

LHC-ATLAS 実験アップグレードにおける  
Micromegas 検出器をもちいた  
ミューオントリガーアルゴリズムの開発と評価  
(Development and performance evaluation of the muon trigger algorithm  
using micromegas detector  
for the upgrade of the LHC-ATLAS experiment)

修士学位論文

東京大学大学院 理学系研究科  
物理学専攻  
川本辰男 研究室  
35166082

前川 光貴

2018 年 1 月 4 日

## 概要

スイスのジュネーブにある世界最高エネルギーの陽子-陽子コライダー LHC では、標準模型の検証と新物理の探索を目的とした ATLAS 実験が行われている。LHC 加速器は、2019 年からの段階的なアップグレードを経て、14TeV のさらなる高エネルギーにおいて、高輝度環境で統計量を増やす予定である。それに伴う高いバックグラウンド環境下で、目的とする物理現象を選択的に取得し、新発見につなげるためには、トリガーの性能が鍵となる。2019 年に始まるロングシャットダウンでは、背景事象によるフェイクトリガーを削減するべく、新たなエンドキャップミュオン検出器 NSW を導入し、ミュオントリガーをアップグレードする。本研究では、NSW を構成する 2 つの検出器のうちの 1 つ、マイクロメガス検出器を用いたトリガーアルゴリズムの開発と、その性能のシミュレーションによる評価を行なった。本論文ではその結果について報告する。

## 目次

1	LHC-ATLAS 実験	7
1.1	LHC 加速器 [1]	7
1.2	ATLAS 実験 [5]	7
2	New Small Wheel(NSW) 計画 [9]	11
2.1	LHC 加速器のルミノシティ増強に伴う ATLAS 検出器アップグレード	11
2.2	NSW 計画 [9]	15
3	Micromegas (MM) を用いたレベル 1 ミューオントリガー	20
3.1	NSW のトリガーシステム	20
4	MM 出力信号のシミュレーション	27
4.1	荷電粒子に対する MM の応答	27
4.2	トリガー信号のシミュレーション	28
5	MM トリガーアルゴリズムの評価	32
5.1	MM トリガーアルゴリズム	32
5.2	トリガーアルゴリズムの評価	37
6	ASIC パラメーターの影響	51
6.1	VMM の時定数オプションによる影響	51
6.2	Programmable ART dead time の変更による影響	54
7	トリガーアルゴリズムの改良の試み	56
8	結論	59

## 図目次

1	LHC の概観	7
2	CERN の加速器	7
3	ヒッグス粒子の生成断面積	8
4	ヒッグスの崩壊モード	9
5	ATLAS 検出器 [7]	9
6	ATLAS の直交座標系 [8]	10
7	LHC アップグレード計画 [23]	11
8	MDT のトラック検出効率 [9]	12
9	フェイクトリガーの模式図	13
10	$WH \rightarrow \mu\nu b\bar{b}$ 過程のミューオン $p_T$ 分布 [9]	14
11	Run1 におけるレベル 1 ミューオントリガーの $\eta$ 分布 [12]	15
12	NSW と BW のコインシデンスによるフェイクトリガーの削除	16
13	NSW に導入される放電耐性型 Micromegas 検出器	17
14	NSW の概観	19
15	NSW のジオメトリー詳細	19
16	NSW の概観	19
17	Run3 レベル 1 ミューオントリガー	20
18	MM のトリガー経路	21
19	MM のトリガー経路の視覚的概略	21
20	MMFE8 に搭載された 8 つの VMM	22
21	VMM 内部の回路概略図	22
22	ART ASIC 内部の回路概略図	24
23	ADDC からの出力 112bit のデータ形式	24
24	MM トリガープロセッサが搭載されたメザニカード	25
25	MM トリガープロセッサ内の処理の流れ	25
26	読み出し電極からの電流インプット [13]	28
27	陽子-陽子非弾性散乱の崩壊パターン	29
28	Run2 データをもとにしたヒットレート予想 [18] と作成した BG サンプルのヒットレート	30
29	シェイパー整形後の波形イメージ	31
30	Local 座標と種々の値の定義	32
31	Slope road のイメージ図	33
32	LocalX 方向の広がり	34
33	ピンングとコインシデンスの概念図	34
34	R バイアスの発生	38
35	LocalX の残差分布	39
36	残差の二乗和平均	41
37	シングルミューオンでのトラック検出効率	43

38	トラック検出効率に対する BG の影響 . . . . .	44
39	BG ありのトラック検出効率 . . . . .	45
40	BG 由来の平均トラック数 . . . . .	46
41	セクターあたり 1BC あたりのトラック数分布 . . . . .	47
42	シングルミュオンにおける物理計算の残差分布 . . . . .	48
43	$\phi$ のバイアスの原因 . . . . .	48
44	シングルミュオンにおけるトリガー出力の残差分布 . . . . .	49
45	各時定数ごとの VMM シェイピング関数 . . . . .	51
46	VMM シェイパーの時定数と ART 信号のタイミング分布 . . . . .	52
47	VMM シェイパーの時定数とトラック検出効率 . . . . .	53
48	VMM シェイパーの時定数とトリガー出力の out of requirement . . . . .	53
49	VMM dead time とアフタートラック . . . . .	55
50	UV layer に対するアルゴリズム追加 . . . . .	56
51	UV ストリップの交点を持つ傾きの値 . . . . .	57

## 表目次

1	NSW のトラック出力 . . . . .	26
2	4MMFE8 あたりの信号レート . . . . .	37
3	パイルアップ数 160 の BG サンプルにおけるトラックレート . . . . .	45
4	分解能 [mrad または $10^{-3}$ ] と OOR (out of requirement) . . . . .	47
5	パイルアップ数と out of requirement . . . . .	49
6	新アルゴリズムによるトリガーの結果 . . . . .	58

# 1 LHC-ATLAS 実験

スイスのジュネーブにある CERN（欧州原子核機構）に建設された LHC 加速器では、主に ATLAS、CMS、ALICE、LHCb の 4 つの実験が行われている [1]。ATLAS は CMS とともに、エネルギーフロンティアでの新物理探索を目的として行われている実験である。

## 1.1 LHC 加速器 [1]

LHC 加速器は世界最高の衝突エネルギー（重心系 14TeV）の陽子-陽子衝突型シンクロトンコライダーであり、スイスとフランスの国境にまたがって地下 100m に位置し、直径は 9km、周長は 27km にもなる。加速器を周回させる陽子は、水素ガスをイオン源としてイオン化後、線形加速器 Linac2 で 50MeV まで加速される。さらに、3 種の前段となるシンクロトンで、PSB (Proton Synchrotron Booster) で 1.4GeV、PS (Proton Synchrotron) で 25GeV、SPS (Super Proton Synchrotron) で 450GeV という形で加速を受け、その過程で  $1.7 \times 10^{11}$  の数密度のバンチ構造へと分割され、LHC 加速器へと注入される。LHC でのバンチ間隔は 25ns、衝突頻度は 40MHz であり、Run2 では最大  $2.0 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  の瞬間ルミノシティを実現している [2]。LHC 加速器には、長いビーム経路にわたって、ビーム偏向用双極電磁石 1232 基、ビーム収束用四極電磁石 392 基、ビーム補正用六極電磁石 688 基をはじめとして多くの磁石が設置されている [3]。主要な磁石は全て超電導電磁石で構成されており、超電導双極磁石によって、ビームには 8.4T 程度の磁場が常にかかけられている [4]。

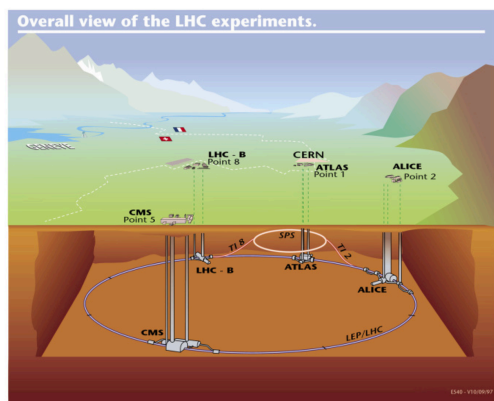


図 1 LHC の概観

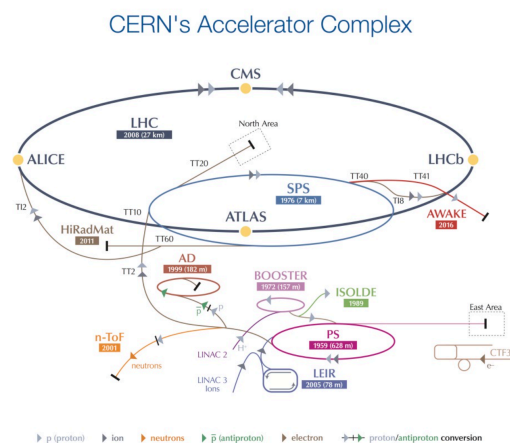


図 2 CERN の加速器

## 1.2 ATLAS 実験 [5]

LHC に存在する 4 つの衝突点のうち 1 つに設置され、陽子-陽子衝突から起こる粒子生成・崩壊の、複雑な現象を観測、解析するために作られた汎用検出器が ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) 検出器である。この ATLAS 検出器を用いた物理実験プロジェクトが ATLAS 実験である。

### 1.2.1 ATLAS 実験の目指す物理

ATLAS 実験は LHC 加速器を用いて、標準理論の中で唯一当時未発見であったヒッグス粒子、そして、超対称性粒子、余剰次元理論から予測される粒子、暗黒物質の候補などの新粒子の探索を行うことを目的として始まった。2012 年にヒッグス粒子が ATLAS 実験、CMS 実験で発見され [6]、1 つの大きな目的を達成したとともに、今後、ヒッグス粒子の各種崩壊モードの観測を通して、ヒッグス粒子のスピンの、パリティ、湯川結合定数など、ヒッグス粒子の性質を測定し、標準理論の検証と、標準理論を超えた新物理の兆候を探す。さらに、BSM (Beyond Standard Model) である超対称性理論、余剰次元理論などから予測される超対称性粒子などの新粒子探索や、ダークマター探索も目指す。

### ヒッグス粒子

ヒッグス粒子は素粒子標準模型においてフェルミオン、ゲージボソンに質量を与える粒子である。ヒッグス粒子の生成断面積を質量の関数として表示したものが 3 である。ハドロンである陽子からは、クォークまたはグルーオン同士の反応を始点として全ての粒子は生成する。ヒッグス粒子の生成過程としては、青線のグルー

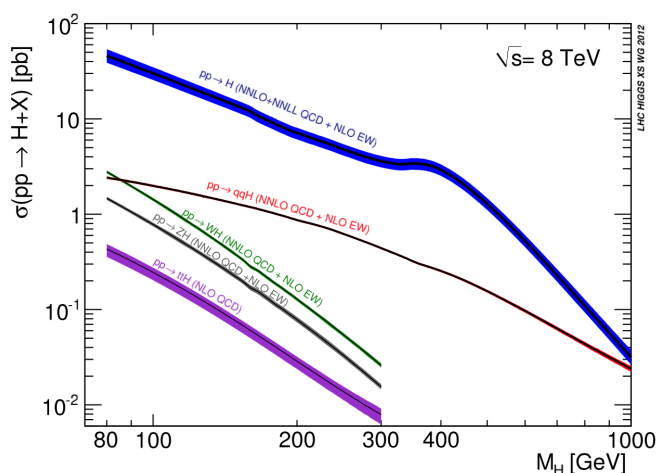


図 3 ヒッグス粒子の生成断面積

オンフュージョン過程 (ggF)、赤線のベクターボソンフュージョン過程 (VBF)、緑・茶線のベクターボソンアソシエイト過程 (VH)、紫線で示された  $tt$  アソシエイト過程 (ttH) がある。ヒッグス粒子の崩壊分岐比をヒッグス粒子の質量の関数で示したものが、図 4 である。ヒッグス粒子の質量 125GeV 程度でもっとも大きい分岐比を持つのは  $H \rightarrow b\bar{b}$  の崩壊であり、 $H \rightarrow WW^*$  がそれに続く。標準理論で予想される崩壊モードの中で、分岐比としては小さいが信号分離の比較的容易な  $H \rightarrow \gamma\gamma$  が、もっとも高い信頼度で発見された。ここにあげた 3 つ以外にも、 $H \rightarrow ZZ^*$ 、 $H \rightarrow \tau\tau$  でも、ヒッグス粒子の崩壊モードを発見している。

### 1.2.2 ATLAS 検出器 [5]

ATLAS 検出器は LHC の陽子陽子衝突点を中心として、衝突点をビーム軸平行に円筒形に覆うように作られた汎用検出器である。円筒形の側面をバレル面と呼び、円筒形の「蓋」にあたる円形面をエンドキャップと呼んでいる。ATLAS 検出器の概観を図 5 に示した。ATLAS 検出器の大きさは、直径 25m、長さ 44m で



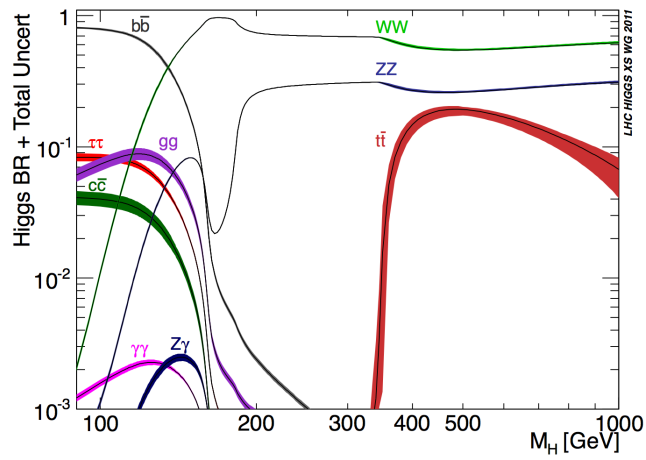


図4 ヒッグスの崩壊モード

あり、総重量 7000t にも及ぶ。ATLAS 検出器は、ニュートリノ以外の観測可能な寿命を持った粒子を全て

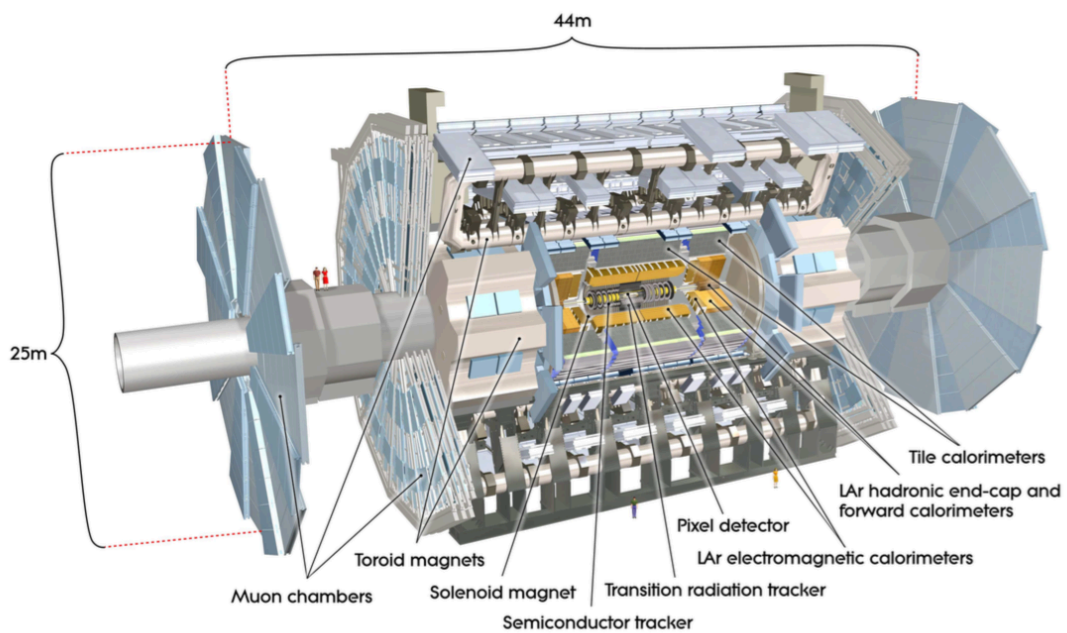


図5 ATLAS 検出器 [7]

PID(Particle IDentification) しつつ捉えることができるように、内側から、内部飛跡検出器、電磁カロリメーター、ハドロンカロリメーター、ミューオン検出器という多重構造になっている。荷電粒子の運動量を測定するために、内部飛跡検出器とカロリメーターの間にソレノイドマグネット、カロリメーターとミューオン検出器の間にトロイドマグネットが置かれている。これらの磁場中での粒子飛跡の曲率を計算することにより、荷電粒子の運動量測定を行う。ATLAS 実験で使用される座標系の説明を行うと、ATLAS ではビーム衝突点を

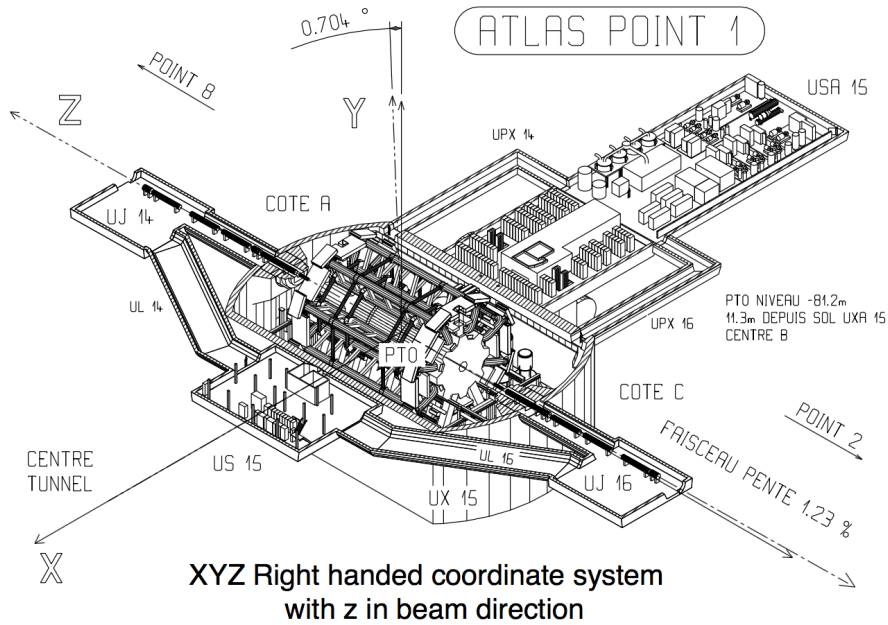


図6 ATLASの直交座標系 [8]

原点とした円筒座標系を用いており、ビーム軸を Z 軸とし、円筒座標系の角度座標が  $\phi$  に相当する。3次元極座標における天頂角  $\theta$  も用いられる。ただし、ATLASの座標系における R は、円筒座標のものであり、3次元極座標の原点からの距離ではない。ATLAS 検出器は完全な方位角のカバーを持ち、広い範囲の天頂角を覆っている。これとは別に、直交座標系も定められており、Z 軸は共通で、鉛直上向き地上方向を Y 軸の正方向、LHC の円形加速器の中心方向を X 軸の正方向として、右手系となるように直交座標が定められている。

ATLAS では検出器の中心である陽子陽子衝突点を IP (Interaction Point) と呼び、IP に近い方を IP 側、IP 遠方を HO 側と呼んでいる。また、3次元極座標における天頂角  $\theta$  の代わりに、擬ラピディティ  $\eta$  がよく用いられる。

$$\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.1)$$

擬ラピディティは、運動量に比べて質量が無視できる粒子に対しては、近似的に z 軸方向のラピディティとなり、z 軸方向のブーストに対して擬ラピディティ同士の差が不変になる。それを用いて、擬ラピディティ-方位角空間上での距離  $\Delta R$  は  $\Delta R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$  と定義される。これらに加え、ATLAS では、横運動量  $p_T$ 、横消失エネルギー  $E_T^{miss}$  等の用語も使用される。 $p_T$  に見られる添字の T は transverse の略であり、運動量やエネルギーの XY 平面内の成分を表す。また、 $E_T^{miss}$  の添字の miss は missing の略であり、ATLAS 検出器で感知できず消失した運動量やエネルギーであることを表す。LHC はハドロンコライダーであるため、陽子内で粒子生成に関わったパートン (クォーク、グルーオン) の最初の z 軸方向運動量を知ることはできない。そのため、ATLAS では横運動量、横エネルギー、横消失運動量、横消失エネルギー等をトリガー条件に多く用いる。

## 2 New Small Wheel(NSW) 計画 [9]

LHC のルミノシティ増強に伴う ATLAS 実験のアップグレード計画、その中の 1 つである New Small Wheel (NSW) 計画について説明をする。

### 2.1 LHC 加速器のルミノシティ増強に伴う ATLAS 検出器アップグレード

#### 2.1.1 LHC 加速器アップグレード [11]

標準理論を超えた物理を探るためには、新粒子のさらに重い質量領域を探索すること、そして、統計量を増やすことが必要である。ヒッグス粒子の精密測定のためにもルミノシティを増やしてヒッグス粒子の生成頻度を高める必要があり、衝突エネルギーそして統計量の 2 つの点で LHC のアップグレードを測る必要がある。LHC の重心系エネルギーは Run3 で 13TeV から最高の 14TeV へと移行し、その後は 14TeV のエネルギーを維持する。一方で瞬間ルミノシティについては、今後 10 年にわたって、段階的にルミノシティをデザイン値の 7 倍にまで増やすことが予定されており、LHC アップグレード計画が進行中である。2011 年から

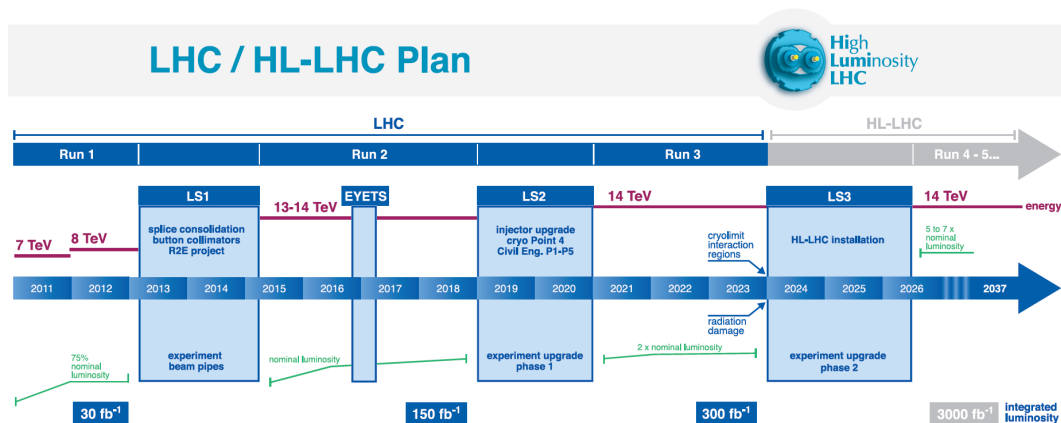


図 7 LHC アップグレード計画 [23]

