HV が上がることによって検出効率が上がっている。しかし、2800V から 2850V へ上げた場合、一部のチェンバーでは逆に検出効率が下がってしまっている。全チェンバーの合算値を見ると、2800V のほうが 2850V よりも検出効率が高い傾向が見える。よって本番を含めた今後のオペレーションでは 2800V を基本的な設定値とするのが良いと思われる。表 6.3 に、HV:2800V の RUN90413 における全チェンバー合算のワイヤー検出効率の値を載せた。

この時のダブレットの平均検出効率  $\varepsilon=91.7\%$  という数値を用いて、TGC がアクセプタンス範囲内の粒子通過時にどれくらいの割合で LPT トリガーを出すことが出来るかを見積もってみる。LPT トリガーは、TGC2 と 3 の合計 4 層のうち、最低 3 層においてヒットがあることを要求する。よって、

LPT トリガー効率 
$$E = \varepsilon^4 + {}_4C_1 \times \varepsilon^3 \times (1 - \varepsilon) \simeq 96.3\%$$

となる。TGC はアクセプタンスの範囲内では 99% の効率を目指しているので、現状の数字では満足ではない。現時点で検出効率の低下の原因としては例えば以下のものが考えられる。

- 1. ケーブルのスワップや不調エレクトロニクスの存在。
- 2. 発振チャンネルの存在や、ASD 閾値電圧の不調、チェンバーの HV の不調。
- 3. hitPRD を生成するのに関わるソフトウェアのバグ。

1. に関しては事実、10 月の試運転時にチェンバー周りでケーブルスワップがあったことが既にわかっている。これは第 4 章で述べた検査やディレイスキャンによって判明したもので、現時点でアクセス可能な場所に関しては修正済みである。今後、ビッグウィールの移動などによってアクセスの機会があると考えられる部分に関しても準備は整っている。またエレクトロニクスの不調も実際に存在しており、交換可能なものは順次に交換している少なくともこれらの修復作業によって、上記の数字から多少の上昇が見込める。2. に関しては、発振しやすいチャンネルを把握し、閾値を高めに設定したり、不調な ASD やチェンバーは何度も電圧をかけるのに挑戦するといったことでデータのクオリティを高めることは可能である。3. は現在、検出効率に直接かかわるような具体的なバグは見つ

かっていないが、今後他の解析を通して何らかのバグが発見される可能性はある。最終的 にレイヤーあたり 96% の検出効率があれば、LPT トリガーの効率は 99% となるので、今 後もコミッショニングを継続し、検出効率を高めるよう努力する必要がある。

表 6.3 RUN90413(HV:2800V) における各レイヤーのワイヤー検出効率 (全種チェンバー合算)

レイヤー	検出効率	エラー	統計数 (分母の数)
Layer1	88.0%	0.1%	56323
Layer2	92.1%	0.1%	52181
Layer3	86.6%	0.1%	54190
Layer4	90.6%	0.1%	54421
Layer5	90.9%	0.1%	54267
Layer6	93.8%	0.1%	53587
Layer7	91.5%	0.1%	54027