の Run1 では、重心系エネルギー最大 8TeV、瞬間ルミノシティ最大  $0.77 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  で LHC は稼働し [10]、ヒッグス粒子発見を達成した。2013 年から 2014 年の LS1(Long Shutdown 1) 期間を終えて、2015 年からは Run2 が開始し、現在、重心系エネルギー 13TeV、瞬間ルミノシティ最大  $2.0 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  [2] で稼働している。今後は 2019 年から 2020 年にかけての LS2(Long Shutdown 2) 期間に行う Phase1 upgrade を経て、2021 年からの Run3 では、重心系エネルギー 14TeV、ルミノシティ  $2.0 \sim 3.0 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  で運転を行い、さらに、2024 年からの LS3(Long Shutdown 3) の間に Phase2 upgrade を行なって、最終的に、重心系エネルギー 14TeV、ルミノシティは  $5.0 \sim 7.0 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  にまで到達する。LHC のルミノシティのデザイン値は  $1.0 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  であり、実にデザイン値の 7 倍にまでルミノシティが今後上がっていくことが決まっている。

## 2.1.2 ATLAS 検出器アップグレード

LHC のルミノシティが設計値を超えて増強されることに伴って、当然のことながら、ATLAS の性能にも限界が生じる。そこで、ATLAS 検出器にもさらなるアップグレードが必要となる。

### LHC アップグレードがミュオン検出器に与える影響 [9]

ルミノシティの上昇によってミュオンシステムで予想される問題は 2 つ存在している。1 つはエンドキャップ前方の精密測定用検出器で、ルミノシティが上がることによりヒットレートが増加して、トラッキング性能が低下すること。そしてもう 1 つは、フェイクトリガーが増えることによるトリガーレート圧迫である。

- トラッキングパフォーマンスの低下

ルミノシティの上昇によるヒットレートの増大によって、エンドキャップ前方にある飛跡精密測定用のミュオン検出器である MDT や CSC では、トラッキング能力が低下していく。特に MDT は 800ns の長い dead time を持ち、バックグラウンド信号の後に発生する dead time によってミュオン信号が取れなくなる時間が長く、ヒットレートに弱い。図 8 は MDT のトラッキング効率をヒットレートの関数で図に示したものである。300kHz のヒットレートを超えると、点線で示された MDT のトラッ

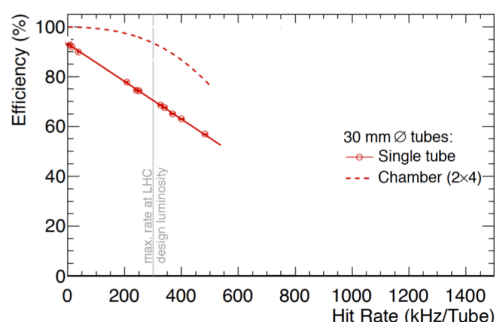


図 8 MDT のトラック検出効率 [9]

キング効率は急激に下がっていく。図の灰色の縦線が、 $1.0 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  のルミノシティに相当する線である。これを考えると、ルミノシティが  $3.0 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  に到達する Run3 では、現行の MDT の精密飛跡測定効率が許容できないほど悪化する。

- フェイクトリガー増大によるトリガーレート圧迫

レベル 1 トリガーレートは、後段のハードウェアの処理能力の制限から 100kHz が上限となっている。100kHz のトリガーレート上限のうち、ミュオントリガーに当てられているのは 20kHz であり、この制限を超えるトリガーを出すことはできない。重心系エネルギー 14TeV、Run3 最大にあたる瞬間ルミノシティ  $3 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  の状況では、後方のトリガー用ミュオン検出器 Big Wheel (BW) のみを用いた場合のレベル 1 トリガーレートは 51kHz と見積もられ [10]、トリガーレートの上限を超えてしまう。このトリガーレートには、フェイクトリガーと呼ばれる、検出器の構成物体や、検出器自身で起

このバックグラウンド事象から出てくる粒子を拾ってトリガーしてしまう場合が多く含まれている。図9の矢印Bで表示した粒子が、フェイクによるトリガーの一例として示されており、粒子がトロイダル磁石やビームシールドの物質と反応して出てきたバックグラウンドの荷電粒子がトロイドマグネットに曲げられ、IP方向を向いてBWに入射し、フェイクトリガーとなっている。トリガーレートの削減に

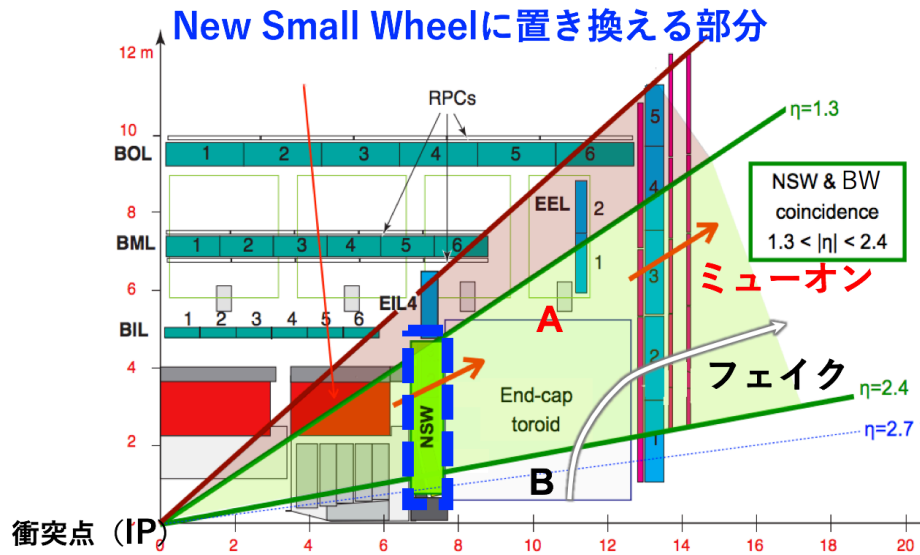


図9 フェイクトリガーの模式図

は、バレル部を落とすなど立体角の一部のみを取るやり方、 $p_T$  の閾値を上げる方法、そして、フェイクトリガーを削減する方法が存在するが、基本的には事象選別を改善し、フェイクトリガーを削減することが望ましい。 $p_T$  閾値を下げると、例えば  $WH \rightarrow \mu\nu b\bar{b}$  のような過程では、図10のように、シビアに事象の検出効率が下がる。従って、 $p_T$  閾値の維持は重要な課題である。

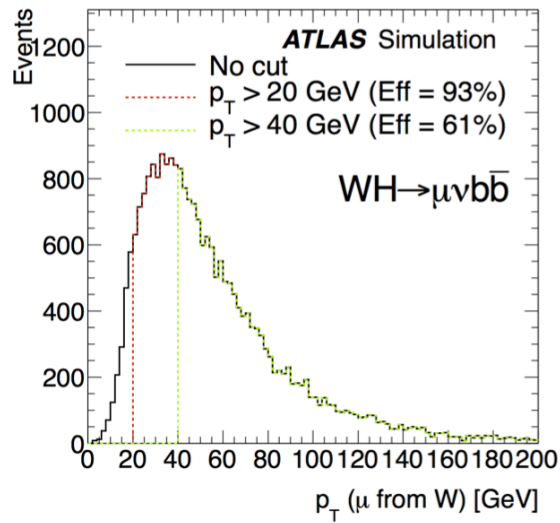


図 10  $WH \rightarrow \mu\nu b\bar{b}$  過程のミューオン  $p_T$  分布 [9]

図 11 には Run1 でのレベル 1 ミューオントリガーの  $\eta$  分布が示されている。この Run1 データを元にした図では、ヒストグラム全体が Run1 のレベル 1 トリガーである。その中で、前方エンドキャップ部の TGC とのコインシデンスによりカットするフェイク（白色）、タイルカロリメーターとのコインシデンスによりカットするフェイク（緑色）などの部分が Run2 では落とされ、黄色の部分だけが残ると予測されている。飛跡精密測定データを用いたオフライン再構成でミューオンと判断されたトリガーは赤い部分のみであり、その中でも、オフラインでトリガーの閾値である  $p_T = 20\text{GeV}$  を実際に超えていたと判断されるのは深緑の部分だけである。この図からもトリガーのフェイクを削減する必要性が強く認められる。こうした 2 つの問題点を解決するために、次項に述べる NSW 計画が、ATLAS 検出器アップグレードの中の 1 つのプログラムとして進められている。

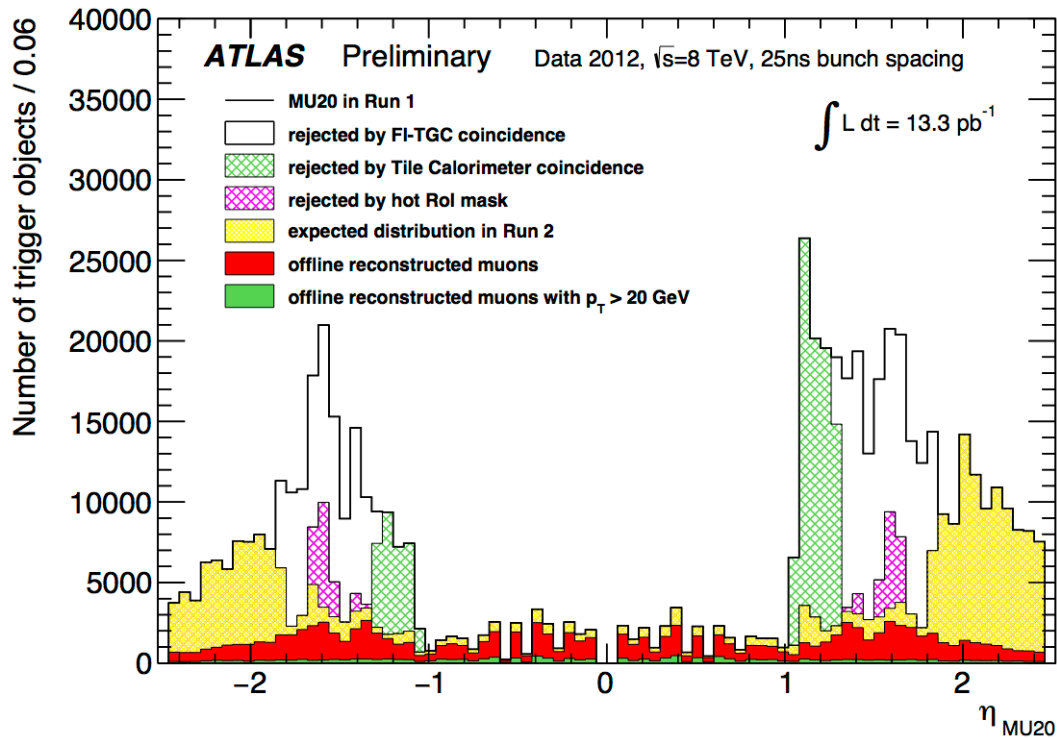


図 11 Run1 におけるレベル 1 ミューオントリガーの  $\eta$  分布 [12]

## 2.2 NSW 計画 [9]

NSW 計画では、精密飛跡測定とトリガーの両方の能力を備えた前方エンドキャップミューオン検出器 New Small Wheel (NSW) によって、現在あるトリガー用の TGC、飛跡精密測定用の MDT・CSC が入っている Small Wheel (SW) を入れ替える。NSW は前項の説明の通り、Run3 そして HL-LHC 環境下の高いバックグラウンドレートでも、オンライン用トリガー、オフライン用飛跡精密測定の両方で性能を発揮しなくてはならない。加えて、HL-LHC 終了までの 10 年以上の長い期間で正常に稼働するよう、高い放射線耐性が求められる。

### 2.2.1 NSW の要求性能

ここでは具体的に、NSW に対する要求性能 (requirement) を挙げていく。

#### 精密飛跡再構成からの要求

現在の SW と同じ性能を、高いバックグラウンドレートの中で実現することが肝要である。

- 運動量 1TeV のミューオンでも 10% の精度で  $p_T$  を測れるように、検出器全体で R 方向に  $50\mu\text{m}$  の位置分解能を持つ。

- $p_T 10\text{GeV}$  以上のミューオンに対して 97% 以上のトラック再構成効率
- 非常に高い運動量のミューオンに対しても、デルタ線や、電磁シャワー等の影響で分解能が悪化しない。
- 各所のミューオン検出器を統合して同じミューオン飛跡を ID し再構成するために、 $\phi$  の位置分解能が 1-2mrad 以内となる。

となっている。

#### トリガーからの要求

トリガーにおける要求は、トリガーレートを 20kHz 以下で保ち、 $p_T$  閾値を 20GeV に保つ (この  $p_T$  閾値 20GeV のミューオントリガーを L1MU20 と呼ぶ。) ことである。そのためには前述の通り、NSW と BW とのコインシデンスによって、フェイクトリガーを減らさなくてはならない。図 12 は NSW と BW のコインシデンスによるフェイクトリガー削除の概念図である。SW のトリガー情報には、トラックの向き

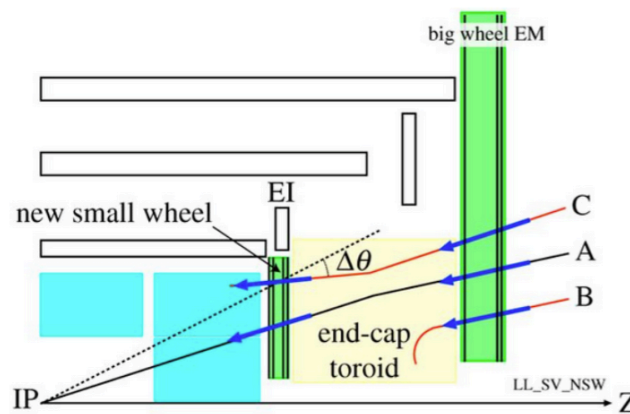


図 12 NSW と BW のコインシデンスによるフェイクトリガーの削除

がなかった。これに新たに図 12 のような形で、トラックベクターの天頂角を IP 方向からのずれ  $\Delta\theta$  の形で瞬時に測定できるようにし、B のような BW のみを通過するバックグラウンド粒子をコインシデンスを取ることによって除去するだけでなく、C のような、NSW・BW 両者を通りつつ IP 以外から来ているバックグラウンドもさらに落とすことができる。Run3、ルミノシティ  $3 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  の仮定で、BW 単体のみの L1MU20 レートが 51kHz となるのに対して、BW と NSW のコインシデンスを取ることによって L1MU20 レートを 17kHz に下げることができる [10]。こうしたフェイクトリガー除去を行うにあたり、トリガー性能としての requirement は以下である。

- レベル 1 ミューオントリガーを発行する Sector Logic (SL) に  $1\mu\text{s}$  以内にトラックが送信される。
- HL-LHC で TGC が到達する 1mrad の角度分解能に合わせ、 $\Delta\theta$  の分解能が 1mrad 以内になる。
- ROI(=ATLAS におけるオンライン処理において、検出器間での相互参照の時に用いられるセル) の幅である  $\eta - \phi 0.04 \times 0.04$  よりも  $\eta, \phi$  のオンラインでの位置分解能が良い。
- $1.3 < |\eta| < 2.5$  の領域で高い efficiency でトラックの再構成ができる。



## 2.2.2 ATLAS NSW に導入される Micromegas 検出器

### small-strip Thin Gap Chamber (sTGC) と Micromegas (MM)

NSW では、small-strip Thin Gap Chamber (sTGC) と Micromegas (MM) という 2 つの別々の技術を用いたガス検出器が組み合わされる。sTGC は現在の ATLAS トリガーに使われている TGC 検出器の技術を応用し、TGC のストリップピッチをさらに小さくし、分解能を細かくしたものである。MM については次項で詳しく述べる。sTGC, MM はそれぞれトリガーと飛跡精密測定の両方全てを行う能力を持つ。これは、HL-LHC 終了までの長い期間に渡って検出器が稼働することが求められるために、もう一方に不具合が生じた時のバックアップとして、もう片方が機能を果たすことを 1 つの目的としている。さらに、2 つの検出器が存在することでトラック検出効率を高めるだけでなく、お互いの構造体による inefficiency 領域をカバーし合うように設計されている。NSW では、sTGC, MM 共に、前項で述べた、高い放射線耐性、高ヒットレート環境での動作、各種分解能、等の要求を満たすことが求められる。

### Micromegas (MM) の動作原理

ここからは、この研究での対象となる MM 検出器に焦点を絞り、この論文を展開していく。まず、この項では ATLAS に導入される Micromegas 検出器の実際の構造、動作原理、について説明していく。Micromegas (Micro-MEsh Gaseous Structure) 検出器 [24] は、1990 年代に開発されたガス中の放射線による電離を用いる、ガス放射線検出器である。Micromegas 検出器はワイヤーチャンバーを発展させ、ワイヤー周辺での電子増幅ではなく、メッシュと読み出し面の間の狭い空間にかけた高電界によって電子を増幅させる機構を持っている。以下に NSW の MM 検出器の概略図を示す。MM の基本構造は上から順に、ドリフト用カソード電極

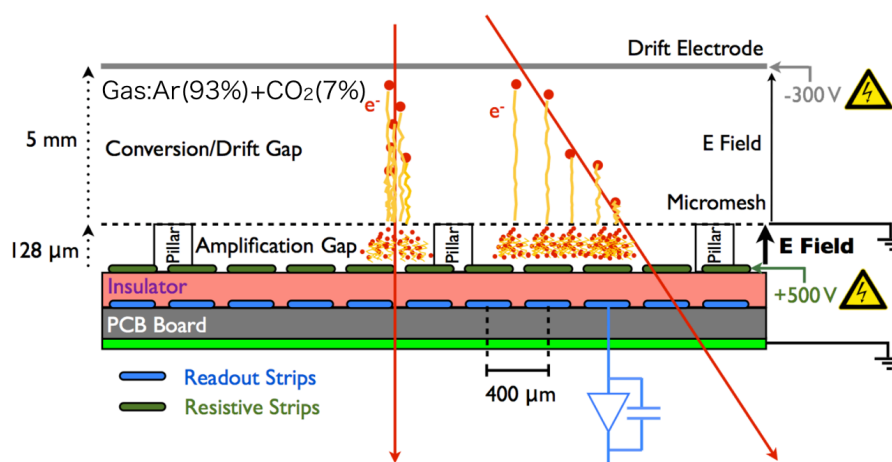


図 13 NSW に導入される放電耐性型 Micromegas 検出器

板 (-300V 程度)、5mm のドリフト領域、金属メッシュ (GND)、128 $\mu\text{m}$  の増幅領域とそれを電圧印可でかかる力から支える絶縁ピラー、炭素ベースの高抵抗ストリップ陽極 (+500V 程度)、その下に 50 $\mu\text{m}$  の絶縁層を挟んで、銅線による読み出し電極 (GND)、PCB ボードとなっている。ガスには Ar : CO<sub>2</sub> = 93 : 7 の混合ガスが用いられており、CO<sub>2</sub> はアルゴンイオンの脱励起で生じる紫外光を吸収するクエンチガスである。ゲインは 5000 程度。入射した荷電粒子はドリフト領域でガスの電離を起こし、発生した種電子がドリフト領域に

かかる電界に従って読み出し面へと移動する。メッシュを通過した種電子は、増幅領域の強い電界によって電子なだれを起こし、増幅された電荷が高抵抗ストリップ陽極へと流れる。それと同時に、銅線の読み出し電極では電荷が誘起され、これが電荷信号となって、フロントエンドエレクトロニクスにより MM の信号として検出される。Micromegas 検出器全般の最大の特徴は、カソードとアノードがメッシュによって分けられていることであり、ドリフト領域と増幅領域を分けることで、増幅後のイオン回収の時間を素早くしている。MM でも、ドリフト領域は  $0.6\text{keV/cm}$ 、増幅領域は  $40\text{keV/cm}$  程度の電界となっており、電子増幅は増幅領域でのみ起こる。MM では、 $128\mu\text{m}$  の狭い増幅領域により、イオン回収にかかる時間は  $200\text{ns}$  程度で済む。ガス検出器において、ヒットレートによる性能低下の原因になるのは空間電荷効果であるが、MM はイオン回収時間が  $200\text{ns}$  程度と短いために高ヒットレートに対応できる。NSW に導入される Micromegas のもう 1 つの大きな特徴は、高ヒットレートのバックグラウンド環境に耐えるため、放電耐性が改良されていることにある。従来の Micromegas と違い、MM の読み出し面は高抵抗ストリップ陽極とその下の読み出し電極に分かれている。このことにより、読み出し電極には直接の放電ダメージが起こらない。また、高抵抗ストリップ陽極の抵抗値が高いことにより、放電を起こした部分の陽極電位がすぐに電圧降下を起こし、放電が止まるシステムになっている。これらの特徴によって、MM は Run3、HL-LHC の高いヒットレートのバックグラウンド環境に耐えうる設計となっている。また、MM のストリップピッチは  $450\mu\text{m}$  程度と非常に細かいため、R の位置分解能も高い。

## NSW の構造

図 14 に NSW の全体図を示している。NSW は 8 回対称の構造をしており、 $\phi = 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4\dots$  を中心とした Large Sector とその間にある、 $\phi = \pi/8, 3\pi/8\dots$  を中心とした Small Sector に分かれており、Small Sector の方が前方にある。NSW でのセクターとは、1 つの台形をした検出器のことを指す。NSW の 1 セクターはさらに R における上下で二分割されており、中心からモジュール 1、モジュール 2 と呼ぶ。Large と Small Sector の  $\phi$  には重なりがあり大きさは約  $2^\circ$  である。これにより、NSW は全方位角  $\phi$  を覆っている。NSW の Z 位置は  $Z = 6900 \sim 7900\text{mm}$ 、R は  $4300\text{mm}$  までであり、 $|\eta| = 1.3 \sim 2.7$  の領域をカバーする。(但し、トリガーに使われるのは  $|\eta| = 1.3 \sim 2.4$ ) に位置し、NSW の 1 セクターには、4 層の sTGC、8 層の MM、4 層の sTGC の順で、計 16 層のガス検出器が内部に重なる形で設置されている。MM は Small/Large Sector を合わせて 16 層が 1 つの A/C-side に存在し、(A-side は ATLAS 検出器の Z 正方向側、C-side は Z 負方向側のことである。) ATLAS 全体では 32 層存在している。1 つのセクターの中の MM8 層の中でも層によってストリップの並び方と、役割の違いがある。MM にはレイヤーの種類が 3 つあり、種別の違いで X, U, V と名付けられている。X layer ではストリップが  $\phi$  の接線方向、台形のセクターの上底・下底と平行に並んでいる。(こうした  $\phi$  の接線方向平行に並ぶストリップを Horizontal strip と呼び、X 層を Horizontal layer と呼ぶ。) 対して、U layer では  $\phi$  の接線方向から ATLAS の XYZ の右手系で  $+1.5^\circ$ 、V layer では  $\phi$  の接線方向から  $-1.5^\circ$  傾いてストリップが並んでいる。(こうした  $\phi$  の接線方向から傾いて並ぶストリップを Stereo strip と呼び、UV 層を Stereo layer と呼ぶ。) X layer のみでは  $\phi$  方向の分解能を持ってないが、この  $\pm 1.5^\circ$  の傾きがあることで、MM は  $\phi$  方向にも位置分解能を持つ。検出器 8 層の内訳としては、IP 方向から順番に X, X, U, V, U, V, X, X の順に並んでおり、X layer を離して置くことで、角度分解能に必要なレバーアームを稼いでいる。