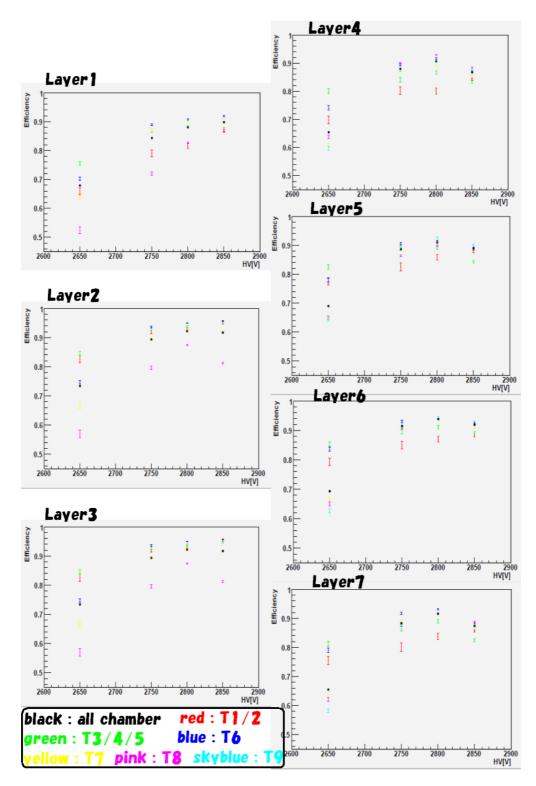


図 6.6 HV を変化させた時のワイヤー検出効率の変化

Run91800(HV:2650V), Run90525(HV:2750V), Run90413(HV:2850V), Run91636(HV:2850V) のデータを用いて、HV(印加電圧) の変化に対するワイヤーの検出効率の変化をプロットした。統計数を稼ぐため A サイドと C サイドの全ての phi を合算した。左上からレイヤー 1,2...7。点の色は図中に示した通りチェンバーの種類を表す。全種チェンバーの合算である黒点は 2800V の時にほぼ全てのレイヤーで最大値を取る。

### 第7章

# まとめ及び TGC コミッショニング の今後について

第4章で述べたように、約10年の月日をかけて、ようやくTGC は全セクターが安定して動く状況まで漕ぎ着けることができた。解析用のオフラインデータの提供に関しても、第5で述べたように実用可能なレベルになっている。LHC のシングルビームをTGC で捉えることにも成功している。とは言え、ビッグウィールの移動や、他の検出器等の移動等に伴い、配線のしなおしや、接続の故障が新たに発生する可能性は十分に考えられる。例えば EI のチェンバーの1 つが他の検出器と衝突し破損するという事故が実際に起こっており、チェンバー交換の機会を待っている状況である。しかしながら、第4章で述べたとおり、配線やモジュールに変更があった時に動作や接続を確認する手法と手順は既に確立済みであり、我々はこのようなアクシンデントがあっても素早く正常な状態に修復可能な体制を整えてきた。また、オペレーション用のステータスモニター等、本番実験開始に備えたツール作りも並行して行ってきた。

LHC のヘリウム漏れ事故により、残念ながら 2008 年秋からの LHC 定常運転は 2009 年夏以降に延期されることとなったが、その間、TGC としては (他の検出器も同様な状況であるが)、より性能を高めるためのコミッショニングに集中可能であるとも言える。第 6章の検出効率の点から見ても、最終的に目指す性能のレベルにはまだ至っていないと言わざるを得ない。実際、事故後の試運転期間に得た長時間宇宙線データや、ディレイスキャン (4 参照) の結果から、新たな配線のミスや、ケーブルとモジュールの故障が発見された。仮に定常運転がはじまってしまえば、地下ホールへのアクセスは非常に限られ、修復は困難となる。定常運転がはじまる前に問題点を修正する機会を得たことは不幸中の幸いと言えるだろう。確かに TGC はまともに動く状況にはなった。しかしやるべきことはまだまだいくらでもあるというのが現状である。今後も実験開始までに可能な限りのクオリティアップを目指し、残された限られた時間を有効利用していかなくてはならない。

# 付録A

A.1 トリガーセクター番号  $\phi$ 

### A.2 RDO の変数一覧

表 A.1 TGC の RDO オブジェクトの持つ変数。hit(上段)、tracklet(下段)。

ET:EndcapTriplet FT:ForwardTriplet ED:EndcapDoublet FD:ForwardDoublet I:Innerstation DW:DoubletWire DS:DoubletStrip TW:TripletWire TS:TripletStrip IW:InnerWire IS:InnerStrip

bcTag	
subDetectorId	
rodId int 1~12 RODのID(= 1/12 セクターの区別) sswId int 0~8 SSWのID(ET:0/1 FT:2 ED:3~6 FD:7 I:8) slbId int 0~25 sbLoc SLBのIDとは少々異なる l1Id int - レベル1トリガーのID bcId int - バンチ ID slbType enum 0~6 0:DW 1:DS 2:TW 3:TS 4:IW 5:IS 6:Unknown adj bool T/F SLBの adjacent 領域の bit か否か tracklet int - 未使用 channel int 40~199 SLBの出力 200bit の何 bit 目か  tracklet bcTag int 0~3 0:Previous 1:Current 2:Next 3:Unknown	bcTag int
sswId int 0~8 SSW の ID(ET:0/1 FT:2 ED:3~6 FD:7 I:8) slbId int 0~25 sbLoc SLB の ID とは少々異なる 11Id int - レベル 1 トリガーの ID bcId int - バンチ ID slbType enum 0~6 0:DW 1:DS 2:TW 3:TS 4:IW 5:IS 6:Unknown adj bool T / F SLB の adjacent 領域の bit か否か tracklet int - 未使用 channel int 40~199 SLB の出力 200bit の何 bit 目か  tracklet bcTag int 0~3 0:Previous 1:Current 2:Next 3:Unknown	DetectorId int
slbId int 0~25 sbLoc SLBのIDとは少々異なる 11Id int - レベル1トリガーのID bcId int - バンチID slbType enum 0~6 0:DW 1:DS 2:TW 3:TS 4:IW 5:IS 6:Unknown adj bool T/F SLBのadjacent 領域のbitか否か tracklet int - 未使用 channel int 40~199 SLBの出力 200bit の何 bit 目か  tracklet bcTag int 0~3 0:Previous 1:Current 2:Next 3:Unknown	rodId int
l1Id int - レベル1トリガーの ID パンチ ID パンチ ID slbType enum 0~6 0:DW 1:DS 2:TW 3:TS 4:IW 5:IS 6:Unknown adj bool T/F SLB の adjacent 領域の bit か否か tracklet int - 未使用 channel int 40~199 SLB の出力 200bit の何 bit 目か tracklet	sswId int
bcId int - バンチ ID slbType enum 0~6 0:DW 1:DS 2:TW 3:TS 4:IW 5:IS 6:Unknown adj bool T/F SLB の adjacent 領域の bit か否か tracklet int - 未使用 channel int 40~199 SLB の出力 200bit の何 bit 目か  tracklet bcTag int 0~3 0:Previous 1:Current 2:Next 3:Unknown	slbId int
slbType enum 0~6 0:DW 1:DS 2:TW 3:TS 4:IW 5:IS 6:Unknown adj bool T/F SLB の adjacent 領域の bit か否か tracklet int - 未使用 channel int 40~199 SLB の出力 200bit の何 bit 目か tracklet	11Id int
adj bool T/F SLB の adjacent 領域の bit か否か tracklet int - 未使用 channel int 40~199 SLB の出力 200bit の何 bit 目か tracklet bcTag int 0~3 0:Previous 1:Current 2:Next 3:Unknown	bcId int
tracklet int - 未使用 channel int 40~199 SLB の出力 200bit の何 bit 目か  tracklet bcTag int 0~3 0:Previous 1:Current 2:Next 3:Unknown	slbType enur
channel int 40~199 SLB の出力 200bit の何 bit 目か tracklet bcTag int 0~3 0:Previous 1:Current 2:Next 3:Unknown	adj boo
tracklet bcTag int 0~3 0:Previous 1:Current 2:Next 3:Unknown	tracklet int
bcTag int 0~3 0:Previous 1:Current 2:Next 3:Unknown	channel int
	eklet
subDetectorId int 102 / 104 A + 4 & C + 4 &	bcTag int
Subdetection III 103/104 A 71 F/C 71 F	DetectorId int
rodId int 1~12 ROD の ID(= 1/12 セクターの区別)	rodId int
sswId int 0 ~ 9 SSW Ø ID(ET:0/1 FT:2 ED:3 ~ 6 FD:7 I:8)	sswId int
slbId int 0~25 sbLoc SLB の ID とは少々異なる	slbId int
l1Id int - レベル 1 トリガーの ID	11Id int
bcId int - バンチ ID	bcId int
slbType enum 0 ~ 6 0:DW 1:DS 2:TW 3:TS 4:IW 5:IS 6:Unknown	slbType enur
delta int W:-7~7, S:-3~3 TGC3 と 2 のヒット位置の差 (trgch 単位)	delta int
seg int 0/1 TSのTRIGA/TRIGBの区別	seg int
sub int 0~3 slbsubMatix(トリガーデータの TRIG0~3 に対応	sub int
rphi int 0~31 slbsubMatrix 内の位置 (trgch 単位)	rphi int