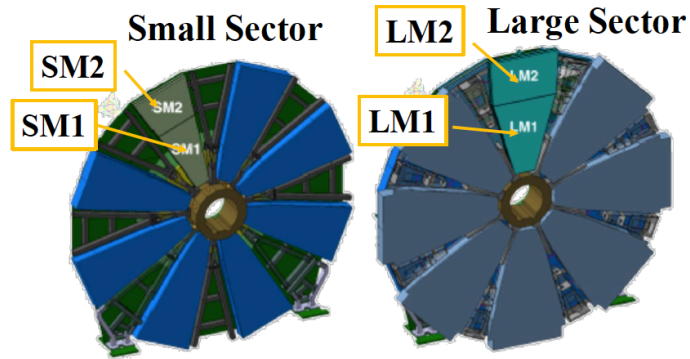


図 14 NSW の概観

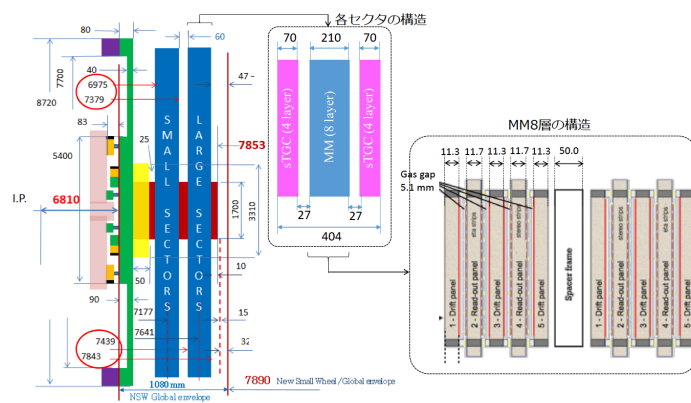
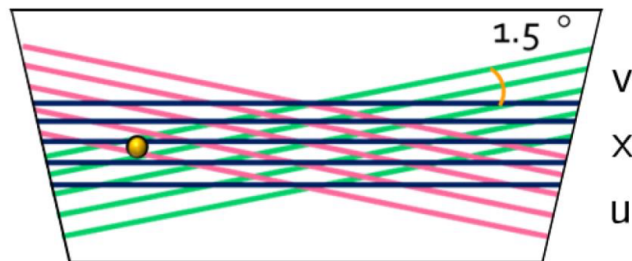


図 15 NSW のジオメトリ詳細



x: horizontal strips (2 planes per Quad.)  
 u,v: stereo strips (1 each per Quad.)

図 16 NSW の概観

### 3 Micromegas (MM) を用いたレベル 1 ミューオントリガー

この章では、MM の信号が出てからレベル 1 ミューオントリガーが発行されるまでを、順番を追って説明する。最初に、レベル 1 ミューオントリガーの全体を簡潔に説明する。図 17 は Run3 レベル 1 ミューオントリガーの概念図である。Run2 現在、エンドキャップ部でメインでトリガーを発行しているのは BW である

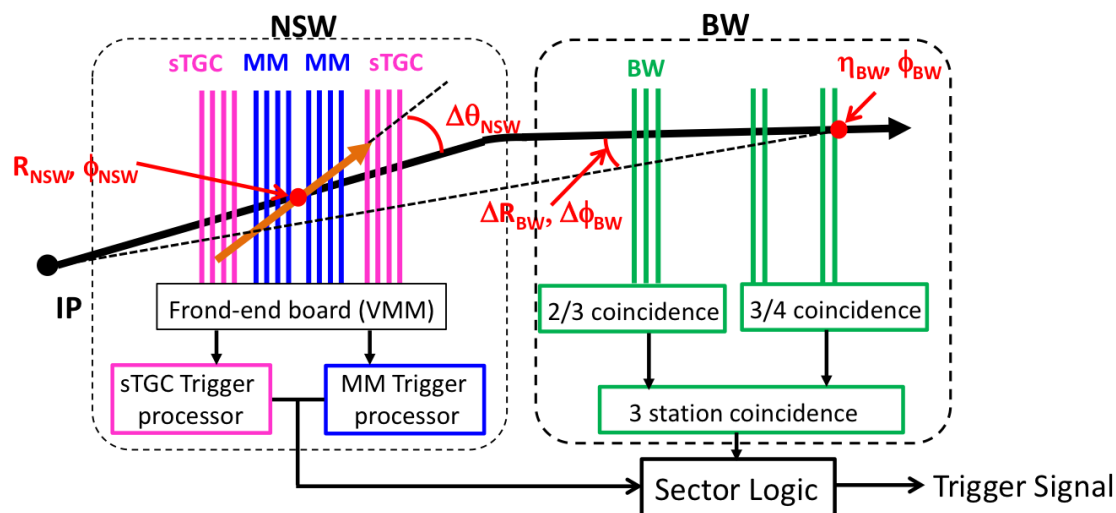


図 17 Run3 レベル 1 ミューオントリガー

が、Run3 のレベル 1 ミューオントリガーでは、BW と NSW のコインシデンスを取る。まず最初に、NSW 内の sTGC・MM で独立に飛跡を探し、飛跡の  $\eta, \phi, \Delta\theta$  を計算する。 $(\Delta\theta$  は IP 方向との天頂角上のずれ角度。) その後、sTGC, MM のトラック候補を NSW 内でマージして、統一された NSW としてのトラック候補を Sector Logic (SL) へと送信し、BW からのトラックとコインシデンスを行い、SL にてレベル 1 トリガーを発行する。

#### 3.1 NSW のトリガーシステム

NSW のトリガーシステムの中で MM のトリガーパスをまとめたものが、図 18、図 19 である。この章で順を追って説明していくが、MM のトリガー経路は、MM 検出器 → MMFE8 上の VMM ASIC → ADDC 上の ART ASIC → 検出器に対する遮蔽の外側、USA15 サイトに置かれた MM トリガープロセッサという形になる。

##### 3.1.1 MM のフロントエンドエレクトロニクス [13]

MM の銅線読み出し電極に対して、信号を検知、整形し出力するフロントエンド ASIC は VMM という名称を持っている。8 個の VMM が MMFE8 (MicroMegas Front-End board 8) という 1 つのボード上に置かれ、MMFE8 は検出器の横側最端に取り付けられている (図 19)。この MMFE8 と MM 信号はゼブラコネクタで接続され、MM のストリップ信号が VMM に入力される。MMFE8、そこに搭載された 8 個の VMM が

NSW Electronics Trigger & DAQ dataflow

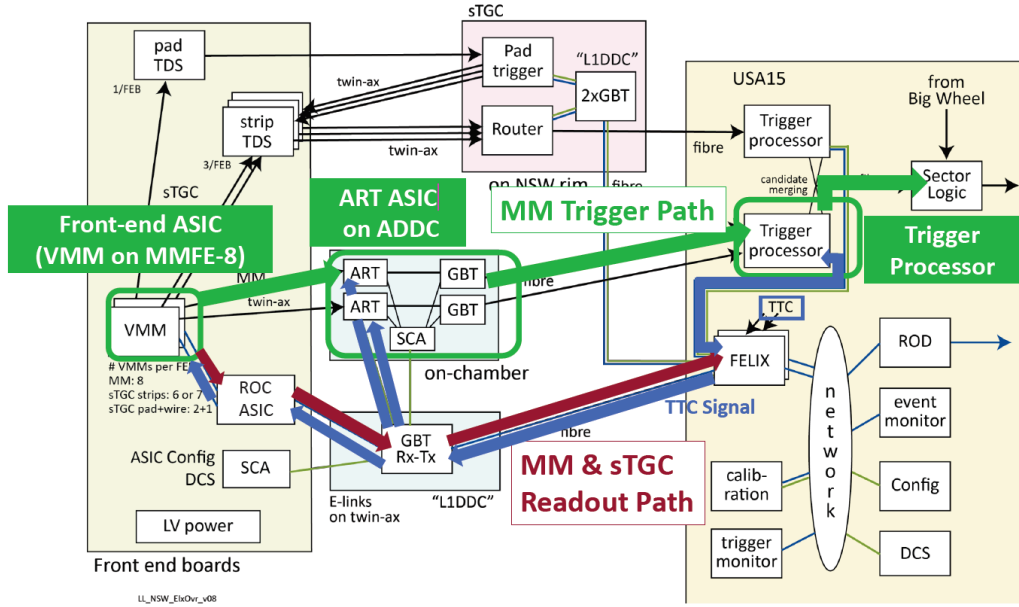


図 18 MM のトリガー経路

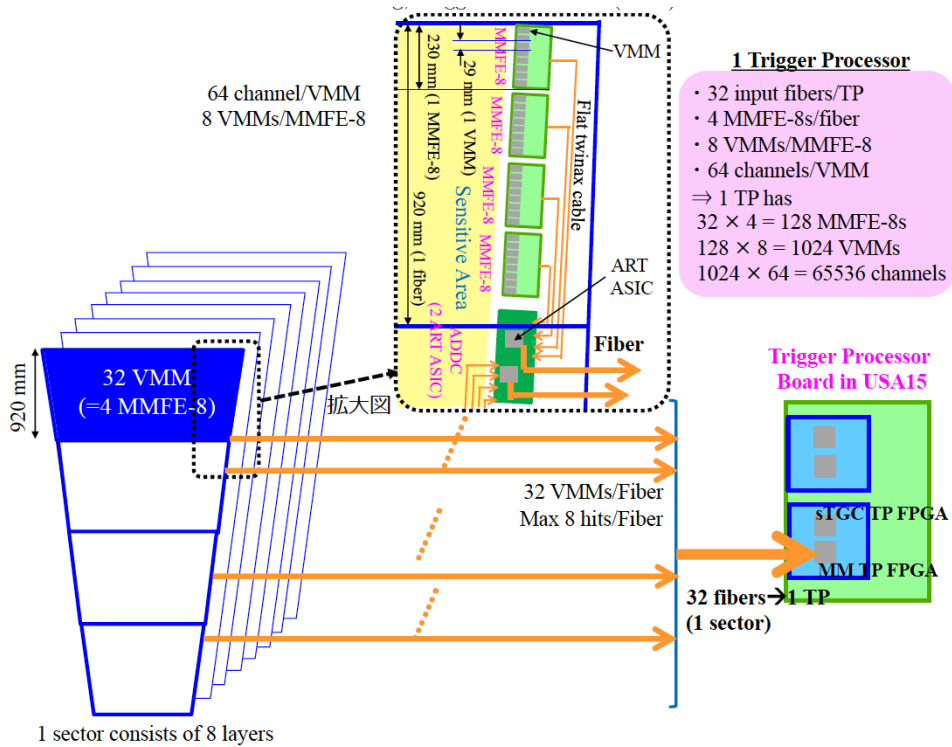


図 19 MM のトリガー経路の視覚的概略

図 20 である。1つのVMMは64ストリップを受け持ち、VMMはトリガー用、飛跡精密測定用信号の両方



図 20 MMFE8 に搭載された 8 つの VMM

を出力する。両者の決定的な違いは、信号の数である。MMは0.45mmの細かいストリップピッチにより、1つのトリガーセクターあたり66kのチャンネル数を持ち、トリガーとして使用するには情報量を削減する必要がある。そのため、1つのVMMは、64ストリップからの信号を処理し、その中で最速の1つのストリップ信号のみをトリガー信号として出力する。これにより、トリガー信号のチャンネル数を64分の1に削減する。加えて、飛跡精密測定用信号では時間情報・電荷情報をビット化して後段に送るが、トリガー信号では160MHzで信号の有無をサンプリングし、ストリップのアドレス情報のみを出力する。VMM回路のフローチャートが図21である。1つの読み出しストリップに着目すると、VMMに入った電荷は、まず、最初にプ

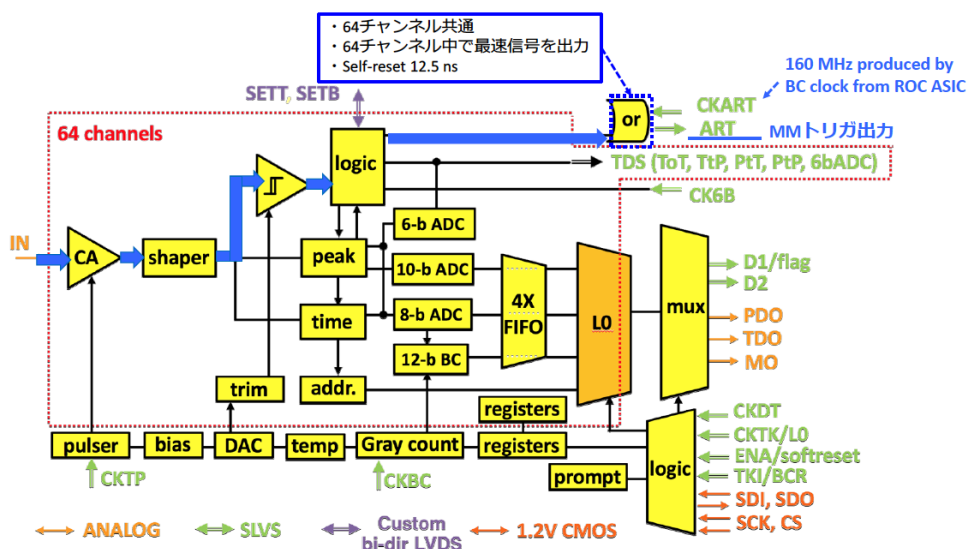


図 21 VMM 内部の回路概略図

リアンプ (図の"CA", low-noise charge amplifier) で増幅され、その後シェイパーを通して電圧信号に整形

される。整形された電圧信号に対して、トリガー信号に繋がる処理系では閾値の値を超えた段階でディスクリミネーターが1を出力する。最終的に64チャンネルのORを取って、64チャンネルで最速の信号を出す。このディスクリミネーターは10bitのDACによって各ストリップチャンネル毎に最適化できる。64チャンネル中で最速の信号がART (Address in Real Time) 信号として後段に送られる。(このART信号がトリガー信号である。) 対して、飛跡精密測定用のパスでは、ピーク検出を行い(図の"peak")、ピークの振幅をADCでデジタル化し、電荷情報として後段に送る。さらに、ピークまでの時間を振幅に変えるTAC (Time to Amplitude Converter) (図の"time")を用いて、ピークまでの時間をADCでデジタル化し、時間情報として後段に送る。トリガー信号送信の詳細に入る。40MHzのBC clockを取り、それを分周器と位相同期回路にかけて160MHzの逡倍波を得る。64chのORがonになっている時に160MHz clockが来ると、VMMは8bitのストリップ情報(2bitの先頭フラグと6bit=64chのストリップアドレス)を、160MHz信号の立ち上がり・立ち下りの両タイミングを使って信号を送るDDR (Double Data Rate) 方式で送信し始める。DDR方式により、送信速度は320MHzであり、送信にかかる8bit=4clock(160MHz)=25nsの後、VMMは回路のリセットのために160MHz 2clockつまり12.5nsの時間を要する。この37.5nsの間は、同じVMMに他の信号が来ても、信号を出すことはできないため、これが本質的なdead timeとなる。

### 3.1.2 MMトリガープロセッサへのデータ送信の流れ

#### ADDCとART ASIC

VMMからのART信号は、ADDC(ART Data Driver Card)上のART ASICへと送られる。1つのADDCには2つのART ASICが搭載されている。1つのART ASICには4MMFE8からの入力が入り、1つのADDCには $2 \times 4 \times 8 = 64$ VMMの入力が集まる。1layerには128個のVMMがあるので、MMの1layerには上下モジュールそれぞれに1つずつADDCが付いている。ART ASICからはGBT (GigaBit Transceiver)[15]リンクを通してMMトリガープロセッサへとART信号を送る。GBTリンクを通して送信可能なビット数の制限から、1つのART ASICから後段に送れるART信号は1BCあたり最大8信号までとなっている。そこで、ART ASICではデータのDe-serializeを行い、32チャンネルを1BC(=25ns)かけて整列させ、その後Rの大きい方または小さい方から8個のART信号を選択する。Rの大/小どちらからART信号を選択するかについては、プログラム可能(可変)なオプションである。図22にART ASIC内の回路のフローチャートを示している。DDR方式で送られたART信号を正しく再構成するため、160MHzの半周期よりも高い精度で最初にクロックの位相を合わせる。ART ASIC内の最初にはProgrammable Delayが各チャンネル毎に存在しており、0.2nsまたは0.4ns単位で、0~1.5nsまで位相に人工的なDelayをかけることができる。次に、1BCかけて32VMMから来るデータをDe-serializeする。その後ろには、Programmable dead time gate (6章に詳述)が挟み込まれており、本質的なVMM dead time 37.5nsに加えて、人工的なdead timeを0~8BCの範囲で各VMMからのART信号にかけることができる。さらに、Rの大小による選択が優先度選択回路の中で行われた後、Data formatterでGBTでのデータ送信に合わせた形にデータ形式を変更する。ADDCからのデータ転送にはGBTのlow-latency widebusモードを使用する。このモードでは112bitの情報をユーザーが使用することができる。出力するデータ形式は、図23にまとめられている。先頭の0b1010は4ビット区切り文字に対応する。そこから順に12bitのBC情報(BCID)、8bitのエラー情報(ERR\_FLAGS)、32VMMそれぞれのヒットの有無を1/0で並べたもの(HIT\_LIST)、8個あるART信号それぞれで計算した1bitパリティを8個ぶん並べたもの(ARTDATA\_PARITY)、8個のART信号(各6bit)で埋められている。

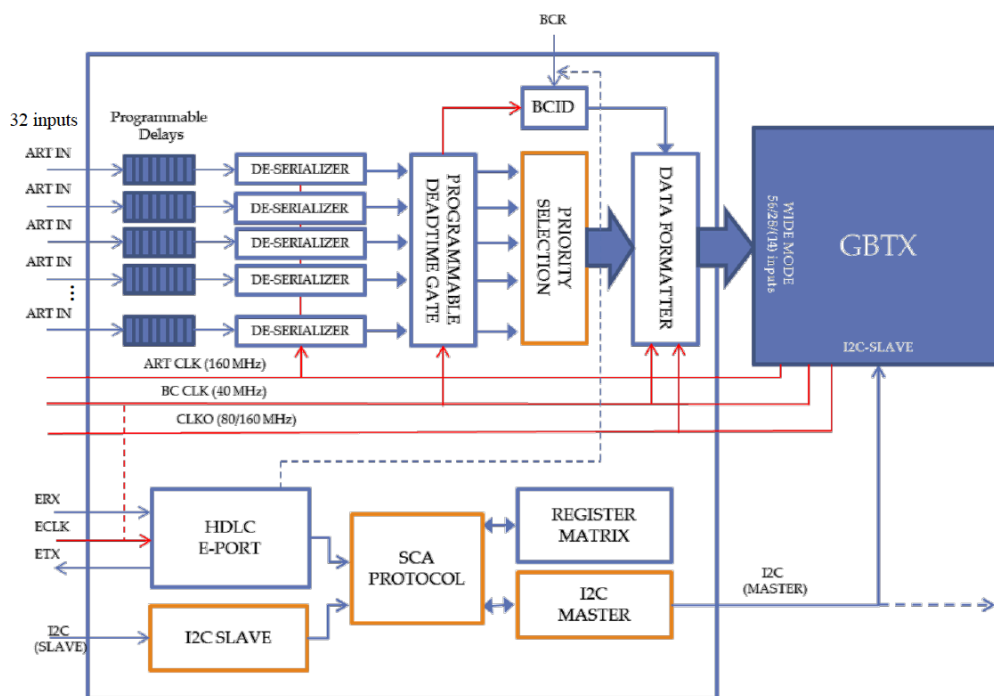


図 22 ART ASIC 内部の回路概略図

0b1010	BCID(12)	ERR_FLAGS(8)	HIT_LIST(32)	ARTDATA PARITY(8)	ART(6)	ART(6)	ART(6)	ART(6)	ART(6)	ART(6)	ART(6)	ART(6)
--------	----------	--------------	--------------	----------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

図 23 ADDC からの出力 112bit のデータ形式

### MM トリガープロセッサ

1つのトリガープロセッサは1セクターをカバーする。(MMにおいてはトリガーセクターとセクターは同一である。) ATLAS全体では、16セクター×2side(A/C-side)で32枚のトリガープロセッサが存在する。sTGCとMMの両トリガープロセッサはともにFPGA(Xilinx Vertex 7 XC7VX690T)に実装される。同じセクターのsTGCとMMのトリガープロセッサは同一のメザニカード(トリガープロセッサボード)に搭載される。2つのメザニカードが1つのマザーボードに装着されている。これらは、ATLAS検出器の遮蔽の外側にあるUSA15(図6参照)サイトに置かれている。

### 3.1.3 MM トリガーアルゴリズムの概略

MMのトリガーアルゴリズムの詳細な内容は5章に述べ、ここでは、レイテンシー、SLへの出力におけるビット配分などのデータ処理について中心に説明する。MMトリガープロセッサ内での処理の流れが図25にまとめられている。MMトリガープロセッサは320MHzのclockで動作する。Data DecoderでGBT