表 A.2 TGC の RDO オブジェクトの持つ変数。highpt(上段)、sl(下段)。

変数名	型	值域	意味
highpt			
bcTag	int	0~3	0:Previous 1:Current 2:Next 3:Unknown
subDetectorId	int	103 / 104	A サイド/C サイド
rodId	int	1 ~ 12	ROD の ID(= 1/12 セクターの区別)
11Id	int	-	レベル 1 トリガーの ID
bcId	int	-	バンチ ID
strip	bool	T/F	Strip / Wire の区別
forward	bool	T/F	Forward / Endcap の区別
sector	int	Fw:0/1, Ec:0 ~ 3	1/12 セクター内のトリガーセクタの区別
chip	int	0~3	HPT ボード上のチップの区別
index	int	0 / 1	hoge
hipt	bool	T/F	HPT トリガーデータ/LPT トリガーデータ
hitId	int	1~6	HPT チップ内のマトリックスの区別
sub	int	0 / 1	hptsubMatrix(マトリックス内の区別)
delta	int	W:-15 ~ 15, S:-7 ~ 7	TGC3 と 1 のヒット位置の差 (trgch 単位)
sl			
bcTag	int	0~3	0:Previous 1:Current, 2:Next 3:Unknown
subDetectorId	int	103 / 104	A サイド/C サイド
rodId	int	1 ~ 12	ROD の ID(= 1/12 セクターの区別)
11Id	int	-	レベル 1 トリガーの ID
bcId	int	-	バンチ ID
cand3plus	int	0 / 1	hoge
forward	bool	T/F	Forward / Endcap の区別
sector	int	Fw:0 / 1, Ec:0 $\sim$ 3	1/12 セクター内のトリガーセクタの区別
index	int	0 / 1	2 つのトリガー候補の区別
muplus	bool	T/F	粒子の電荷 (plus / minus)
threshold	int	1~6	何番目の $p_T$ 閾値を超えたトリガーか
overlap	bool	-	未使用
roi	int	Fw:0 ~ 63, Ec:0 ~ 147	トリガーサブセクター番号 (ROI 番号)

### A.3 PRD の変数一覧

表 A.3 TGC の PRD オブジェクトの持つ変数。hit(上段)、tracklet(下段)。

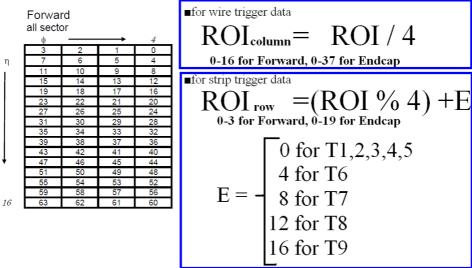
変数名	型	意味							
hit									
RDOId	Identifier	OfflineID(実体は unsigned int)							
idDE	IdentifierHash	所属する Collection のハッシュ							
locpos	LocalPosition	TgcReadOutElement 内での位置							
rdoList	vector <identifier></identifier>	同一イベントの hitrdo の OfflineID リスト							
locErrMat	ErrorMatrix	hit 位置のエラー $(=\frac{5+\nu\lambda^2 n m}{\sqrt{12}})$							
detEl	TgcReadOutElement	属する TgcReadoutElement へのポインタ							
tracklet									
channelIdIn	Identifier	元となった TGC2 の hit の OfflineID							
channelIdOut	Identifier	元となった TGC3 の hit の OfflineID							
collectionIdHash	IdentifierHash	所属する Collection のハッシュ							
detElIn	TgcReadoutElement	TGC2 の TgcReadoutElement へのポインタ							
detElOut	TgcReadoutElement	TGC3 の TgcReadoutElement へのポインタ							
type	CoinDataType(enum)	0 固定 (0:tracklet 1:hipt 2:sl 3:unknown)							
isAside	bool	T/F : A サイド/C サイド							
phi	int	トリガーセクタ番号 (Fw:1 ~ 24 Ec:1 ~ 48)							
isForward	bool	T/F: Forward / Endcap							
isStrip	bool	T/F: Strip / Wire							
trackletId	int	1イベント内でトリガーデータを一意に識別する ID							
posIn	LocalPosition	TGC2 の TgcReadOutElement 内での位置 [mm]							
posOut	LocalPosition	TGC3 の TgcReadOutElement 内での位置 [mm]							
widthIn	double	元となる TGC2 の hit のチャンネル幅 [mm]							
widthOut	double	元となる TGC3 の hit のチャンネル幅 [mm]							
delta	int	trackletRDO の値がそのまま入る (trgch 単位)							