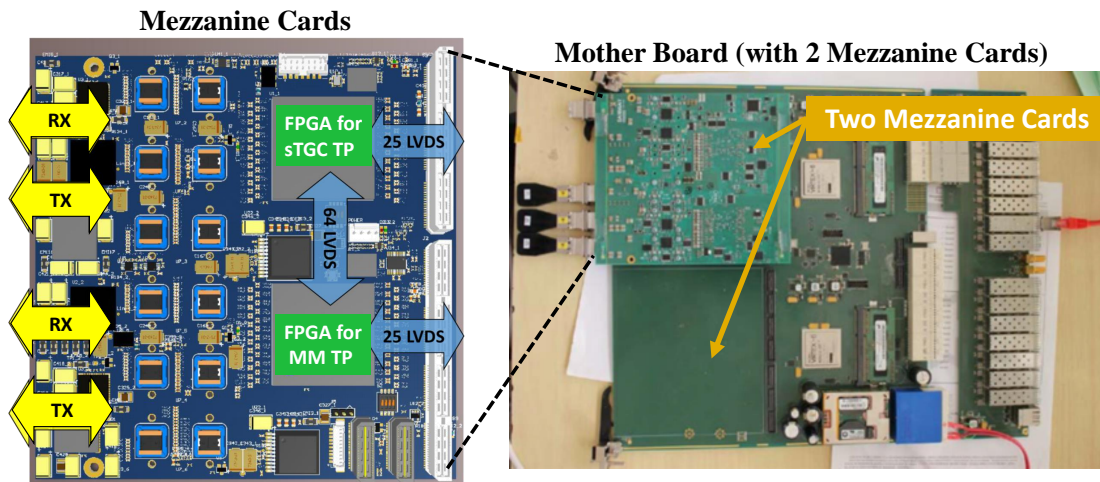


図 24 MM トリガープロセッサが搭載されたメザニーカード

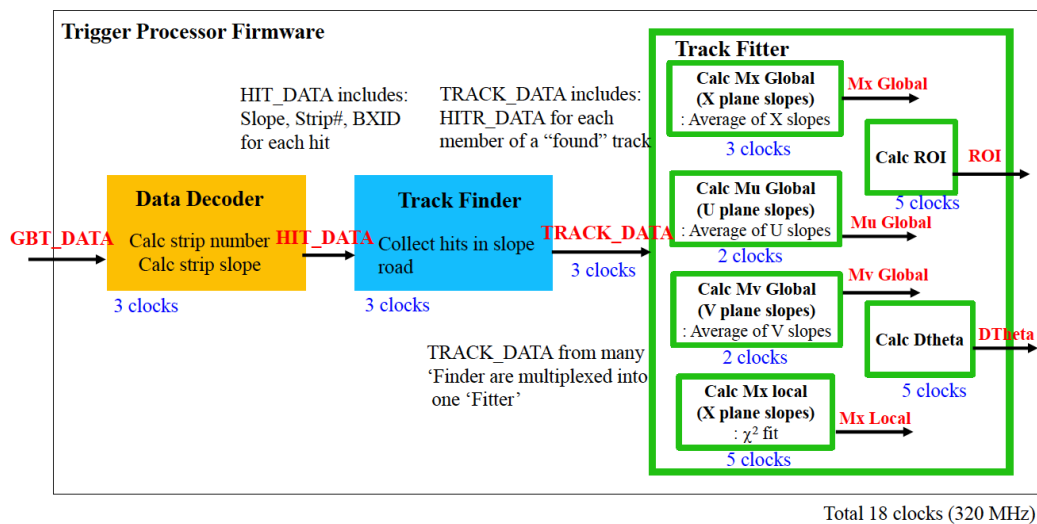


図 25 MM トリガープロセッサ内の処理の流れ

リンクから来る最大 128VMM からの信号を受け取り、Data Decoder で decode する。この際に、信号 VMM の位置情報とストリップ情報をもとに、グローバルなストリップ ID を計算し、R/Z の傾きの値へと変換を行う。さらに、傾きの値に変換された信号情報は、傾きの値によって幅一定のビンにビンニングをされ、ビンの中で何層のヒットがあるかコインシデンスを取る。それによって、閾値として設置した層の数を超えた場合には、トラックが検出されたと見なし、次の行程に移る。トラック候補に対する  $\eta, \phi, \Delta\theta$  パラメーターの物理計算は図の緑色に囲まれた部分で行われる。詳しい内容は 5 章に譲るとして、これらの物理計算アルゴリズムはレイテンシー固定のパイプライントリガーとなっており、全行程を 18clock で行う。トリガーにおける  $\eta, \phi, \Delta\theta$  の分解能に対する要求は、 $\eta$  が 0.005、 $\phi$  が 10mrad、 $\Delta\theta$  が 1mrad である。SL へのトラック出力形

式は、この精度を元に決まる。 $\eta$  は 8bit、 $\phi$  は 6bit となる。 $(\eta, \phi)$  のこれらは ROI の 0.04rad の幅よりも小さい。)  $\Delta\theta$  は 1bit・1mrad で 5bit であり、 $-15 \sim 15$ mrad までの値を符号を含めて表現可能にする。IP から来るミュオン散乱等による広がり 10mrad 以内に収まるため、十分対応できる。現状のアルゴリズムでは、 $|\Delta\theta| < 7 \sim 15$ mrad でカットをかけ、IP 方向を外れたトラックについては、MM の段階で後段へ送信しないということになっている。

### 3.1.4 small-strip TGC (sTGC) と MM の統合と、SL への出力

sTGC と MM で独立に検出したトラック候補を最終的に統合して SL へと送信する。MM の計算の方が速いため、MM のトラック計算が終わると、MM は sTGC のトリガープロセッサへトラック情報を送る。メザニーカード上で sTGC トリガープロセッサへと送られた MM のトラック情報をもとに、sTGC 側のトリガープロセッサでは 2 つの検出器からのトラックを統合する。sTGC、MM ともに検出したトラック候補のクオリティビットを 2bit で定義しトラックと一緒に送信する。2bit を使った 11,10,01,00 の 4 段階のうち、00 はトラックが存在しないことを表現するため、3 段階でクオリティを定義できる。トラック候補のマージでは、 $\eta, \phi$  の照合を行い、重複を除去する。クオリティビットをもとに、どちらの検出器の  $\eta, \phi, \Delta\theta$  の値を後段に送るかを決定する。クオリティビットの正確な定義は検討中であり、今後研究が必要とされている。NSW

表 1 NSW のトラック出力

ブロック	sTGC quality	MM quality	$\Delta\theta$ (mrad)	$\phi$ index	$\eta$ index	Spare
bit 数	2	2	5	6	8	1

のトリガー出力は、表 1 にまとめられている。各検出器が独自に出したクオリティが最初の 4bit に 2bit ずつ並べられている。 $\eta, \phi, \Delta\theta$  のパラメーターの bit 数は表 1 の通りである。

## 4 MM 出力信号のシミュレーション

本研究では、MM のトリガー性能をシミュレーションによって評価するべく、MM 信号の再現を目指した。この章では、MM 信号の特徴を説明し、さらにトリガー用の信号を再現するためのシミュレーション手順について具体的に説明していく。

### 4.1 荷電粒子に対する MM の応答

#### 4.1.1 荷電粒子と検出器の相互作用 [16]

入射したミューオン等の荷電粒子は MM のガスギャップ内で MM のガスと反応し、電離を起こす。簡単のため組成をアルゴンのみとして考えておくと、アルゴンの  $dE/dx$  は MIP に対して  $1.51\text{MeV}\cdot\text{g}/\text{cm}^2$  であり、アルゴン密度は大気圧で  $1.66\text{g}/\text{L}$  である。入射角度を垂直として、MIP が  $5\text{mm}$  のガスギャップ中に落とすエネルギーは  $1.51\text{MeV}\cdot\text{g}/\text{cm}^2 \times 1.66 \times 10^{-3}\text{g}/\text{cm}^3 \times 0.5\text{cm} = 1.25\text{keV}$  である。電子イオン対を 1 つ作るのに必要なエネルギーを表す  $W$  値は、電子の場合アルゴン単体では  $26.4\text{eV}$  であり、荷電粒子に対する MM の応答では、約 40 個の電子イオン対が生成される。クエンチガスとして入れた二酸化炭素によるペニング効果は  $W$  値を下げる可能性があるため、種電子の平均発生数が 30 個以上であることは間違いない。入射角度が垂直から傾くほどに飛程は伸び、種電子の個数はさらに増える。電離の起こらない可能性は  $e^{-30}$  以下と非常に小さく無視して良い。したがって種電子の数は 30 以上を超えるので、十分に大きく、その分布はガウス分布である。さらに一次電子が高いエネルギーを持っていた場合にはさらなる二次電子を電離する。出来た電子は読み出し面に向かって垂直にドリフトする。電子のドリフト速度は、約  $5\mu\text{s}/\text{cm}$  であり、カソード脇で出来た電子が  $5\text{mm}$  あるガスギャップを完全に移動しきるのには  $100\text{ns}$  程度の時間がかかる。ドリフト領域で電子が移動している間、電子の読み出し面に平行な座標での位置は熱拡散によって揺らぎ、揺らぎの大きさはドリフト長に比例する。

#### 4.1.2 電子増幅と電荷回収

電子増幅領域では、電子は電界による加速によってイオンを電離するエネルギーを得て、さらなる二次電離を起こし、電子数は増えていく。この時、電子数はポリア分布に従う。熱拡散による電子なだれの広がりを持ちながら、増幅された電子は高抵抗陽極ストリップへと到達し回収される。MM 検出器の増幅領域で増幅された電子は高抵抗陽極ストリップへ移動し、読み出し電極には電荷が誘起される。読み出し電極に接続された VMM に流れる電流インプットのシミュレーション結果は図 26 となる。この図にある実際の電流は負の値であり、図には絶対値が描かれている。最初のパルス部分は電子による電流であり、 $2\text{ns}$  以内に終了する。対して、長く一定の値で続いている  $200\text{ns}$  程度までの電流は、増幅領域で生じたイオン電荷によって起こる電流である。 $128\mu\text{m}$  と狭い増幅領域のため、全体としての電荷回収は陽イオン回収にかかる  $200\text{ns}$  程度で済んでいる。時間測定の観点からは、シェイパー関数を通した際に主に重要になるのは電子によるパルス電流である。このパルス電流によって VMM 計測される時間が決まるので、MM の応答は速い。

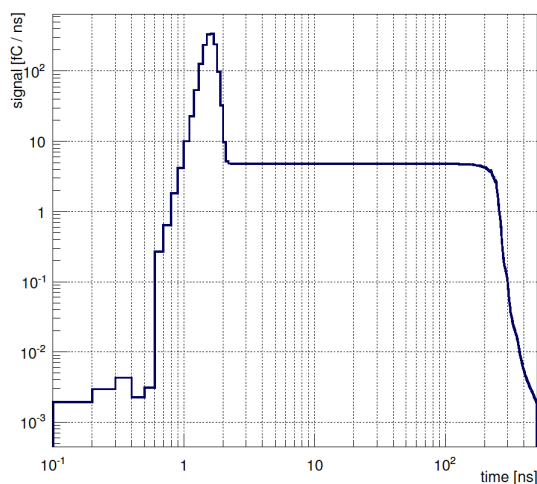


図 26 読み出し電極からの電流インプット [13]

#### 4.1.3 VMM での信号処理

フロントエンド ASIC である VMM で使われているシェイパーの関数は、流入した電荷を  $Q$ 、時定数を  $\tau$  とし定数倍を無視して書くと以下の式となる。

$$V \propto Q \cdot ((K0 \cdot e^{-pole0 \cdot t / \tau}) + (2|K1| \cdot e^{-\text{Re}(pole1)t / \tau} \cdot \cos(-\text{Im}(pole1)t / \tau + \arg(K1)))) \quad (4.1)$$

$pole0$  が実数の極、 $pole1$  が複素数の極、 $K0$  は実数定数、 $K1$  は複素数の定数である。これを実際の VMM のパラメータで出力したものは 6 章に掲載している。このシェイパー関数のピークまでの時定数には、ASIC 作成後に変更可能なオプションが用意されている。時定数のオプションには 25ns, 50ns, 100ns, 200ns の 4 つが設定されている。連続してやってくる電荷に対しては、このシェイパー関数を足し合わせたものが最終的な波形になる。1 ストリップに対する電圧波形は、トリガー用信号、飛跡精密測定用信号で共通である。トリガー信号においては、最終的な各ストリップからの波形に対して、閾値を超えた段階でディスクリミネーターが 1 を出力、それを 64ch チャンネルで OR を取り、64ch 内で最速の信号をストリップアドレスとして送信する。

## 4.2 トリガー信号のシミュレーション

ATLAS のソフトウェアフレームワークである Athena 上で動く検出器シミュレーションを用いて、MM のトリガー信号を作成した。

### 4.2.1 ATLAS 検出器への粒子ヒットシミュレーション

#### シグナルミュオン

まずは、ATLAS 検出器全体へのヒットシミュレーションである。Athena 上で動く、Geant4 を基本とした全検出器シミュレーションによって、シグナルとなるミュオンを生成し、シグナルミュオンと ATLAS 検出器の相互作用をシミュレーションした。以下にシグナルとなるミュオンの条件を列挙する。

- $p_T = 100\text{GeV}$  で固定 (十分に真っ直ぐに飛ぶ高い  $p_T$  値)
- ミューオンのバーテックスはビーム衝突点の実際の広がり程度の  $\sigma(Z) \sim 5\text{mm}$ ,  $\sigma(X, Y) \sim 16\mu\text{m}$  の広がりをもつ。
- 電荷による影響を平均できるように  $\mu^+, \mu^-$  を完全に 1:1 の比率で作成
- $\eta, \phi$  にフラットな分布

### バックグラウンド (BG)

さらにシグナルミューオンに重ねるためのバックグラウンド (BG) ヒットをシミュレーションで生成した。ATLAS における BG シミュレーションは主に 2 つの種類に分けられる。一つは、陽子の非弾性衝突から出る non-diffractive な崩壊のイベントを、 $|\eta|$  の大きな超前方の粒子をカットしてシミュレーションする minimum bias BG である。こうした粒子は検出器に対して直接的に相互作用を起こし、比較的短い時間スパンで影響が消える。対して、minimum bias でカットされた、検出器に当たらない超前方に飛ぶ粒子のヒットレートは非常に高く、これらがビームパイプやビーム軸周りの構造物に当たり、そこで起こった QCD 事象から最終的に出てくる中性子や光子による間接的な BG も大きな割合を占める。このような背景事象を Cavern BG と呼ぶ。Cavern に分類される中性子や光子は、元になるハドロンが物質に衝突してから分のオーダーの時間が経って検出器にヒットを残す場合もあり、その影響が長期に渡る。但し、典型的なオーダーとしては  $1\mu\text{s}$  程度である。陽子同士の弾性衝突は BG として影響し得ない。背景事象として問題となるのは非弾性散乱の場合である。非弾性散乱の断面積は、陽子-陽子衝突からの QCD を通した粒子の出来方で図 27 のように non-diffraction, single diffraction, double diffraction, central diffraction に分類される。このうち、非弾性散乱の大半を占めるのは non-diffractive な崩壊イベントである [17]。ATLAS では non-diffractive な事象を専用のトリガーで集め、これらの BG シミュレーションの基本となるデータを収集し、観測による実データでシミュレーションに改良を加えている。今回の研究では minBias (minimum bias の略語として使われ

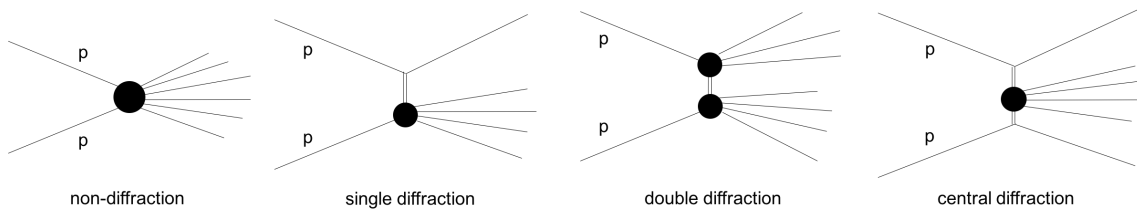


図 27 陽子-陽子非弾性散乱の崩壊パターン

る) BG をシミュレーションで再現した。1BC あたり非弾性衝突を起こす陽子の数を、パイルアップ数と ATLAS では呼ぶ。この値を  $\langle \mu \rangle$  と書く。パイルアップ数分だけの minBias BG をその BC で重ね、-10BC から +8BC に渡ってそれを全ての BC で行う。こうして、シグナルミューオンに対して minBias BG の環境を再現した。今回のシミュレーションでは、パイルアップ数 80, 160 の 2 つの BG サンプルを用意した。パイルアップ数 80, 160 という値はそれぞれ Run3, HL-LHC に相当する。図 28 では、左側が現行の SW (Small Wheel) のヒットレートをもとにルミノシティ  $7.0 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  でのヒットレートを予測したもの、右側が作成した BG サンプルでのヒットレートである。左図の黒線が実データからのヒットレート予測である。左図のヒストグラムは MC のシミュレーションによ

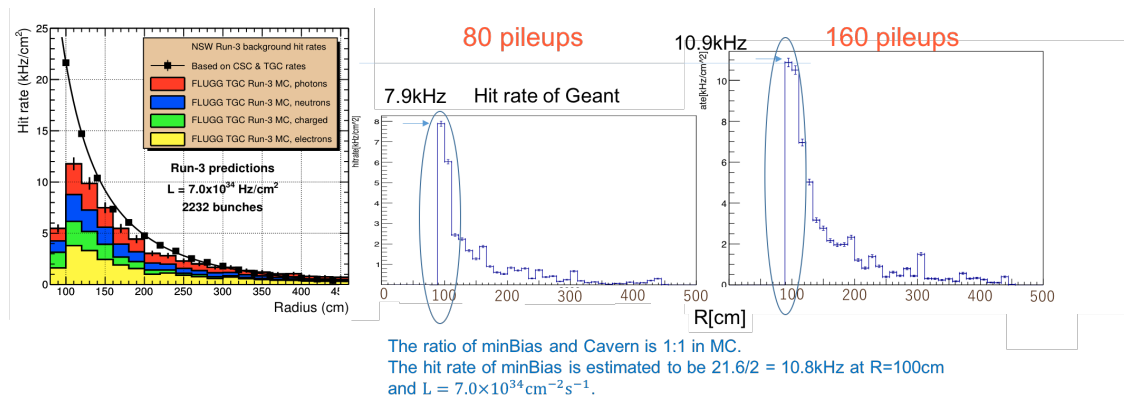


図 28 Run2 データをもとにしたヒットレート予想 [18] と作成した BG サンプルのヒットレート

る値であり、光子、中性子の赤・青のヒストグラムを合わせたものが Cavern BG に相当し、それ以外の緑・黄色が minBias BG である。MC の比率がおおよそ 1:1 であることを考え、比のみを信頼すると、 $R=100\text{cm}$  のところで左図のヒットレート予測は  $21.6\text{kHz}$  となっているので、minBias 換算では  $10.8\text{kHz}$  となる。一方、研究のために作成した minBias サンプルは、パイルアップ数 160 の時、 $R=100\text{cm}$  のところで  $10.9\text{kHz}$ 、全体を見ても、左図の黒い実線の半分値と同程度のヒットレートとなっている。Cavern を考慮していないため、実際のバックグラウンド環境としては、全体のヒットレートとしては半分、minBias 環境としては同程度のヒットレートが再現できている。MM においてコインシデンスを通るような事象は、複数層を貫通し IP を向くような correlated な BG である。こうした荷電粒子は minBias BG が大部分を占める。Cavern は光子からの二次電子の場合を考えても IP 方向を向いたトラックが出る確率は極めて少ない。トラックレートという意味では minBias が効くので、作成したパイルアップ数 160 の BG サンプルは、BG からのトラックレートという意味では HL-LHC に相当する。一方で dead time の影響など、占有率の問題では、correlated かどうかは関係なく、Cavern と minBias に差異はない。したがって、パイルアップ数 160 の BG サンプルは、ヒットレートとしては  $7.0 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  の時のヒットレートの半分であり、Run3 に相当する。

#### 4.2.2 MM 検出器の信号シミュレーション

次に、MM 検出器で起こったヒットから MM 検出器の出力信号をシミュレーションした方法を説明する。

##### MM 検出器の荷電粒子応答シミュレーション

電離では、Geant4 で計算されたエネルギー損失をもとに種電子を飛跡に沿って作成する。電子のドリフト速度は、garfield++ を使ったシミュレーションからすでに理解されている。MM Digitization (MM 検出器の信号シミュレーションパッケージ) 内では、電子のドリフト速度  $4.7\text{cm}/\mu\text{m}$  で一様として計算されている。MM 検出器内の磁場分布は Athena 内のデータとして存在しており、それを利用して、磁場によるローレンツアングルを計算する。また、水平面内でのドリフトによる座標の分散の大きさも一定の値として設定されている。ドリフトについては、これらを考慮し、さらに、ポリア分布に従って種電子からの最終的な電子数を決める。

## フロントエンド ASIC のシミュレーション

MM のフロントエンド ASIC である VMM にやってくる電流信号は図 26 のように、電子による最初のパルス電流が優位である。特に、トリガー信号ではピークではなく、閾値を電圧が超えたタイミングを計測するため、2ns 以後から定常電流としてやってくるイオン由来の電荷は信号の立ち上がりに影響せず、トリガー信号に影響しない。シミュレーション上では電子による電荷に対してシェイピング関数を掛け合わせ、それを足し上げたものを VMM のストリップ信号の波形としている。この VMM 波形のシミュレーションのイメージは図 29 である。1 つの種電子から増幅領域でできる電子に時間差はほとんどない。(図 26 にあるように 2ns

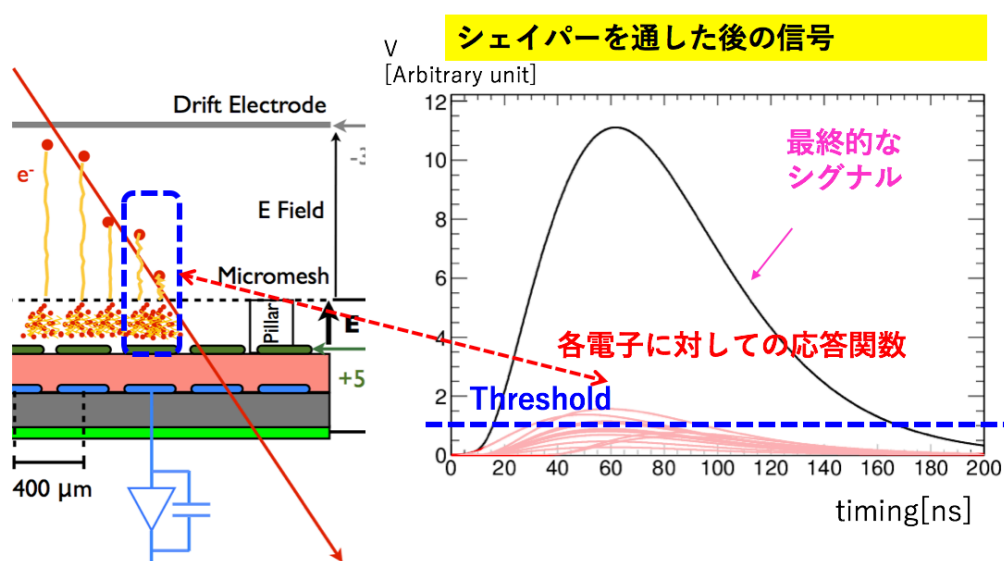


図 29 シェイパー整形後の波形イメージ

以内である。) 従って、実際の MM Digitization では種電子 1 個に対して直接シェイピング関数をかけ、それをポリア分布で出した個数倍にしている。ゲイン 5000 にもなる MM ではこうした計算を行うことで計算量を削減している。また、実際の VMM ASIC ではシェイピング回路の時定数オプションを変更することができた。もちろんシミュレーション上も可能である。しかし、ピークまでの時定数を伸ばすことは、整形後の電圧波形の立ち上がりが鈍くなることを意味し、トリガー信号の時間タイミングが遅れ、時間内のトラック検出効率を下げる影響がある。そのため、6 章の議論までは 25ns の時定数を基本として話を進める。

## 5 MM トリガーアルゴリズムの評価

この章では、現行の NSW 計画において実装予定の基準となるアルゴリズムを説明した後に、そのトリガーアルゴリズムのパフォーマンスをソフトウェアによるシミュレーションで評価した結果を述べる。

### 5.1 MM トリガーアルゴリズム

この章では、現行想定されている MM トリガーアルゴリズムを詳しく説明していく。3 章での概略の通り、MM トリガープロセッサ上に実装されるトリガー論理は大まかに 2 つの段階に分かれる。前提として、1 つのトリガープロセッサには 1 トリガーセクターを構成する MM の検出器 8 層全てから、VMM から 64ch 最速のストリップアドレス ID (ART 信号) が送られてくる。第一段階として、それらのアドレス ID を元に、トラック候補 (Track segment) を見つける。次に、そのトラック候補に対して  $\eta, \phi, \Delta\theta$  の 3 つのパラメータを計算する。本研究では、1 段目のトラック候補を見つめる過程を、「トラック検出」と呼ぶ。先に、検出器で使う Local 座標を説明するとともに、トリガーの議論で用いる種々の値を定義しておきたい。図 30 にある

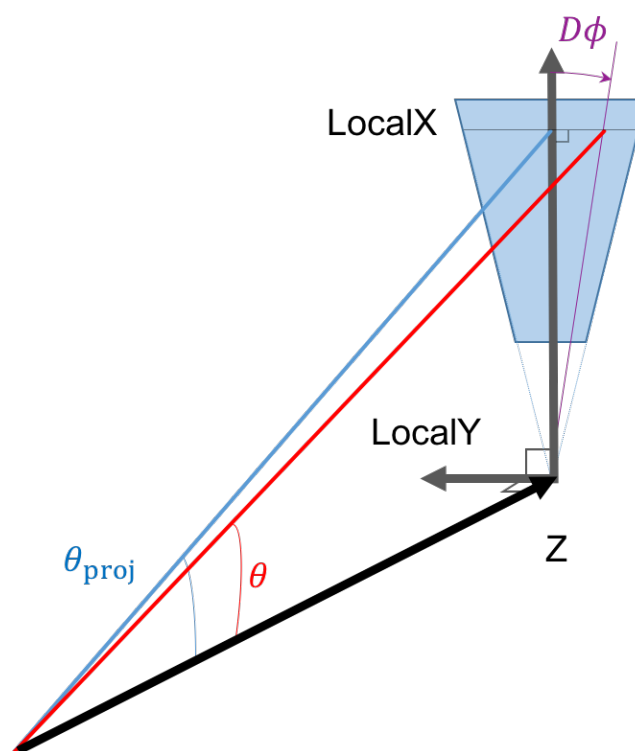


図 30 Local 座標と種々の値の定義

ように、各セクターごとの検出器を中心とした Local 座標では、検出器中央を LocalX 軸が貫いている。それと垂直に走る LocalY 軸は  $\phi$  の負方向が LocalY の正の向きに対応する。さらに、検出器中央を基準とした  $\phi$  の値を  $D\phi$  と定義しておきたい。MM のストリップは  $1.5^\circ$  の傾きを無視すれば LocalY 軸に平行に並んでおり、MM が傾きとして使う値は正確には  $R/Z$  ではなく、 $LocalX/Z$  がより正確な表現である。この傾き



LocalX/Z に対応する  $\theta$  を図のように  $\theta_{\text{proj}}$  と定義している。この時、 $\theta$  と  $\theta_{\text{proj}}$  を結ぶ関係は、

$$\tan \theta_{\text{proj}} = \tan \theta \cos D\phi \quad (5.1)$$

である。

### 5.1.1 トラック検出

1 段目のトラック検出では、各層で信号が出たストリップに対して、LocalX-Z 平面での傾き (LocalX/Z) の値を用いて、8 層のコインシデンスを取る。具体的には、アドレス ID を MM トリガープロセッサ上で傾きの値に変換し、それを傾きの値でビンに詰め、各ビンに対してのコインシデンスを取る。このビン Slope road と呼び、Slope road の幅  $h$  は FPGA 上で変更可能なパラメータである。(図 31) LocalX 方向の衝突

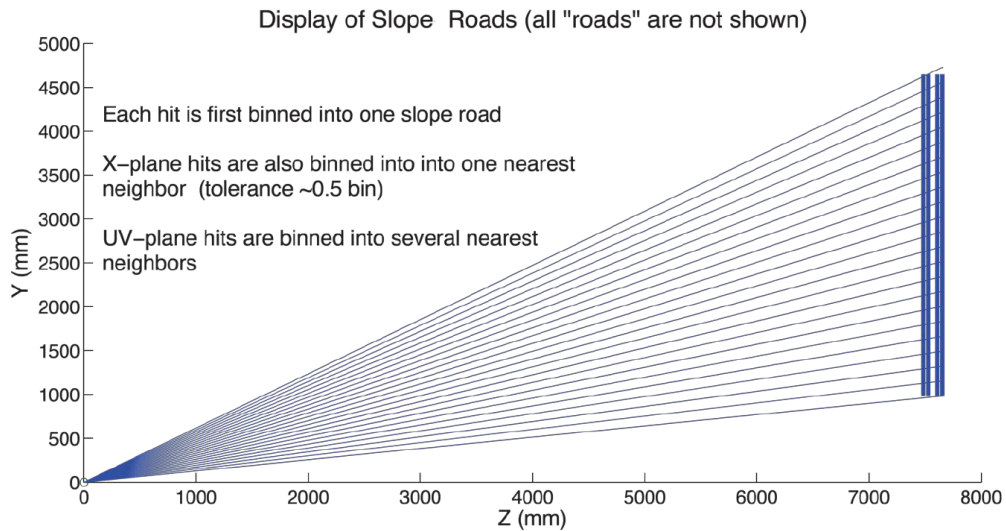


図 31 Slope road のイメージ図

位置は、MM トリガーではストリップのアドレス情報のみから出しており、ストリップのピッチのみに依存している。このことから、LocalX 方向の位置分解能は LocalX や R の値に依らず検出器一定である。 $\eta$  や天頂角  $\theta$  などの他の指標と違い、傾きの値 (LocalX/Z) に対する分解能の位置依存性は分母の Z に絞られ、 $Z = 7000 \sim 8000$  の NSW ではその影響は 15% に満たない。このことから、傾きの値を使用することで、MM 全体で同じ分解能を保ちつつ、各ストリップの天頂角方向の向きを比較することができる。また、これは、検出器の全領域で同じビン幅を使えることにも繋がり、アルゴリズムの簡略化にも役立つ。

ここで、Horizontal strip と Stereo strip では、検出器の LocalX 方向の広がりが違う (図 32)。Horizontal strip は LocalX 方向と完全に垂直に並んでいるため、LocalX における 1 つの Horizontal strip の広がりにはストリップのピッチ 0.45mm 程度である。これに対して Stereo strip は、 $\pm 1.5^\circ$  傾いて並ぶ。これによって LocalX 方向への Stereo strip の広がり、検出器の中で R の大きい最外部の横幅 2000mm 程度のところで  $2000 \times \tan 1.5^\circ = 52\text{mm}$  の広がりを持ち、この広がり Horizontal strip に比べてはるかに大きい。このため、Stereo strip に対するコインシデンスの幅は変える必要があり、別の値を設定する。Stereo strip を持つ UV layer では、検出器中央での LocalX の値を代表値として LocalX/Z を計算し、Slope road へのビンニング

を行なうとともに、コインシデンスの幅に対応した数の隣接する複数ストリップに、同じ ART 信号をビンングする。また、Horizontal strip に対しても、Slope road の境界を飛跡がまたぐような場合でも efficiency を損失しないように、ART 信号を LocalX/Z の値のビンに詰めした後、傾きの値で一番近い隣の Slope road にも同じ ART 信号を詰める。これは 0.5h のトレランス（トリガー信号を複数の Slope road へ多重にビンングすることを許すことで、トラック検出漏れを防ぐための領域）を作るのと同義である。最終的に X layer に対するコインシデンスの幅は  $h + 0.5h \times 2 = 2h$  となる。

図 33 には実際のビンングの様子を示している。図 33 の黄色のチェックがついたビンが、実際に各ストリップの LocalX/Z の値に対応したビンであり、黒いチェックがついたビンは、UV layer の広いコインシデンス幅、X layer のトレランスに対応する形で同じ値を隣接するビンにも詰めたものである。Slope road へのビニ

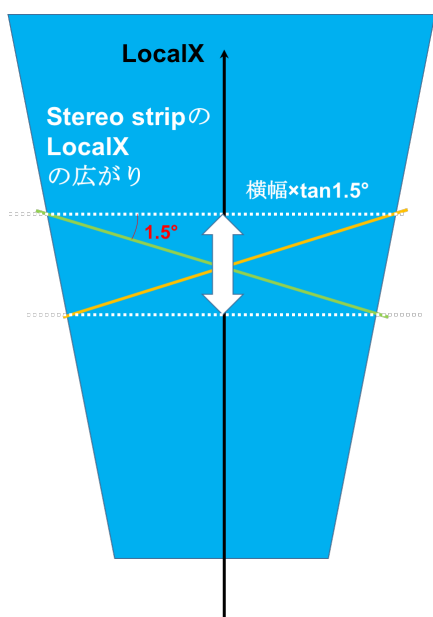


図 32 LocalX 方向の広がり:Horizontal strip は LocalX と垂直に並び、Stereo strip はそこから  $\pm 1.5^\circ$  傾いて並ぶ。この並び方の違いにより、Stereo strip の方が LocalX 方向に大きく広がりを持つ。

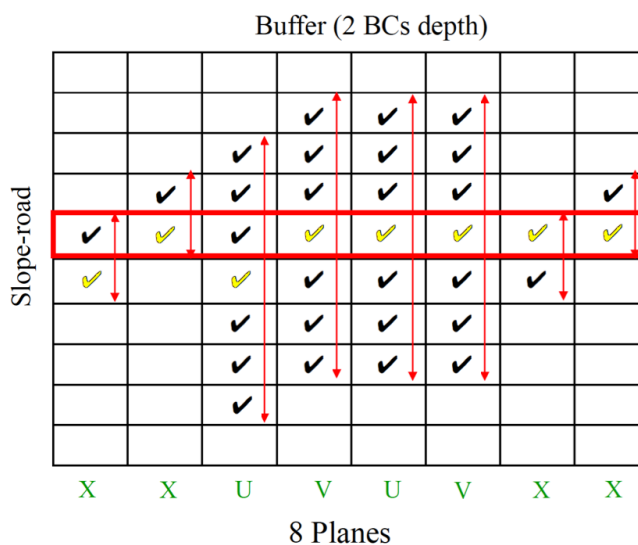


図 33 ビンングとコインシデンスの概念図:Slope road へのビンングは Horizontal Strip、Stereo Strip で同じビン幅で行われる。対してコインシデンスの際には、コインシデンス幅を別に設定する。

ングを終えると、各 Slope road において、ビン内に詰められた X, U, V layer からの各々の信号数が数えられ、これがコインシデンス閾値として設定された値を超えれば、トラック候補が検出されたと判定する。コインシデンス閾値は現在は  $nXmUV$  ( $n, m$  は整数) の条件が考えられている (3X3UV なら、X が 3 層以上かつ UV の種類を問わず UV layer が 3 層以上の意。)

### 5.1.2 物理計算と外れ値の除去

#### 物理計算 ( $\eta, \phi, \Delta\theta$ の算出) [25]

検出されたトラック候補全てに対して、BW とのコインシデンスに必要な  $\eta, \phi$ 、そして、トラック候補の選別に用いる  $\Delta\theta$  が算出され、後段の SL に送られる。3 つの物理量について再度定義をしていく。まず、 $\eta, \phi$  は、検出器に対するミューオンのヒット位置を  $(\eta, \phi)$  の角度座標で表示したものである。基本的には、トリガーセクターの 8 layer を Z 位置で見た時に、8 層あるプレーンのうち、4 層と 5 層の間、トリガーセクターの完全に中央にある仮想面を考え、その面をミューオンが通過した位置を想定している。次に、 $\Delta\theta$  は、ミューオントラック候補の向きと IP 方向との、天頂角におけるずれを表す量である。検出器ヒット位置から計算される IP 方向の角度  $\theta_{\text{global}}$  と、トラック候補の向き  $\theta_{\text{local}}$  の差を取ることで、 $\Delta\theta$  が算出される。 $\Delta\theta$  の符号は、IP より Z 軸前方にバーテックスを持つ粒子に対して正の値を取るような、 $\Delta\theta = \theta_{\text{local}} - \theta_{\text{global}}$  という定義を用いている。各パラメータの計算を具体的に説明していく。

- $\eta, \phi$  の計算

$\eta, \phi$  の計算には原則として X, U, V layer 全てを用いる。X layer の傾きの値を  $M_X$  とする。信号としてコインシデンス枠内に入った各層の X layer の傾き  $M_X$  を平均し、これを、 $M_X^{\text{global}}$  とする。

$$M_X^{\text{global}} = \frac{\sum_i (M_X)_i}{n_X} \quad (5.2)$$

ここで、X layer が 2 層以上ない場合には  $\Delta\theta$  が計算できないため、そのようなトラックは許容できない。従って、 $n_X = 2, 3, 4$  である。同様に、U, V layer についても、検出器中心での傾き (=LocalX/Z) を代表値として  $M_U, M_V$  に入れ、 $M_U^{\text{global}}, M_V^{\text{global}}$  を計算する。UV に対しては、 $n_U = 0$  または、 $n_V = 0$  という可能性もあり得る。X layer の傾きと組み合わせることにより、U, V どちらかが欠けたとしても、UV layer からの信号が 1 つでもあれば、 $\eta, \phi$  を計算することは可能だからである。これらの X, U, V に対する  $M^{\text{global}}$  を用いて、2 つの変数の組、 $(m_x, m_y)$  を計算する。これを LUT で変換することで、 $(\eta, \phi)$  を得る。

まず初めに、

$$m_y = M_X^{\text{global}} \quad (5.3)$$

というように、 $m_y$  には  $M_X^{\text{global}}$  を代入する。

さらに、 $m_x$  については、 $M_U, M_V$  両方が計算できる場合には、

$$m_x = \csc(1.5^\circ)M_U - \csc(1.5^\circ)M_V \quad (5.4)$$

$M_V$  が使えない場合は、

$$m_x = \csc(1.5^\circ)M_U - \cot(1.5^\circ)M_X \quad (5.5)$$

$M_U$  が使えない場合は、

$$m_x = \cot(1.5^\circ)M_X - \csc(1.5^\circ)M_V \quad (5.6)$$

というように計算をすすとしている。前述の通り、こうして計算した  $(m_x, m_y)$  を変換して、 $(\eta, \phi)$  とする。

- $\Delta\theta$  の計算

$\Delta\theta$  の計算には X layer のみを用いる。 $\Delta\theta$  の計算を大まかに説明すると、ヒット位置の IP からの (LocalX-Z 平面での) 傾き  $M_X^{\text{global}}$  と、トラックの X layer 情報のみを元に再構成したトラックの傾き  $M_X^{\text{local}}$  を用いて、 $\Delta\theta$  を出す。 $M_X^{\text{global}}$  は前項の式 YY と同じ値である。対して、 $M_X^{\text{local}}$  は、最小二乗法による回帰直線の計算の解析解を用いて、

$$M_X^{\text{local}} = A_k \sum_i z_i (M_X)_i + B_k \sum_i (M_X)_i \quad (5.7)$$

ただし、この  $A_k, B_k$  の添え字 k は、X layer の 1 層目, 2 層目, 3 層目, 4 層目の全層に対して可能なヒットパターン 11 個 ( $n_X = 2$  が 6 パターン、 $n_X = 3$  が 4 パターン、 $n_X = 4$  の時に 1 パターン。) をナンバリングしている。

$$A_k = \frac{n}{n \sum_i z_i^2 - (\sum_i z_i)^2}, B_k = \frac{\sum_i z_i}{n \sum_i z_i^2 - (\sum_i z_i)^2} \quad (5.8)$$

このようにして出した  $M_X^{\text{local}}$  を用いて、 $\Delta\theta$  を次に出す。ミュオン由来のトラックの  $\Delta\theta$  は、10mrad 程度の大きさに収まるため、 $\Delta\theta \sim \tan(\Delta\theta)$  の近似が成り立つ。よって、以下のように  $\Delta\theta$  が計算される。

$$\Delta\theta \sim \tan(\Delta\theta) = \frac{\tan(\theta^{\text{local}}) - \tan(\theta^{\text{global}})}{1 + \tan(\theta^{\text{local}}) \tan(\theta^{\text{global}})} \quad (5.9)$$

$$= \frac{\tan(\theta_{\text{proj}}^{\text{local}}) / \cos(D\phi) - \tan(\theta_{\text{proj}}^{\text{global}}) / \cos(D\phi)}{1 + \tan(\theta_{\text{proj}}^{\text{local}}) / \cos(D\phi) \cdot \tan(\theta_{\text{proj}}^{\text{global}}) / \cos(D\phi)} \quad (5.10)$$

$$= \frac{M_X^{\text{local}} / \cos(D\phi) - M_X^{\text{global}} / \cos(D\phi)}{1 + M_X^{\text{local}} / \cos(D\phi) \cdot M_X^{\text{global}} / \cos(D\phi)} \sim \frac{M_X^{\text{local}} - M_X^{\text{global}}}{1 + M_X^{\text{local}} M_X^{\text{global}}} \quad (5.11)$$

ここでは MM の 1 セクターの  $\phi$  方向の広がりが<sup>5</sup>、最大で  $|D\phi|=0.22\text{rad}$  であり  $\cos(D\phi) > 0.97$  であることを用いて、 $\cos(D\phi) \sim 1$  と近似している。FPGA 上の実際の計算では、まず、 $A_k, B_k, Z_i$  の値を LUT の値に入れて置いて、 $M_X^{\text{local}}$  を出す。

さらに  $\Delta\theta$  の計算では、

- 1)  $M_X^{\text{local}} - M_X^{\text{global}}$
- 2)  $M_X^{\text{local}} \cdot M_X^{\text{global}}$
- 3)  $M_X^{\text{local}} \cdot M_X^{\text{global}}$  を入力として LUT で  $1/(1 + M_X^{\text{local}} \cdot M_X^{\text{global}})$  を計算
- 4) 1) と 3) の結果を乗算

という形での計算が行われる。

## 外れ値の除去

前項の説明にあるように、Stereo strip に対するコインシデンス幅は Horizontal strip に対しての値の数倍以上大きくする必要があるのである。そのため、必然的に、コインシデンス枠内の Stereo strip 信号に、BG 等を由来とした見たいミュオン以外の信号が混入する可能性が高まる。MM トリガーボード上の現行のアルゴリズムでは、コインシデンスに入ってしまった BG 等の信号が物理計算に影響しないよう、Stereo strip からの信号が信頼できるかを判定し、有効でない信号を物理計算に用いないアルゴリズムが導入されている。現行のアルゴリズムでの外れ値除去は、UV layer に対してのみ行われる。U (V) layer からの信号が 2 つ存在してい

る時、U (V) layer の 2 つの信号の傾きを比較し、その 2 つの傾きが同じ Slope road に入っていることを要求する。ミューオンからの信号であれば、2 つの U (V) 信号は互いに近い傾きの値を示す。逆に、このカットをかけることで BG 等を由来にした信号が混入した場合に、それを計算に使わないようにできる。

- i) 「U (V) layer に 2 つ信号があり、かつ、その傾きの差が  $h$  以内」を truth/false として判定
  - ii) [A] U layer, V layer が両方 truth なら、両方を使用。 [B] U (V) layer 片方のみが truth の時には、truth の方のみを使用。 [C] U layer, V layer が両方 false の場合は別に処理する
- という形になっている。[C] の場合の処理については現時点で決まったアルゴリズムがあるわけではない。

## 5.2 トリガーアルゴリズムの評価

ここから具体的に、4 章に説明したシミュレーションを用いて、トリガーアルゴリズムの評価を行っていく。先に、トリガー前段の ASIC オプションの選択等を含めたいくつかの仮定を議論し、その上で、トリガーアルゴリズムのパフォーマンスをソフトウェア上のシミュレーションで評価した結果を述べる。

### 5.2.1 ASIC オプションの影響

3 章 1.2 節で説明したように、MM trigger processor へ送られる ART 信号 (中身はストリップのアドレス情報) は、MMFE8 (1MMFE8 に 8VMM が載っている ASIC) 4 つからの信号をまとめて、送信用光ファイバー 1 本を通して、ART Data Driver Card (ADDC) 上の ART ASIC へと送られる。ここで  $4 \times 8 = 32$ VMM からのストリップ情報を受け取り、どの VMM から信号が来ているか、さらに BCID 情報を付け加えて後段のトリガーへ送る。この 4MMFE8、合計 32VMM からのトリガー信号が、GBT リンクを通して ART ASIC から USA15 のトリガープロセッサへ送られる時には、1BC に最大 8 信号までしか送ることができない。ART ASIC には設置後に変更可能なオプションがあり、R の大きい方からヒットを 8 個選ぶか、もしくは R の小さい方から選ぶかの二択である。この 2 つの選択肢が与える影響をまず初めに評価した。BG なし、BG のパイルアップ数 80,160 の 3 種類のサンプルを用いて、最もヒットレートの高い Large Sector、R の最内側の 4MMFE8 において、4MMFE8 あたりの ART 信号数をシミュレーションした。その結果が表 2 である (1BC あたり)。パイルアップ数の増大に伴って、信号レート自体は増えるものの、Small/Large とともに

表 2 4MMFE8 あたりの信号レート

パイルアップ数	信号レート (/BC/4MMFE8)	$p(\text{hit} > 8)(\%/セクター)$
BG なし	0.37	0.034
80	0.74	0
160	1.1	0