表 A.4 TGC の PRD オブジェクトの持つ変数。highpt(上段)、sl(下段)。

変数名	型	意味							
highpt									
channelIdIn	Identifier	元となる TGC1 の hit の OfflineID							
channelIdOut	Identifier	元となる TGC3 の hit の OfflineID							
collectionIdHash	IdentifierHash	所属する Collection のハッシュ							
detElIn	TgcReadoutElement	TGC1 の TgcReadoutElement へのポインタ							
detElOut	TgcReadoutElement	TGC3 の TgcReadoutElement へのポインタ							
type	CoinDataType(enum)	1 固定 (0:tracklet 1:hipt 2:sl 3:unknown)							
isAside	bool	T/F : A サイド/C サイド							
phi	int	トリガーセクタ番号 (Fw:1 ~ 24 Ec:1 ~ 48)							
isForward	bool	T/F: Forward / Endcap							
isStrip	bool	T/F: Strip / Wire							
trackletId	int	1イベント内でトリガーデータを一意に識別する ID							
posIn	LocalPosition	TGC1 の TgcReadOutElement 内での位置 [mm]							
posOut	LocalPosition	TGC3 の TgcReadOutElement 内での位置 [mm]							
widthIn	double	TGC1 の hit の取り得る範囲 (TGC1 の ROI 幅)[mm]							
widthOut	double	TGC3 の hit が属する ROI の幅 [mm]							
delta	int	highptRDO の値がそのまま入る (trgch 単位)							
sl									
channelIdIn	Identifier	元となった TGC3 の hit(wire) の OfflineID							
collectionIdHash	IdentifierHash	所属する Collection のハッシュ							
detElOut	TgcReadoutElement	TGC3 の TgcReadoutElement へのポインタ							
type	CoinDataType	2 固定 (0:tracklet 1:hipt 2:sl 3:unknown)							
isAside	bool	T/F : A サイド/C サイド							
phi	int	トリガーセクタ番号 (Fw:1 ~ 24 Ec:1 ~ 48)							
isForward	bool	T/F: Forward / Endcap							
trackletId	int	元となった wire トリガーデータの trackletID							
trackletIdStrip	int	元となった strip トリガーデータの trackletID							
posOut	LocalPosition	TGC3 の TgcReadOutElement 内での位置 [mm]							
errMat	ErrorMatrix	TGC3 の ROI 幅行列 [mm], $\begin{pmatrix} \text{Width}\_r & 0 \\ 0 & \text{Width}\_\phi \end{pmatrix}$							
roi	int	ROI 番号,sIRDO の値がそのまま入る							
pt	int	どの $p_T$ 閾値を超えたか, $\operatorname{sIRDO}$ の値がそのまま入る							

### A.4 ROI のナンバリング

Sub Sector Numbering (ROI numbering)



Endcap Endcap odd number sector (sector 1,3,...) even number sector (sector 0,2,...)

図 A.1 ROI のナンバリング

### A.5 SLB データフォーマット

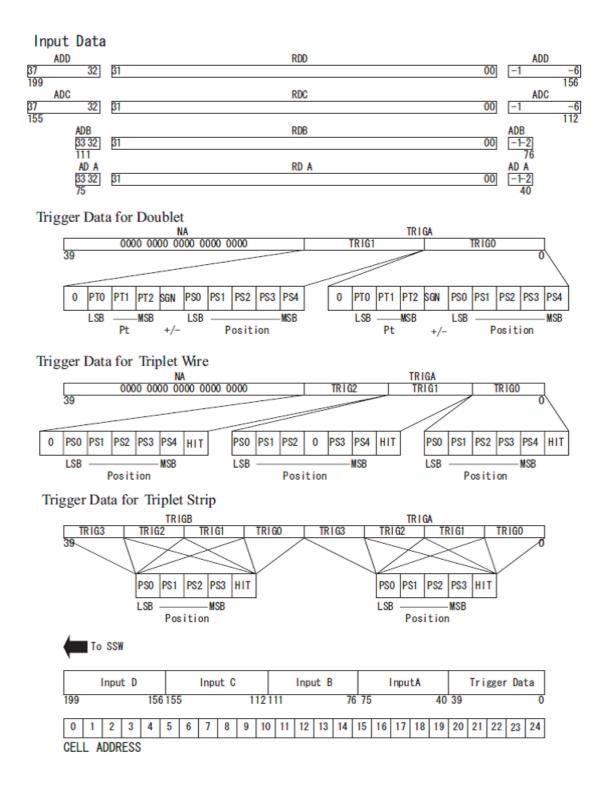


図 A.2 SLB のデータフォーマット

#### A.6 SSW データフォーマット

Event Header 000 Now, Record Type=01

[	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
[	(	000		Rec1	Гуре		SSV	۷ID								RX	mas	sk p	atter	rn (1	=er	able	ed, O	=dis	able	ed)						$\Box$

Record Type (RecType) is 01 in this format version, hard-wired in FPGA SSWID is arbitrarily set by a dip-switch on each SSW board

#### SLB header 010

;	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	(	010			S	LBI	)		0	B	Cma	р	Mo	d Ty	ре	0		L1	ID							BC	ID					П

BCmap shows 3BC data lines taken by RX. 3bit shows {next, current, previous} events. 1=adopted. 0=discarded SLBID, Mod Type, L1ID and BCID are all SLB's data. See SLB documents.