4MMFE8 で 8 ヒットを超えるイベントはほとんど検出されなかった。BG あり・パイルアップ数 160(ヒットレートとしては Run3 相当) の場合でも、4MMFE8 における平均信号数は 1.1 となるが、8 個を超える数の ART 信号が最内側の 4MMFE8 に発生するイベントは 3758 イベント中検出されなかった。従って、このオプションは Run3 のヒットレート環境では影響をもたらさない。今回作成したサンプルではどちらのオプションが最適か判断ができないものの、今回作成した Run3 程度のヒットレートのサンプルでは影響が出ないことが分かった。

### 5.2.2 MM トリガー信号の特徴

MMのトリガー信号には大きな特徴が存在する。この項では、トリガーの性能評価の前に、その前提となるトリガー信号の特徴について説明していく。NSWは $|\eta| = 1.3 \sim 2.7$ をカバーしており、IPで生成した粒子は $8^\circ \sim 30^\circ$ の角度を持って検出器に入射する。図34のように、IP付近からの信号となるミューオンがMMを通ると、イオン化された電荷による飛跡が、Z-LocalX平面で常に一定の方向に出来る。トリガー信号は、

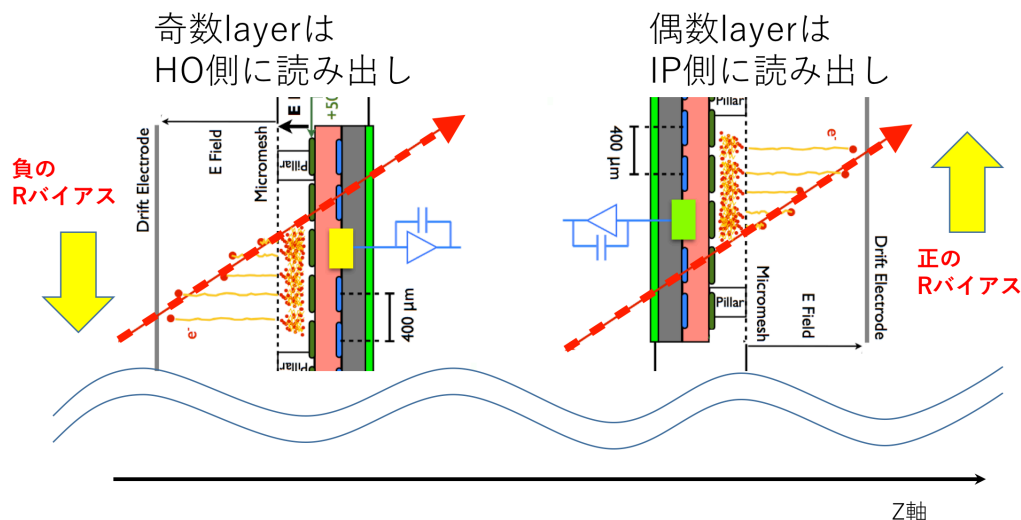


図34 R バイアスの発生：読み出し面がHO側にあるか、IP側にあるかによって、種電子の出来方にはRで一定方向のバイアスが常に生じ、ART信号にもR方向のバイアスが生じる。

1VMM=64chのストリップ中で最初に来た信号を、そのVMMの出力とする。読み出し面通過位置最近接のストリップはイオンのドリフトに時間がかからず、電荷が最も早く到達する。そのため、基本的には、荷電粒子の読み出し面通過位置に最も近いストリップがART信号のストリップアドレスとして使われる。一方で、電子のドリフトには $\sim 100\text{ns}$ 程度かかるため、トラックの存在する方向へ隣接した数ストリップにも、カソード側からドリフトしてきた電子が増幅された電荷が遅れたタイミングで入って来る。こうした隣接ストリップに生じる電圧信号が、本来VMMの信号となるべき読み出し面通過位置の最近接ストリップの信号よりも早い時には、隣接したストリップのアドレス情報がVMMのトリガー信号とされ、ミューオンの読み出し面通過位置から信号のストリップアドレスがずれてしまう。加えて、そのずれの方向は、ミューオントラックの存在する方向であるので、常にRに対して一定の方向を持つ。この傾向のことを「Rバイアス」と本研究では名付ける。IP方向側に読み出し面が存在するかどうかにより、各層のRバイアスは向きが異なる。1層目はHO側に読み出し面が存在するため、図34のようにバイアスはRの負方向になる。2層目はIP側に読み出し面があるため、バイアスはRの正方向になる。MMは磁場によるLorentz Angleの影響を相殺するために、IP方向に対する裏表を交互に繰り返す各層の検出器の設置の仕方を行う。そのため、バイアスの方向は交互に入れ替わり、奇数layerがR負方向のバイアス、偶数layerがR正方向のバイアスとなる。図35では、奇数layer(偶数layer)のトリガー信号が、シグナルのミューオンの読み出し面通過位置からどれくらいずれているかをX,U,V layerについてLocalXのずれでプロットしたものである(奇数または偶数で分けて、X,U,V layer 2層の平均を算出、さらにLarge/Small Sectorも面積比に応じて平均されている)。X layerでは、

$|dLocalX| < 10\text{mm}$  となる場合は全体の 97.6% であり、加えて、全体の 95.7% は  $|dLocalX| < 1\text{mm}$  の中に入る。これを元に、 $|dLocalX| < 1\text{mm}$  を、ミュオンヒット位置からどれくらい LocalX の値がずれているかに対する一つの基準として以降用いる。

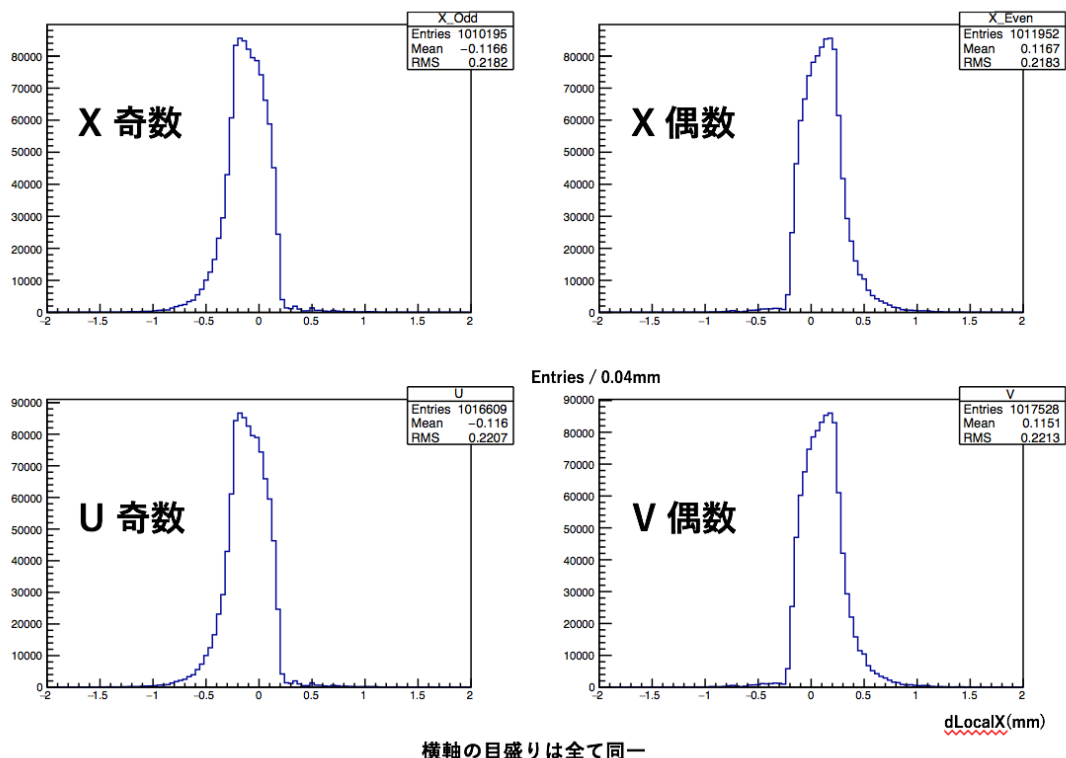


図 35 LocalX の残差分布 : LocalX の残差  $dLocalX$  をプロットしており、R バイアスによる LocalX の残差分布の偏向が分かる。X layer は 1, 7 層が負の R バイアス、2, 8 層が正の R バイアス。さらに、U layer は 3, 5 層の奇数 layer しかないため、負の R バイアスのみ。V layer は 4, 6 層で、逆に正の R バイアスのみである。全て各 2 層での平均を取っている。Large/Small Sector は面積比で平均されている。

### 5.2.3 トラック検出方法の仮定

トリガーボード上のアルゴリズム前半部分であるトラック検出では、LocalX/Z の値をビンニングしてコインシデンスを取る。(このビン Slope road と呼んでいる。) さらに、各 Slope road には、保持しておくべき Time window の深さを持ったバッファに、同じ構造のメモリが用意されており、そこに VMM ヒットを BC 別に詰めている。現行で想定している Time window は 50ns であるので、この深さ T は、 $T = 2$  (BC) であるが、変更も可能である。

ここで、実際のアルゴリズムの実装上考えるべき点は、まず、Slope road 内の違う BC のヒットに対しての選択である。Time window の幅の中で T 個のヒットからトラック候補の物理計算に使う 1 つを選ぶ必要が存在する。時間タイミングの遅い信号を選ぶと、それだけ、カソード側に近いところでイオン化された電子を種にもつ、ドリフト時間のかかる R バイアスが大きいストリップ信号を拾う可能性が高まる。VMM には設計上避けられない dead time が、動作している 160MHz で 6clock、つまり、37.5ns 存在している。1 つのト

リガー用 ART 信号が出てから固有 dead time 37.5ns の間は、VMM の不感時間が必ず生じる。50ns が想定されている Time window において、37.5ns の固有 dead time を考えると、2 番目の BC に出てくる信号は、0ns ~ 12.5ns までの早い段階で出て来た信号によって起こる 37.5ns の不感時間の後に、100ns 程度まで後続してやってくる隣接ストリップへの信号が読み取られたものか、もしくは、25ns 以降に初めて電圧が閾値を超えるような遅めにやってくるトリガー信号であるかのどちらかである。こうした場合には位置分解能が悪化するため、それを避けて、一番 BC の早いヒットを選ぶべきである。

次に問題となるのは、このビニングの際に、同じ BC の同じ Slope road に対して 2 つ以上の VMM が対応することである。VMM と VMM の境界に Slope road が当たっている時、Slope road には 2 つの ART 信号が入ってくる可能性がある。実際に、VMM の境界をミューオンが通った際には、信号は数 strip に渡って広がるため、両方の VMM から信号が出る。1 つの Slope road に対して同じ BC に 2 つの ART 信号が来ることは容易に起こり得る。また、Slope road に対する  $h/2$  のトレランス、UV layer に対する広いコインシデンス枠によって、さらにビニングの際の候補が増えるため、どの ART 信号をビンに詰め、情報として保持するかの優先順位をつける必要がある。トリガープロセッサに来自る ART 信号に存在する時間情報は BC のみであり、連続的な時間タイミングでの選択は不可能である。従って、同じ BC の VMM ヒット選択に使えるのはストリップと VMM のアドレス情報のみである。その選択には、基本的に位置関係を用いる他ない。

この前提のもと、トラック検出の際のビニング時にどちらを残すかについては、各層で R バイアスの逆方向を優先する選択方法が最適と考えられる。実際に、R バイアスの逆方向、そして順方向を優先した場合について、それぞれ 3X3UV のコインシデンス閾値を通ったトラック候補で、どちらが良いかをシミュレーションで比較した。前者を「逆バイアス選択」と名付け、対して R バイアスの順方向のヒットを優先する選択を「順バイアス選択」と名付ける。シグナルミューオンの読出し面通過位置を truth として、X layer の  $\sqrt{\chi^2/ndf}$  を LocalX において計算したものが図 36 である。バイアスの方向は層によって違うため、これらを平均するために、 $\chi^2/ndf = (\sum_X (LocalX - LocalX_{truth})^2)/n_X$  を指標とした。BG などの他の要因のないシングルミューオンサンプルにおいて、全く同じイベントセットで比較している。逆バイアス選択の場合、平均は 228 $\mu$ m、対して、順バイアス選択の場合は平均は 230 $\mu$ m となっている。また、逆バイアス選択の方がピークにイベントが集まり、順バイアスでは tail が増える。 $\sqrt{\chi^2/ndf}$  の値を比較すると、逆バイアス選択の方がより良い結果を返す。この項の上記の議論をまとめると、トラック検出の過程において、同じ BC の Slope road へのビニングの際には各層の R バイアスと逆方向のヒットを優先する逆バイアス選択を行う方が良い。加えて、コインシデンスを行なった後、その Slope road からトラック候補として使うヒットは、バッファの中の一番早い BC のものを用いるべきである。これ以降の研究では以上のやり方を仮定してトリガーのパフォーマンスを算出した。



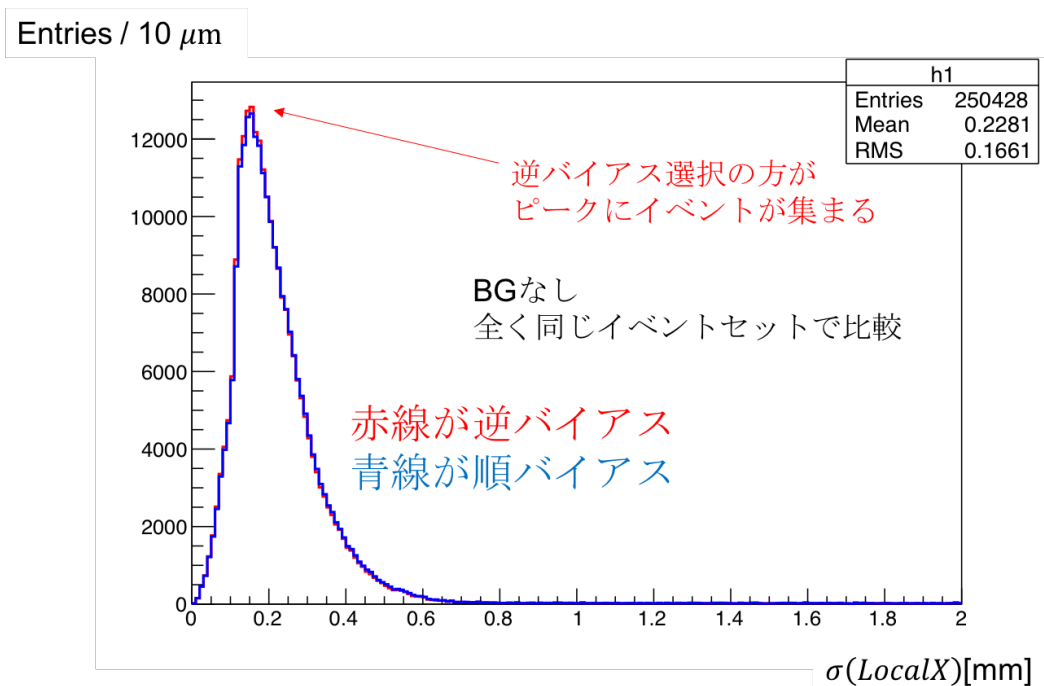


図 36 残差の二乗和平均：3X3UV 閾値のコインシデンスを通ったトラック候補に対して、X layer の残差の二乗和平均をプロットしたもの。LocalX の  $\sigma$  の分布と考えるとよい。赤線が逆バイアス、青線が順バイアス選択。逆バイアス選択の方が残差が小さくなる傾向にある。

#### 5.2.4 トラック検出効率

##### トラック検出効率が依存する要素

まず、最初に考えるべきはトラックの検出効率である。truth のシグナルミューオンの飛跡またはその一部が含まれる Slope road でトラック候補を発見できる確率を、トラック検出効率と定義する。efficiency を最優先するため、 $\Delta\theta$  に対するカットは行っていない。MM にはクオリティビットが定義できるため、トラック検出効率を落とさないために、 $\Delta\theta$  が 7~15mrad を超えるトラックにはクオリティビットを下げて送るということも可能である。LocalX/Z の値によるコインシデンスの後に  $\Delta\theta$  のカットをかけない efficiency をこの章の議論では示す。BG など同じ条件のサンプルに対して、トラック検出効率が依存する要素は以下である。

- ・ Slope road の幅  $h$
- ・ Stereo strip に対するコインシデンス幅
- ・ コインシデンス閾値 (例：3X3UV)
- ・ Time window
- ・ 検出器の位置依存性
- ・ ミューオン入射後、何 BC 後のトラックか

この最後の「ミューオン入射後、何 BC 後のトラックか」についてコメントしておく。現行の想定では、MM

トリガーで BCID を一意に決めることは行わず、トラック候補が検出された BC では常にそのトラック候補を後段の SL へ送って BW との AND を取る。従って、各 BC のトラック検出効率は独立に計算でき、0BC より後の 1BC、2BC... でトラック候補が検出されるかどうかは、正しい BCID (BCID=0) での BW におけるコインシデンスの際には影響しない情報である。(つまり、1BC のところに MM のトラック候補が出て、MM 側で 0BC のトラック候補に対して操作を行うことはないため、0BC における BW とのコインシデンスには影響しない。BCID については BW の能力のみを使用する。それによって MM 固有のレイテンシーも減らせる。) 従って、6 章での議論を除いて、トラック検出効率の評価については、常に 0BC の場合を考えていく。ここでの「0BC のトラック」は、ミューオン入射時から Time window 後 (例えば 50ns) までの間に来る ART 信号から検出されるトラック候補に対応する。上に挙げた要素の中で、Slope road の幅  $h$  に対しては、 $1.25 \times 10^{-4} \sim 6.0 \times 10^{-3}$  の中でパラメータを離散的に動かし、 $\eta, \phi, \Delta\theta$  の分解能を見ながら最適化し、もっともパフォーマンスが良くなるような  $h$  を用いた。今回用いている Slope road の値は、現行のデフォルト値となっている  $2.5 \times 10^{-4}$  よりも大きい  $7.5 \times 10^{-4}$  である。Horizontal strip に対してのコインシデンス幅はトレランスにより  $2h$  に対応しており、X layer に対するコインシデンス幅は実質 0.0015 である。本研究では、基本的に、Stereo strip に対するコインシデンス幅は、検出器のすべての場所での Stereo strip の広がりよりも少しだけ大きい  $4 \times 10^{-3}$  の値を使用した。検出器の横幅は  $3.9 \times 10^{-3}$  に相当する値まで R 最外側では広がっており、これより小さい値では検出器の中に不感領域が生じてしまうため、検出効率を犠牲にしてこの値を小さくすることは避けるべきである。また、トラック検出効率に MM 検出器のアクセプタンスの影響が入らないよう、セクター内の 2 つのモジュールの切れ目を含む  $1.5 < |\eta| < 1.7$  のシグナルミューオンに対するイベントを評価に入れていない。また、Small Sector と Large Sector が重なる部分で検出効率が高く見積もられることを防ぐため、Small/Large の両セクターが重なる  $\phi$  領域を通るシグナルミューオンも考慮に入れていない。

### トラック検出効率

まず、シグナルミューオンのみのサンプルを用いて、検出器全体を平均した基本的なトラック検出効率を評価した。主要なコインシデンス閾値と、各 time window に対しての検出効率が図 37 である。この図から、トラック検出効率の観点から 3X の閾値の場合 time window 50ns が必要になることがわかる。time window 25ns だと 2X の閾値を使う必要がある。time window 50ns では 4X4UV では  $94.93(\pm 0.04)\%$ 、4X3UV で  $96.43(\pm 0.04)$  となり、この結果から time window 50ns では 3X 以下の閾値が望ましい。さらに、time window 50ns に絞って、BG ありの環境でトラック検出効率を確認した。この結果を、主要なコインシデンス閾値に対してまとめたものが、図 38 である。BG のヒットレートが上がると、3 章で説明した VMM の dead time によって、先に VMM に入った BG 粒子が引き起こす不感時間により信号検出効率が下がる。この効果により、パイルアップ数の増加とともにトラック検出効率は下がっていくが、図 38 の結果から、3X3UV の閾値では、ヒットレートで Run3 相当の環境でも  $99.2(\pm 0.1)\%$  のトラック検出効率を保っている。これにより、BG によるトラック検出効率低下を加味しても、コインシデンスの閾値として 3X3UV までが要求できることが分かる。

### トラック検出効率の $\eta$ 依存性

さらに、トラック検出効率の位置依存性を調べるため、time window 50ns に絞って、各コインシデンス閾値に対してのトラック検出効率を  $\eta$  の関数として調べた。BG のヒットレートが上がる  $\eta$  の大きい領域では、トラック検出効率は下がっていく傾向にある。図 39 から、ヒットレートにして Run3 相当のパイルアップ

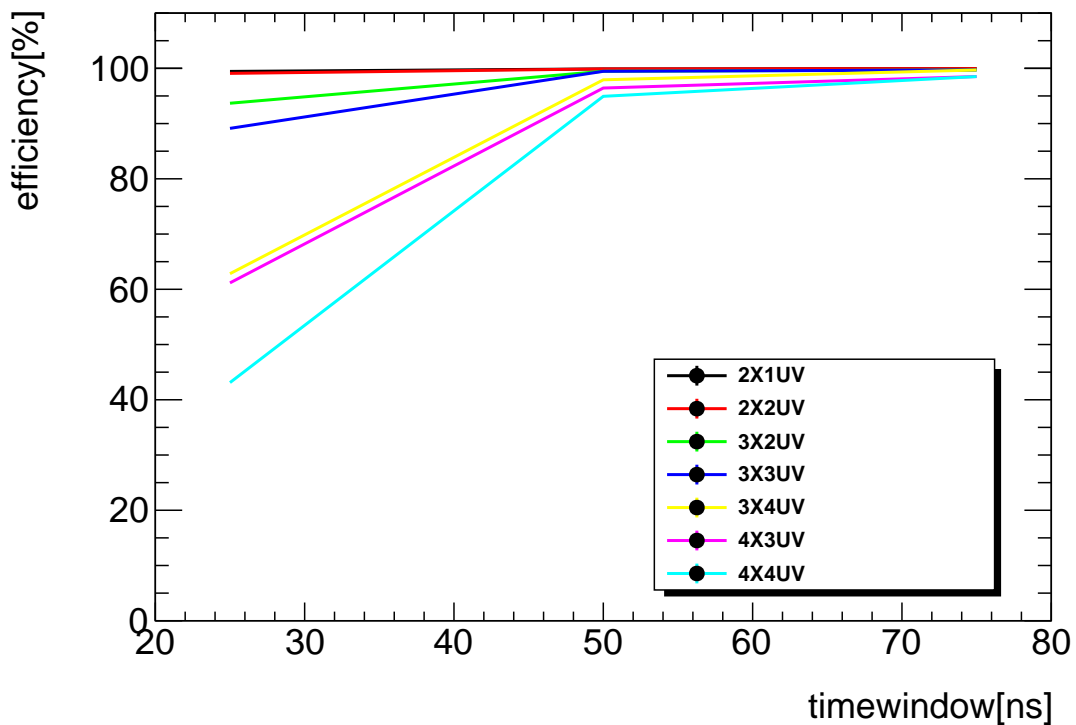


図 37 シングルミュオンでのトラック検出効率：シングルミュオンの場合におけるトラック検出効率を、主要なコインシデンス閾値と time window で出した。縦軸はトラック検出効率、横軸は time window であり、コインシデンス閾値は色で区別されている。time window 50ns において 3X3UV の閾値で 99.46(±0.01)% を保持している。