#### SLB header 011 -0

31 30 2	9 28 27	26 25 24 23 22	21 20	19 18 17 16	15 14 13 12 11 10 9 8	7 6 5 4 3 2 1 0
011	0 0	RXID	0	RX FIFO status	SLB-OVF	RX-OVF

RXID is RX identified number from 0 to 22.

RX FIFO status tells what amount of data are stored in RX-FIFO then.

SLB-OVF is SLB's data. See SLB documents.

RX-OVF is RX-FIFO overflow counter. This tells the snapshot value when this word is sent from RX to TX.

#### SLB trailer 011 -1 This word appears after SLB data words only when there is an error

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
011		1	SEU	OVF	LVD	Sink			RX	erro	or sta	ate		$\neg$	

LVDSInk=LVDS links status. 2bits are {now,old}. 1=Not linked. 0=Linked.

SEU = SLB SEU flag. See SLB documents.

OVF = RX-FIFO overflow flag. If OVF=1, some overflows have happened in this RX data.

#### SLB data 100, 101, 110

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
	100		(	cell	addı	ress				C	ell b	tma	р		
	101		(	cell	addı	ress				C	ell b	tma	р		
	110		-	cell	addı	ress				CE	ell bi	tma	D		

In any order:

Cell data for Current BC data Cell data for Previous BC data Cell data for Next BC data

#### PAD word 110

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
110				1	1111						0				

i.e. 0xDF00

#### **Event Trailer 111**

1	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
1		111					0	x1C	Α				Gink	TIC	NRC	T2C						X	OR	che	ck s	nuus						П

Glnk = Glink TX status. "Locked" signal of Glink Tx. 1=Not locked. 0=Locked

T1C = Timeout1\_count\_frag. Time-out to collect the event fragment from all the enabled input ports.

NRC = Nores\_count\_flag. No response from RX FIFO of "enabled" (not masked) input port.

T2C = Timeout2\_count\_flag. Time-out to collect the event fragment from each enabled RX FIFO.

These three flags are reset at every event.

The XOR operation includes the first word(16bits) of the event header through the first word of the event trailer. When the result is XOR'ed with the XOR checksum word, the result becomes zero. (the XOR does not include the 0x0B0F an 0x0E0F framing words)

#### Framing

Each event is preceded by the 32-bit word 0x000000B0F and followed by the 32-bit word 0x0E0F0000, both words are sent in Glink control mode.

図 A.3 SSW のデータフォーマット

### A.7 エレクトロニクス ID の関係

表 A.5 トリプレット 1/12 セクター内の振り分け

トリガーセクター	SLBID	sbLoc	SSWID	chip	hitId
ワイヤー					
Endcap φ0	0	0	0		
	1	1	0		
	2	2	0		
	3	3	0		
	4	4	0		
	5	5	0		
	6	6	0		
Endcap $\phi$ 1	0	8	0		
	1	9	0		
	2	10	0		
	3	11	0		
	4	12	0		
	5	13	0		
	6	14	0		
Endcap φ2	0	0	1		
	1	1	1		
	2	2	1		
	3	3	1		
	4	4	1		
	5	5	1		
	6	6	1		
Endcap φ3	0	8	1		
	1	9	1		
	2	10	1		
	3	11	1		
	4	12	1		
	5	13	1		
	6	14	1		

表 A.6 トリプレット 1/12 セクター内の振り分け

トリガーセクター	SLBID	sbLoc	SSWID	chip	hitId
ワイヤー					
Endcap φ0	0	0	0		
	1	1	0		
	2	2	0		
	3	3	0		
	4	4	0		
	5	5	0		
	6	6	0		
Endcap $\phi$ 1	0	8	0		
	1	9	0		
	2	10	0		
	3	11	0		
	4	12	0		
	5	13	0		
	6	14	0		
Endcap φ2	0	0	1		
	1	1	1		
	2	2	1		
	3	3	1		
	4	4	1		
	5	5	1		
	6	6	1		
Endcap φ3	0	8	1		
	1	9	1		
	2	10	1		
	3	11	1		
	4	12	1		
	5	13	1		
	6	14	1		