数 160 の BG サンプルでも、3X3UV 閾値で 98.5(±0.4)% の検出効率を検出器全体で保つ。グラフには書かれていないが、3X4UV の閾値を使うと、 $\eta = 2.4$  で 95.1(±0.6)% にまでトラック検出効率が下がる。また、3X4UV のように 4UV を閾値にすることは過剰な要求であり、検出器に不感領域ができた場合等のことを考えると現実的でない。3UV あれば、UV が必ず 2 種類存在することが満たせるため、3X4UV は time window 50ns では避けるべきである。これらのことから、コインシデンス閾値としては 3X3UV 以下が使用可能である。

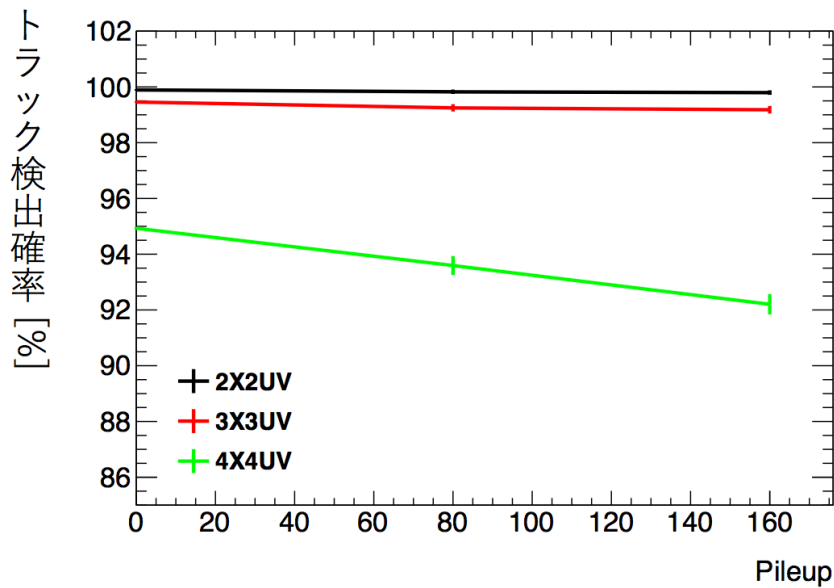


図 38 トラック検出効率に対する BG の影響 : BG ありの場合も含めたトラック検出効率を、主要なコインシデンス閾値で出した。縦軸はトラック検出効率、横軸はパイルアップ数であり、コインシデンス閾値は色で区別されている。time window は 50ns に固定。パイルアップ数 160 においても 3X3UV の閾値で 99.2(±0.1)% を保持している。

### 5.2.5 SL へのトラックレート

NSW から SL へ送信できるトラック候補はセクターあたり最大 8 つである。(検出器全体や A-side 全体、C-side 全体、Large/Small 全体ではないことに留意。) MM と sTGC のトラックで、「同じ」トラック候補と判定されたものについては、両者で検出したトラック候補が統合され、1 つのトラック候補として処理される。このことを踏まえると、MM で 8 個を超えるトラック候補があった場合、取りたいシグナルミューオンに対するトラック候補が送信されない可能性がある。これが最終的な BW とのコインシデンスの Inefficiency に繋がることから、最終的なトラック数が 9 以上になる場合がどのくらいの割合で起きるかをシミュレーションで評価した。5.2.4 MM トリガー信号の特徴、の項で説明したように、Time window としては 50ns が適切であり、Time window を 50ns に固定して、各コインシデンス閾値におけるシグナルミューオン以外(シグナルミューオンによる二次粒子も含めて)が由来の BG トラック候補数平均を図 40 に出した。セクターあたりの BG 由来のトラック候補数の平均は、パイルアップ数に応じて比例的に増加している。さらに、最も条件の厳しいパイルアップ数 160 (correlate した荷電粒子のレートとしては HL-LHC 相当) の BG サンプルで、各コインシデンス閾値に対して平均 BG 由来トラック数とトラック数が 9 以上になる確率を出し、この結果をまとめたものが表 3 である。トラック数が 9 以上になる確率の計算手順の一例として、セクターあたりのトラック候補数の分布を、パイルアップ数 160 の BG サンプルで出したものが、図 41 である。表 3、図 41 を見ると、UV のコインシデンス閾値はトラック候補数にほぼ影響しない、これは傾きによるコインシデンス幅が UV layer では広いため、シグナルミューオン由来のトラックかどうかと UV 信号の数の多さの相関が低いことによる。トラック数が 9 以上になる確率は、パイルアップ数 160 で、2X2UV 閾値の時に 2.8(±0.3)%、3X

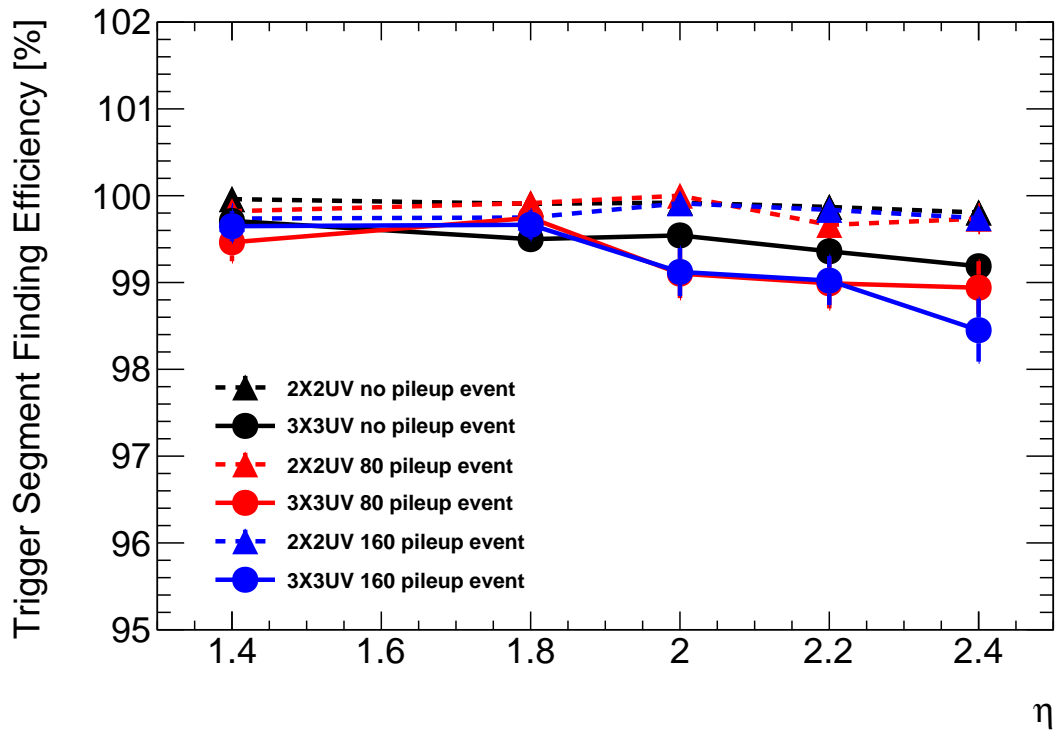


図 39 BG ありのトラック検出効率：パイルアップなし、パイルアップ数 80, 160 の BG ありのサンプルについて、トラック検出効率を  $\eta$  の関数として表示している。パイルアップ数 160 の BG あり（ヒットレートでは Run3 相当）でも 3X3UV のコインシデンス閾値で、検出器全体で 98.45( $\pm 0.4$ )% を保つ。

表 3 パイルアップ数 160 の BG サンプルにおけるトラックレート

閾値	トラックレート [/BC/セクター]	トラック数 9 以上の確率
2X1UV	2.39 ( $\pm 0.03$ )	3.3 ( $\pm 0.3$ )%
2X2UV	2.23 ( $\pm 0.02$ )	2.8 ( $\pm 0.3$ )%
3X2UV	0.63 ( $\pm 0.01$ )	0%
3X3UV	0.57 ( $\pm 0.01$ )	0%
3X4UV	0.41 ( $\pm 0.01$ )	0%
4X3UV	0.301 ( $\pm 0.009$ )	0%
4X4UV	0.236 ( $\pm 0.008$ )	0%

以上では 0% である。パイルアップ数 160 でも、3X 以上のコインシデンス閾値では影響は出ない。従って、このトラック数が 9 以上になる確率の面からは、コインシデンス閾値が 3X 以上であれば問題ない。

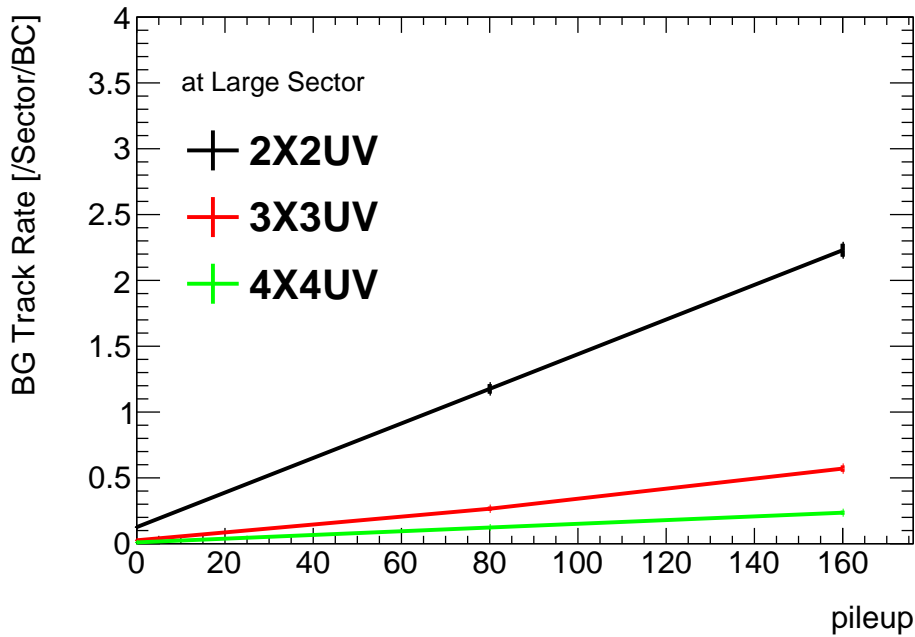


図 40 BG 由来の平均トラック数：二次粒子も含め、シグナルミューオン以外の BG を由来とするトラックが、1BC1 セクターあたり平均どの程度発生するかをプロットしている。横軸はサンプルのpileアップ数を表しており、pileアップ数の増加にほぼ比例して、BG 由来のトラックは増加する。

### 5.2.6 角度・位置分解能

上述のトラック検出効率、さらに、トラック数が9以上になる確率から、3X3UV 以下、3X 以上のコインシデンス閾値が必要とされ、efficiency の観点から、使用可能な閾値のオプションは 3X2UV, 3X3UV である。3UV を要求すれば、常に U, V layer の両方を揃えることができる。UV における外れ値除外での利益を加味して、3X3UV がより良い。以降は、閾値 3X3UV をデフォルトとして、話を進めていく。SL へ送る3つのパラメータ  $\eta, \phi, \Delta\theta$  の分解能について、time window 50ns、コインシデンス閾値 3X3UV でシミュレーション結果を出した。 $\eta, \phi, \Delta\theta$  についてそれぞれの元となるビット化前の残差分布が図 42 である。

トリガーでの物理計算における分解能の指標としてはビット化前の分解能を用いる。さらに out of requirement の割合としては、ビット化前の残差分布の青線 requirement のラインより外側 (センターのバイアスは修正される前提で計算) にあるイベント割合を用いることとした。図 42 と同じく、各閾値においてビット化前の分解能と out of requirement の割合を求め、その結果を表 4 にまとめている。この結果から、ピークの分解能は 3X3UV の場合において要求水準を満たしていることはもちろん、全体的に  $\eta, \phi$  は、0.45mm の細かいピッチによって要求水準の1桁下の精度で決まる。分解能にコインシデンス閾値による差は特に見られない。図 42 で理解すべき点として、 $\phi$  の残差分布のピークが原点からシフトしていることが挙げられる。この理由は UV layer の R バイアスが、U layer は負の R バイアス、V layer は正の R バイアスしかなく、各層の R バイアスの効果が  $\phi$  については打ち消し合わずに、積み重なるように働く。これを説明した図が図 43 である。トリガー用の出力を再現する上では、この物理計算の出力をビット化する必要がある。ま

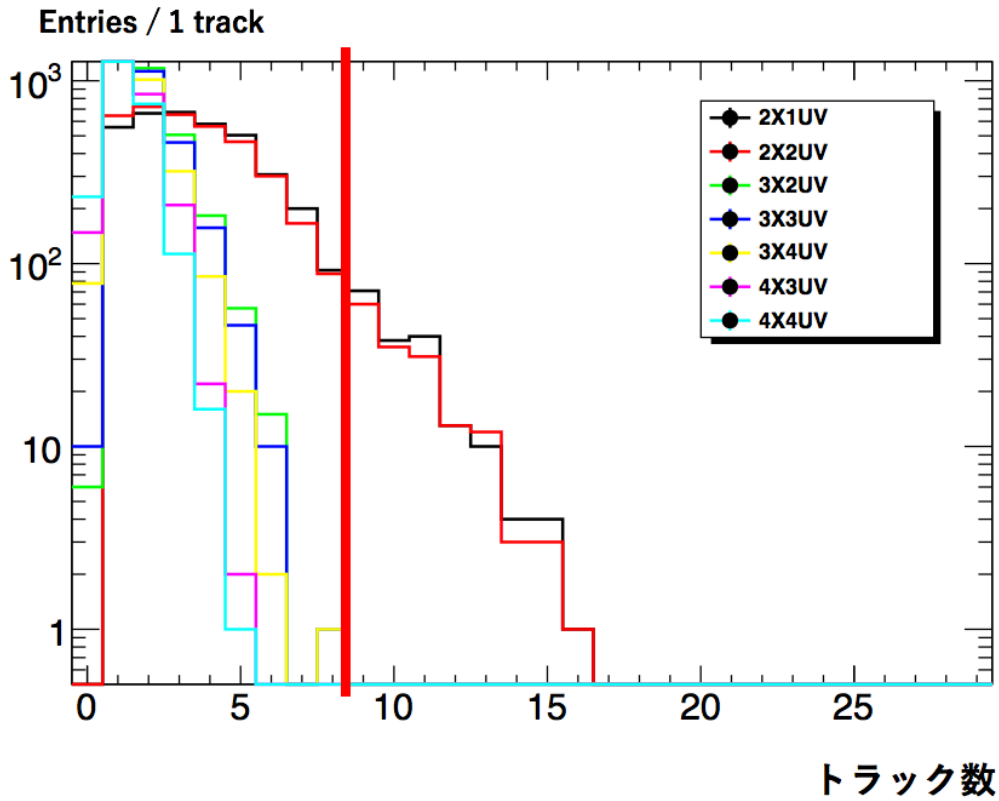


図 41 セクターあたり 1BC あたりのトラック数分布：1BC1 セクターあたりのトラック候補数の分布をプロットしている。赤線右側の、トラック候補数が 9 以上になる tail の部分が、SL におけるコインシデンスの inefficiency の原因となる。このトラック数分布はよりトラックレートの大きい Large Sector で算出している。

表 4 分解能 [mrad または  $10^{-3}$ ] と OOR (out of requirement)

	2X1UV	2X2UV	3X2UV	3X3UV	3X4UV	4X3UV	4X4UV
$\Delta\theta$	1.1(32%5)	1.1(32%)	1.1(32%)	1.1(32%)	1.1(32%)	1.1(31%)	1.1(31%)
$\eta$	0.25(1.7%)	0.25(1.7%)	0.25(1.5%)	0.25(1.5%)	0.25(1.6%)	0.25(1.1%)	0.25(1.1%)
$\phi$	1.8(3.8%)	1.8(3.8%)	1.8(3.6%)	1.8(3.6%)	1.7(3.6%)	1.7(2.8%)	1.7(2.8%)

た、 $\phi$  については残差のピークが原点に来るように、全体にシフトを行う。これらの処理を行った残差分布が図 44 である。ビット化すると、 $\eta, \phi$  ではビット幅に対応した一様分布が見える。この 2 つに対しては一様分布をガウシアンで畳み込んだ関数でフィッティングし、一様分布の幅  $d$  とガウシアン  $\sigma$  を計算している。対して、 $\Delta\theta$  は元々 0 を中心としたピークを持っており、ビット化してもその影響が小さく、通常のガウシアンに近い形になる。(この計算では  $\eta, \phi$  はそれぞれ  $1\text{bit} \cdot 0.005$ 、 $1\text{bit} \cdot 10\text{mrad}$  として単純化している。) 次に、BG ありの環境下でトリガー計算による分解能をシミュレーションした。BG のパイルアップ数に対する out of requirement の割合は表 5 にまとめられている。トラック検出が成功したイベントに対しての out of

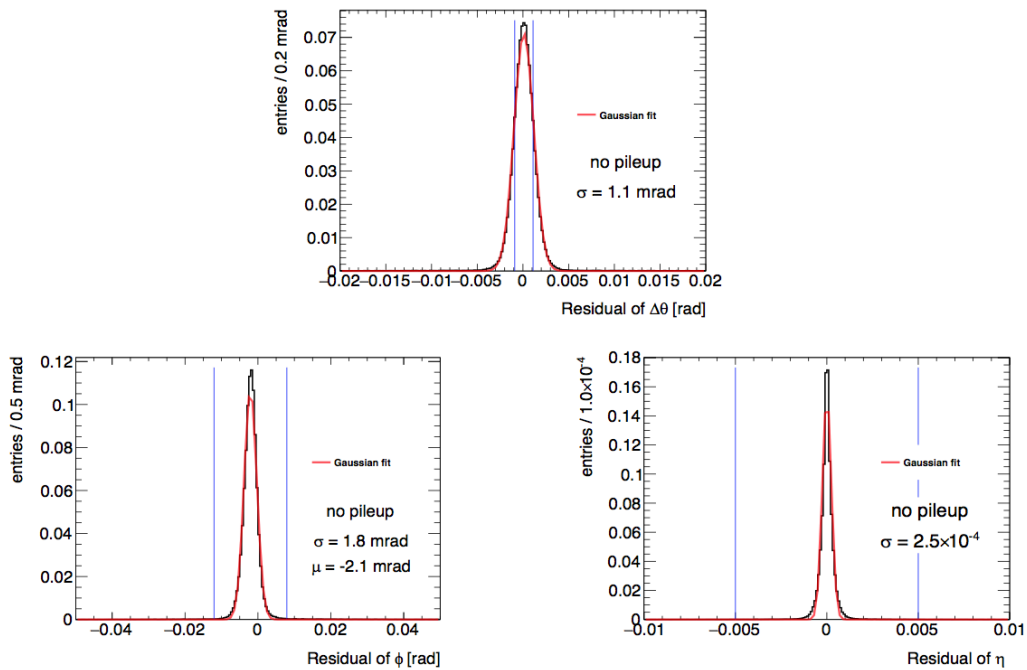


図 42 シングルミュオンにおける物理計算の残差分布： $\eta$ ,  $\phi$ ,  $\Delta\theta$  の物理計算に対する残差分布を、ビット情報化や補正前の段階でプロットしている。ピーク中心部分に対してガウシアンによるフィットを行い、その  $\sigma$  の値を分解能としている。 $\eta$ ,  $\phi$  は、0.45mm の細かいピッチによってそれぞれ  $2.5 \times 10^{-4}$ , 1.8mrad と要求水準の 1 桁下の精度で決まる。 $\Delta\theta$  の分解能も 1.1mrad で要求水準を満たす。 $\phi$  には R バイアスの影響で残差分布のピーク中心にシフトが起きる。青線で requirement を表示した。

MMの構成では、

- 3層目は +1.5度 傾き、負のRバイアス
- 4層目は -1.5度 傾き、正のRバイアス
- 5層目は +1.5度 傾き、負のRバイアス
- 6層目は -1.5度 傾き、正のRバイアス