表 A.7 ダブレットエンドキャップ 1/12 セクター内の振り分け

トリガーセクター	SLBID	sbLoc	SSWID	chip	hitId	ROI
ワイヤー						ROI <sub>column</sub>
Endcap $\phi 0$	0	0	0			
	1	1	0			
	2	2	0			
	3	3	0			
	4	4	0			
	5	5	0			
	6	6	0			
Endcap $\phi$ 1	0	8	0			
	1	9	0			
	2	10	0			
	3	11	0			
	4	12	0			
	5	13	0			
	6	14	0			
Endcap $\phi$ 2	0	0	1			
	1	1	1			
	2	2	1			
	3	3	1			
	4	4	1			
	5	5	1			
	6	6	1			
Endcap $\phi$ 3	0	8	1			
	1	9	1			
	2	10	1			
	3	11	1			
	4	12	1			
	5	13	1			
	6	14	1			
ストリップ						ROI <sub>row</sub>
Endcap $\phi 0$	0	16	0			
	1	17	0			
Endcap $\phi$ 1	0	24	0			
	1	25	0			
Endcap $\phi$ 2	0	16	1			
	1	17	1			
Endcap $\phi$ 3	0	24	1			
	1	25	1			

表 A.8 ダブレットエンドキャップ 1/12 セクター内の振り分け

トリガーセクター	SLBID	sbLoc	SSWID	chip	hitId	ROI
ストリップ						ROI <sub>row</sub>
Endcap $\phi 0$	0	16	0			
	1	17	0			
Endcap $\phi$ 1	0	24	0			
	1	25	0			
Endcap $\phi$ 2	0	16	1			
	1	17	1			
Endcap $\phi$ 3	0	24	1			
	1	25	1			
ワイヤー						ROI <sub>column</sub>
ストリップ						ROI <sub>row</sub>

## 参考文献

- [1] Asai, Shoji. et al. "Prospects for the Search for a Standard Model Higgs Boson in ATLAS using Vector Boson Fusion." hep-ph/0402254, SN-ATLAS-2003-024, EEur.Phys.J.C32S2:19-54,2004.
- [2] ATLAS Collaboration. ""ATLAS Computing Technical Design Report" CERN-LHCC-2005-022, 2005.
- [3] ATLAS Collaboration. "ATLAS DETECTOR AND PHYSICS PERFOR-MANCE Technical Design Report Volume II." CERN/LHCC/99-14, 1999.
- [4] ATLAS Collaboration. "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider." 2008 JINST 3 S08003, 2008
- [5] ATLAS Collaboration. "ATLAS High-Level Trigger, Data Acquisition and Controls, ATLAS Technical Design Report." CERN-LHCC-2003-022, 2003.
- [6] ATLAS Collaboration. "ATLAS Level-1 Trigger Technical Design Report." ATLAS TDR 12 rev01, 2000.
- [7] ATLAS Collaboration. "ATLAS Muon Spectrometer Technical Design Report." CERN/LHCC/97-22, 1999
- [8] ATLAS Collaboration. "ATLAS Trigger Performance Status Report." CERN/LHCC98-15, 1998.
- [9] Cwetanski, Peter. "STRAW PERFORMANCE STUDIES AND QUALITY ASSURANCE FOR THE ATLAS TRANSITION RADIATION TRACKER." Finland: University of Helsinki, 2006.
- [10] LEP Collaborations and LEP Electroweak Working Group. "A Combination of Preliminary Electroweak Measurements and Constraints on the Standard Model." CERN-PH-EP/2006-042, hepex/0612034, 2006.
- [11] Spira, Michael. "QCD Effects in Higgs Physics." CERN-TH/97-68, hep-ph/9705337, 1997.
- [12] Spira, Michael. "Higgs Production and Decay at Future Machines." CERN-TH/97-323, hep-ex/9711394, 1997.

- [13] ZEUS Collaboration "ZEUS next-to-leading-order QCD analysis of data on deep inelastic scattering." Phys. Rev. D67 (2002) 012007.
- [14] 近藤敬比古. "ATLAS マグネットシステムの概要." 日本, KEK, 2005 年.
- [15] 近藤敬比古. "LHC 加速器の概要." 日本, KEK, 2005 年.
- [16] 門坂拓哉. "修士学位論文 ATLAS 前後方ミューオントリガーシステム Sector Logic 及びオンラインソフトウェアの開発." 日本, 神戸大学大学院, 2008 年.
- [17] 原隆志. "修士学位論文 ATLAS 前後方ミューオントリガーシステムの構築." 日本, 東京大学大学院, 2007 年.
- [18] 高橋悠太. "修士学位論文 大型ハドロン加速器実験用 µ 粒子検出器の動作 検証." 日本, 名古屋大学大学院, 2008 年.
- [19] 冨島 佑允. "ATLAS 実験におけるタウ粒子を用いた超対称性モデルの研究" 日本, 東京大学大学院, 2008 年.
- [20] 丹羽正. "修士学位論文 ATLAS 前後方ミューオントリガーシステムコミッショニングにおける SectorLogic による宇宙線トリガーの研究." 日本, 神戸大学大学院, 2008 年.
- [21] ALICE Collaboration. ALICE Public Page(http://aliceinfo.cern.ch/Public/), 参照 2008 年 12 月 18 日.
- [22] ATLAS JAPAN. "アトラス日本・写真集ページ." ATLAS-Japan Home Page(http://atlas.kek.jp/), 参照 2008 年 12 月 11 日.
- [23] ATLAS TGC Groupe. "Documents for TGC Electronics & DAQ." TgcDocument(https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Main/TgcDocument), 参照 2008 年 12 月 11 日.
- [24] CERN. "LHC Project Illustrations." CERN Document Server(http://cdsweb.cern.ch/), 参照 2008 年 12 月 11 日.
- [25] CMS. CMS Public Page(http://cms-project-cmsinfo.web.cern.ch/cms-project-cmsinfo/index.html), 参照 2008 年 12 月 18 日.
- [26] ICEPP. ICEPP Home Page(http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/), 参照 2008 年 12 月 15 日.
- [27] LHCb. LHCb Public Page(http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/), 参照 2008 年 12 月 18 日.
- [28] Magnet. ATLAS MAGNETIC FIELD(http://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUP--S/MUON/magfield/), 参照 2008 年 12 月 21 日.
- [29] SCT Groupe. SctWiki(https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/SctWiki), 参照 2008 年 12 月 22 日.

- [30] TOTEM. TOTEM website(http://totem.web.cern.ch/Totem/), 参照 2008 年 12 月 18 日.
- [31] 佐々木修. Osamu Sasaki Home Page(http://www-online.kek.jp/ sosamu/), 参照 2008 年 12 月 11 日.
- [32] O.Jinnouchi, O.Sasaki. "Study on muon level-1 trigger scheme for TGC" Atlas Internal Note DAQ-No-082, 1998
- [33] TLAS Level-1 muon trigger group. "Naming and numbering schemefor the Endcap muon trigger system." ATL-M UON-2001-002, 2005.
- [34] G.Poulard. "ATLAS Tiers Coordination" For ATLAS internal discussions, CERN, 2006.
- [35] 上田郁夫 "ATLAS コンピューティングとグリッド" 日本物理学会 2008 秋 24pZE06, 日本, 東京大学, 2008.
- [36] David Quarrie. "Offline Release Status & Schedule" For ATLAS internal discussions, LBNL, 2008.
- [37] Computing Groupe.

  ATLAS TWiki(https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/AtlasComputing),
  参照 2009 年 1 月 16 日.
- [38] ATLASJAPAN. ATLAS 日本グループソフトウエア講習会 2008(http://www.icepp.jp/atlas-japan/tutorials/tutorial2008), 参照 2008 年 1月 15 日.
- [39] 杉本拓也. "ATLAS 前後方ミュー粒子レベル 1 トリガーシステム -全システム稼動に向けて-" 日本物理学会 2008 秋 23pSJ2, 日本, 名古屋大学, 2008.
- [40] 長谷川慧. "ATLAS 実験 TGC 検出器の試運転総括" 日本物理学会 2008 秋 23pSJ3, 日本, 名古屋大学, 2008.
- [41] 鈴木友. "ATLAS Muon Trigger System の Commissioning ~ タイミング調整とその検証 ~ "日本, KEK, 2009.
- [42] Sugimoto Takuya. "Performance of Muon Trigger Chamber for ATLAS Detector and Development of the Cosmic Ray Test System", Japan, Kobe University, 2006.