バイアスはキャンセルされない。

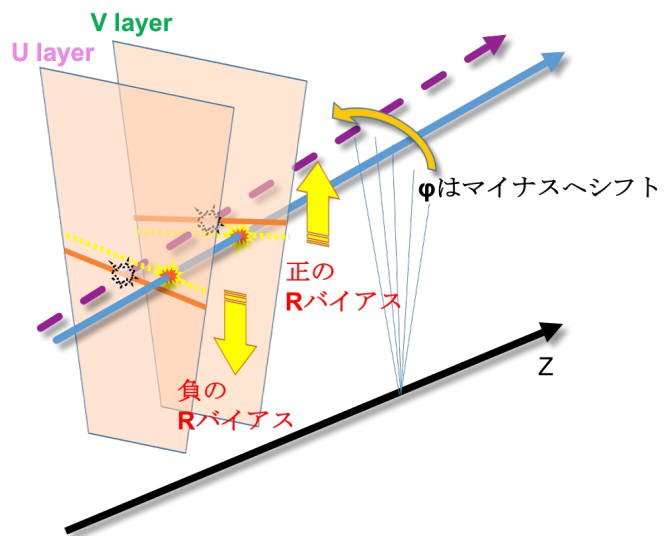


図 43  $\phi$  のバイアスの原因： $\phi$  の残差分布のピーク中心が負方向にシフトする理由は、UV layer の R バイアスにある。



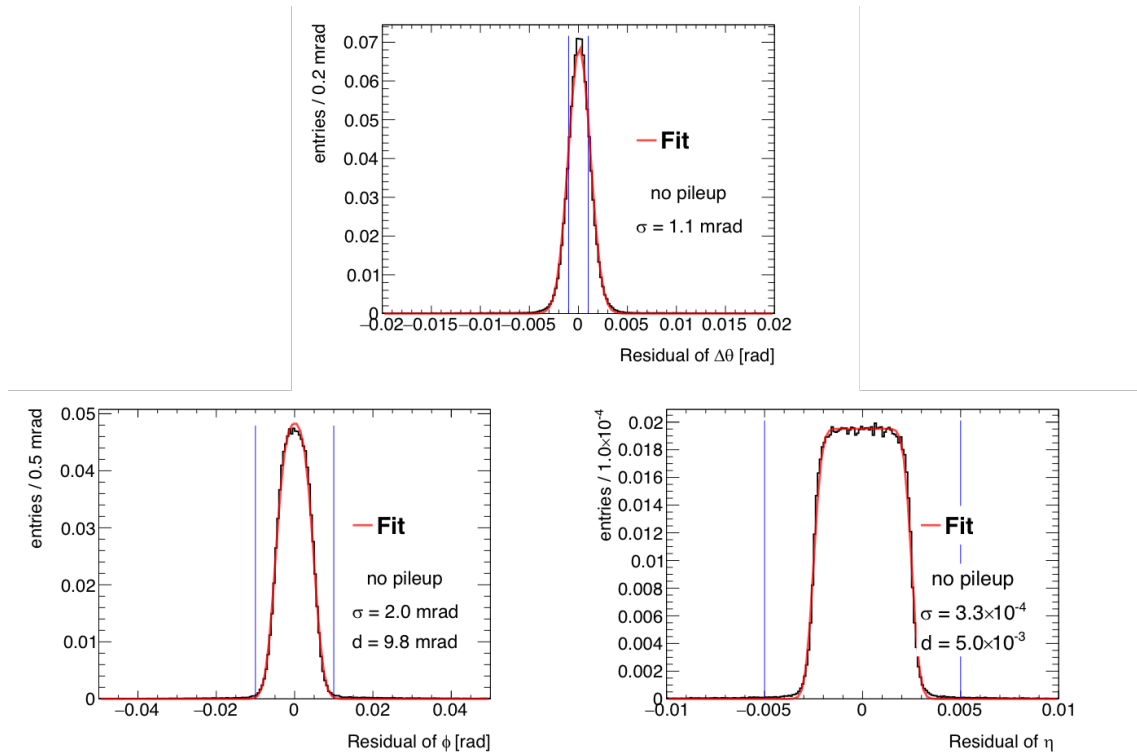


図 44 シングルミュオンにおけるトリガー出力の残差分布： $\eta, \phi, \Delta\theta$  の物理計算結果をピーク中心のセンタリングを行ってからビット化し、トリガー出力を再現した。そのトリガー出力を真の値と比較して得た残差分布である。

requirement が起こる比率をまとめている。(コインシデンス閾値は 3X3UV, time window は 50ns で固定である。) BG サンプルの増加に伴って  $\phi, \Delta\theta$  の out of requirement は増加するものの、ピークの分解能自体は大きく変動しない。表 5 にある  $\Delta\theta$  に対しての out of requirement は問題になり得る。一方で、Run3 では、現行のアルゴリズムにおいて、NSW での  $\Delta\theta$  カット以降で、SL において  $\Delta\theta$  を BW とのコインシデンスの際に用いることはしない。ただし、HL-LHC へのアップグレードと共に  $\Delta\theta$  の値は SL でのコインシデンスの際に要求されるため、これに対しての改良がいずれ必要である。HL-LHC アップグレード時には、NSW 内で MM と sTGC 独立にトラック計算を行っているところを、MM と sTGC 両方を使って最大 16 層で計算するアルゴリズムに改良することも考えられる。MM 単体における計算アルゴリズムを改良することによって  $\eta, \phi, \Delta\theta$  の out of requirement を減らすことが本研究のもう 1 つの目的であり、これに対しては 7 章で詳述する。以上に述べてきたことから、トリガーアルゴリズムの性能評価として、time window 50ns の前提で、

表 5 パイルアップ数と out of requirement

	$\eta$	$\phi$	$\Delta\theta$
no pileup	1.54%	3.60%	31.82%
80 pileup	1.9%	4.4%	32.1%
160 pileup	3.0%	5.8%	33.4%

閾値 3X3UV、3X2UV での運用が十分に可能であることを示した。

## 6 ASIC パラメータの影響

3章1節で説明しているように、MM 検出器から MM トリガープロセッサまでの主要な処理は、フロントエンドエレクトロニクスである VMM ASIC と、ADDC 上の ART ASIC で行われている。この両者の ASIC にはプログラム可能 (Programmable) なパラメータが存在しており、その中で特にトリガーの性能に関わるものについて、そのオプションの影響を調べた。

### 6.1 VMM の時定数オプションによる影響

#### 6.1.1 VMM の時定数オプション

MM 検出器のフロントエンド ASIC である VMM では、ストリップへの電荷流入とともに、シェイパーの作用による電圧信号の整形が行われる。4章1.3節に説明したように、その際シェイピングに用いる回路には電荷流入からピークまでの時定数オプションが設定されており、これは可変 (Programmable) である。時定数のオプションは 25ns, 50ns, 100ns, 200ns が存在する。特筆すべきは、この VMM のシェイピング関数はトリガー用信号と飛跡精密測定用信号で共通しており、この時定数オプションは両方に影響を与える。各時定数における VMM のシェイピング関数は図 45 に並べて表示している。それぞれ、パルス電荷に対する応答が示

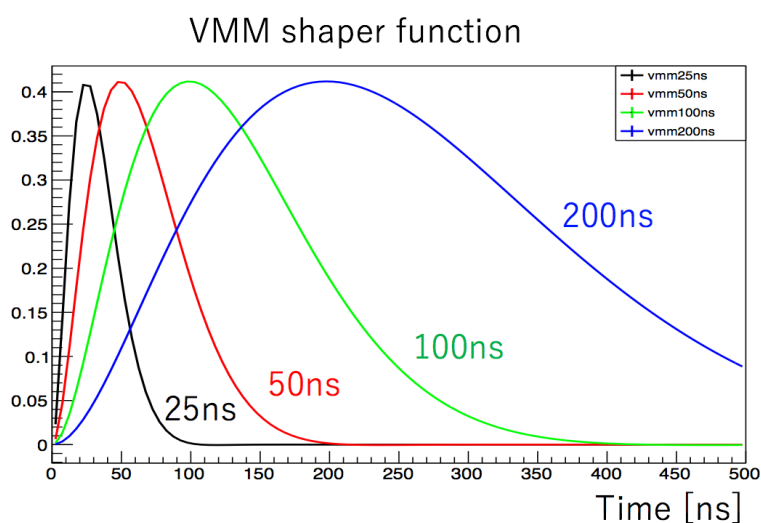


図 45 各時定数ごとの VMM シェイピング関数：実際にシミュレーションで使用している VMM 回路の流入電荷に対するの応答関数を示している。各時定数を色で分けて表示した。時定数が長くなるにつれて、立ち上がりは緩くなる。

されており、連続してやってくる電荷に対しては、これらのシェイピング関数が重ね合わさったものが実際の電圧信号となる。MM の応答では、荷電粒子通過後に ~200ns に渡って電流が生じる。(4章に詳述。) シェイピング関数の時定数が伸びると、電荷収集にかかる時間が長くなり、VMM で検出されるピーク時間の分解能

は良くなる。この恩恵を受けるのは飛跡精密測定用信号である。これに対して、時定数を増やすとシェイピング関数の立ち上がりが鈍り、同じ閾値の値で比べれば、トリガー信号のタイミングが遅くなる。こうなると各層での信号検出効率がタイミング遅れの影響で下がる。これらのことから、5章のトリガー性能評価では時定数 25ns の場合を評価していたが、一番トラック検出性能が高いと思われる 25ns から他のオプションに変更することでどの程度性能が悪化するかを焦点として、この節では VMM の時定数オプションの影響を論じる。

### 6.1.2 時定数オプションのトリガー性能への影響と結論

時定数オプションを変更し、まず、ART 信号のタイミング分布をシミュレーションした。図 46 では、25ns, 50ns, 75ns の各 Time window に対して、それぞれ時定数オプション 25ns, 50ns, 100ns, 200ns における 1 layer の信号検出効率をタイミング分布と同時に表示している。この図からも分かるように、時定

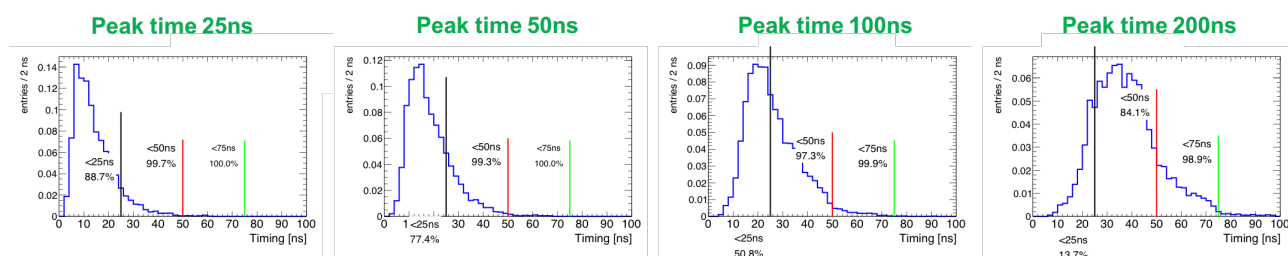


図 46 VMM シェイパーの時定数と ART 信号のタイミング分布：VMM シェイパーの時定数を 25ns, 50ns, 100ns, 200ns と変えた時の、ミューオンを由来とする ART 信号のタイミングを表示している。

数を大きくすると、同じ time window で比較した時に 1 layer あたりの信号検出効率が下がる。これはトリガー信号にとっては悪影響を及ぼす。Time window 50ns では、1 layer の信号検出効率が 25ns で 88.7%、50ns で 77.4%、100ns で 50.8%、200ns で 13.7% となる。この 1 層あたりの信号検出効率だけを見ても、200ns の時定数オプションでは Time window 50ns での運用が厳しいため、ここから先のトラック検出効率の検証では、200ns の時定数オプションに対しては、Time window 75ns も選択肢の中に入れて比較を行う。それぞれ 4 つの時定数オプションに対して、5 章と同じくトラック検出効率をシミュレーションで出した。Time window 50ns を共通にして、その結果をまとめたものが図 47 である。この図から、トラック検出効率は時定数オプションが長くなるほどに、予想通りに下がる。5 章で説明したように、コインシデンス

閾値としては 3X3UV が一つの基準であり、この 3X3UV のコインシデンス閾値に対して、パイルアップ数 160、時定数 100ns では、98.0(±0.2)% のトラック検出効率を保っている。それに対して、同じ 3X3UV で時定数 200ns では 73.9(±0.8)% となっており、この検出効率から Time window 50ns を前提とすると時定数 200ns を使うことは難しい。次に、SL へ送る 3 パラメータの分解能と out of requirement (図 48) を調べた。BG のパイルアップ数、時定数全てに渡って、ピーク部分の Fitting による分解能はほぼ変化がない。

$\eta : 2.5 \sim 3.1 \times 10^{-4}$ ,  $\phi : 1.7 \sim 2.1\text{mrad}$ ,  $\Delta\theta : 1.0 \sim 1.2\text{mrad}$  となっている。従ってパラメータの計算の大部分は変化を受けず、tail に対して影響が現れる。右図を見ると、out of requirement にトラック検出効率同様の影響が見られ、時定数 100ns までのトラックでは out of requirement が増えないが、時定数 200ns を選択すると、残差分布の tail が増え、トラック候補の質が下がることが out of requirement の値から分かる。上

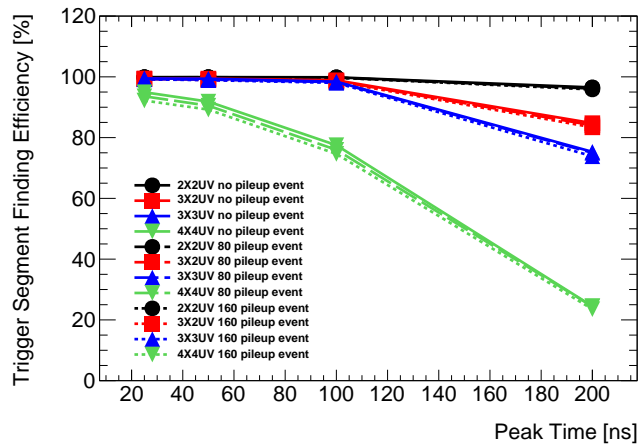


図 47 VMM シェイパーの時定数とトラック検出効率：VMM シェイパーの時定数を 25ns, 50ns, 100ns, 200ns と変えた時の、トラック検出効率を出している。

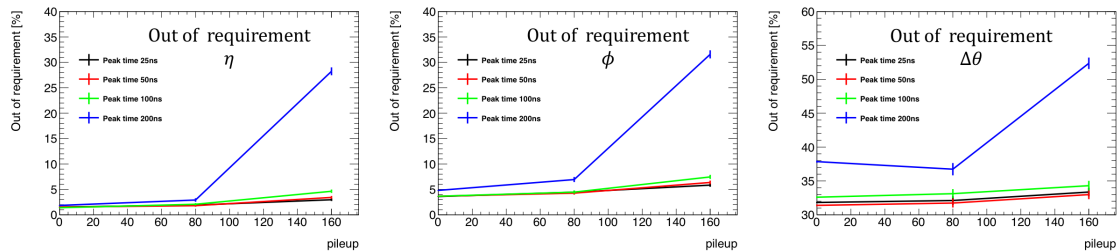


図 48 VMM シェイパーの時定数とトリガー出力の out of requirement：VMM シェイパーの時定数を 25ns, 50ns, 100ns, 200ns と変えた時の、 $\eta$ ,  $\phi$ ,  $\Delta\theta$  の out of requirement の比率を出している。

記の話は全て time window 50ns での話であり、time window 75ns に変更することにより、時定数 200ns でのトリガー性能は 3X3UV でトラック検出効率が 99.2%、out of requirement は  $\eta$  が 4.4%、 $\phi$  が 8.1%、 $\Delta\theta$  が 36.4% のように回復をする。これらは time window 50ns で他の時定数オプションを選択した時と同程度の性能に戻っている。最後にトラック数が 9 以上になる確率も BG ありのサンプルを用いて検証した。3X3UV, 4X4UV では、時定数に関わらず、トラック候補数  $\geq 8$  となるイベントは存在しなかった、トラックレートやトラック数が 9 以上になる確率については時定数オプションによる影響がほとんどなく、トラック検出効率の低下に伴い、50ns でのトラックレートは時定数 25ns の時よりも下がる。以上のことから、時定数オプションは、100ns までのオプションは time window 50ns で使用可能である。時定数 200ns のオプションは、time window 50ns では使用できない。代わりに、time window を 75ns に増やせば、使用可能である。この time window を伸ばすことは、トラック候補判定に使う BC の数が伸びることを意味し、本質的なレイテンシーが伸びることを意味する。こうした視点からは、time window 50ns を維持し、時定数オプション 25ns, 50ns, 100ns を使用することが望ましい。

## 6.2 Programmable ART dead time の変更による影響

### 6.2.1 Programmable ART dead time

ADDC 上にある ART ASIC 内には、Programmable dead time gate が存在し、本質的 (Intrinsic) な VMM の dead time 37.5ns に加えて、人工的な dead time を 25ns 刻みで加えてかけることができる。例えば、1BC 分の Programmable dead time を加えれば、全体としての VMM dead time は  $37.5 + 25 = 62.5\text{ns}$  となる。MM 検出器の信号の特徴として、ミューオン入射から  $\sim 100\text{ns}$  に渡って、増幅後の電子が読み出し面へとやってくる。これにより、シグナルとなるミューオンの入射から 4BC ( $\sim 100\text{ns}$ ) に渡ってトラックが出来る。こうしたミューオン入射の BC よりも後の BC に検出されるトラック候補をこの研究では「アフタートラック」と呼ぶ。アフタートラックの存在は BW とのコインシデンスには大きく影響を与えない。SL での BW と NSW のコインシデンスでは、最大 8 個まで NSW からトラック候補を SL に送ることができる。このセクターあたりのトラック数制限にかかることがなければ、以前に入射したミューオンからのアフタートラックと現在の BC で入射したミューオンのトラックは両方とも SL へと送られ、現在の BC で入射したトラック候補が存在しているため、コインシデンスは成功する。つまり、アフタートラックの存在はコインシデンスに対する問題とはならない。しかし、トラック検出等の工程を余分に発生させ、NSW の負荷の原因となり得る。そこで、こうした NSW トリガープロセッサへの負荷、または、アフタートラックによるトリガーリンク占有 (アフタートラックによって、9 個以上のトラック候補が検出されること) が問題となる可能性がある。その場合に、このアフタートラックを消せるよう、VMM の dead time を人工的に付け足す Programmable ART dead time が存在している。ちなみに、後者のアフタートラックによるトリガーリンク占有については、5 章での BG ありのサンプルにおいてすでに検証されており、シミュレーションの範囲で問題はない。

### 6.2.2 Programmable ART dead time オプションの使用可能性

一般に VMM dead time を長くするほど、VMM の不感時間が増え、ミューオン入射前に入った BG により信号検出効率が下がる。このため、VMM dead time は必要以上に長くしたくない。荷電粒子の入射から  $\sim 100\text{ns}$  続く各ストリップ信号に対して、合計 100ns 程度の VMM dead time があれば、十分にアフタートラックによるトラック候補数増加を抑え、処理の負荷を減らすことが可能である。今回の研究では、シミュレーション上での固有 Dead time 時間は 40ns として、Programmable ART dead time が 0ns, 25ns, 50ns つまり、全体の VMM dead time が、40(Intrinsic)ns の場合、 $40 + 25(\text{Programmable}) = 65\text{ns}$  の場合、 $40 + 50(\text{Programmable}) = 90\text{ns}$  の 3 パターンを用意し、それぞれのサンプルにおいて、シングルミューオンでアフタートラックの発生確率を調べ、図 49 に表示している。また、VMM dead time が長くなることによる信号検出効率低下の影響を調べるべく、BG ありの状態、トラック検出効率を、コインシデンスに関わるミューオン入射 BC で調べた。横軸の VMM dead time が増えると、各 BC におけるトラック検出確率が

その VMM dead time が効いている間下がることになる。VMM dead time 40ns の場合には、ミューオンが入射したタイミングで最初に 0BC のトラックが出て、その後、VMM dead time の影響により、1BC でのトラック検出確率が下がり、2BC では 40ns の VMM dead time の影響がなくなり、再びトラック検出確率が上がる。そして、以降トラック検出確率は下がり、5BC のトラック検出確率はシングルミューオンでは 0% になる。VMM dead time が 90ns あれば、この図にあるように、アフタートラックを十分に抑えることができる。さらに、BG ありのサンプルも含めた、トラック検出効率のシミュレーション結果では、トラック検出効

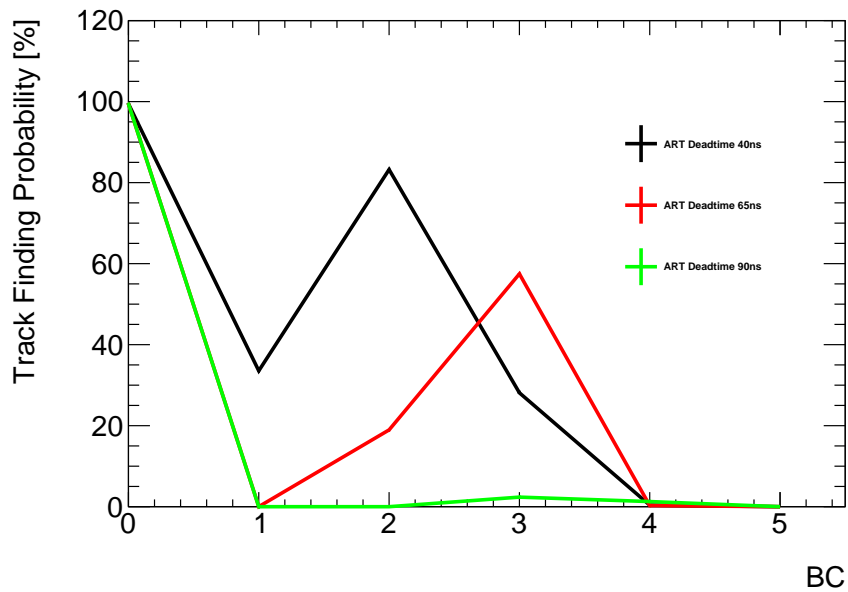


図 49 VMM dead time とアフタートラック : VMM dead time を 40ns, 65ns, 90ns と変えた時に、各 BC でどれくらいの割合でトラックが検出されるかを表示している。

率は time window 50ns, 3X3UV において、90ns の VMM dead time でも 98.0(±0.2)% であり、トラック検出効率としても問題ない。各 VMM dead time の分解能、トラック数が 9 以上になる確率には VMM dead time による大きな影響はなかった。従って、90ns の VMM dead time を使用することで、アフタートラックを抑えたうえで、トラック検出効率も保つことができるためこのオプションを使うことができる。アフタートラックの削減のために、Programmable ART dead time を使用することが可能であることを確かめられた。

## 7 トリガーアルゴリズムの改良の試み

この章では、ATLAS Run3 で使用される予定の現在のトリガーアルゴリズムの改良を行い、その結果を報告する。X layer に対するコインシデンスの幅は、傾きの値で 0.0015 であり、これは、 $Z = 7500\text{mm}$  のところで 11mm 程度である。0.45mm のストリップ数で考えると 20 ストリップ程度がスロープ枠の中に含まれている。UV layer に対するコインシデンス幅も 50mm 程度の大きさであり、その枠の中に存在するストリップ数は、100 強となる。一方で、IP から来たミュオン truth の  $\Delta\theta$  は 10mrad までしか広がらない。レバーアームが最大 200mm として、これは  $d \tan \theta = d\theta / \cos^2 \theta \sim d\theta$  より、ミュオン truth の飛跡の IP 方向からのずれを mm で換算すると、 $L \times \Delta\theta = 200 \times 0.010 = 2\text{mm}$  程度である。ART 信号の広がりとは図 34 にある通り、1mm 程度であり、ストリップ数にして 2 ストリップである。このことから、VMM での信号の広がりを織り込んでも、4mm 程度・8 ストリップが実際のミュオンからの信号の広がりとなる。つまり、ミュオンを信号源とする ART 信号のクラスタのサイズはコインシデンスの幅よりも小さく、MM のトリガー計算を改良する上で重要になることは、コインシデンスを通った後の信号に対して、外れ値除去の精度を高めることにある。この研究では UV に対する外れ値除去のアルゴリズムに着目した。 $\eta, \phi$  の計算に用いられる UV layer のコインシデンス幅は広く、外れ値の除去が必須である。すでに現行のアルゴリズムには、5 章 5.1.2 節で述べた外れ値の除去の計算が入っている。今回の研究では、これに 1 つ工程を加え、UV layer の外れ値を除去を改良することを考えた。図 50 にコンセプトをまとめている。まず、現在のアルゴリズムで

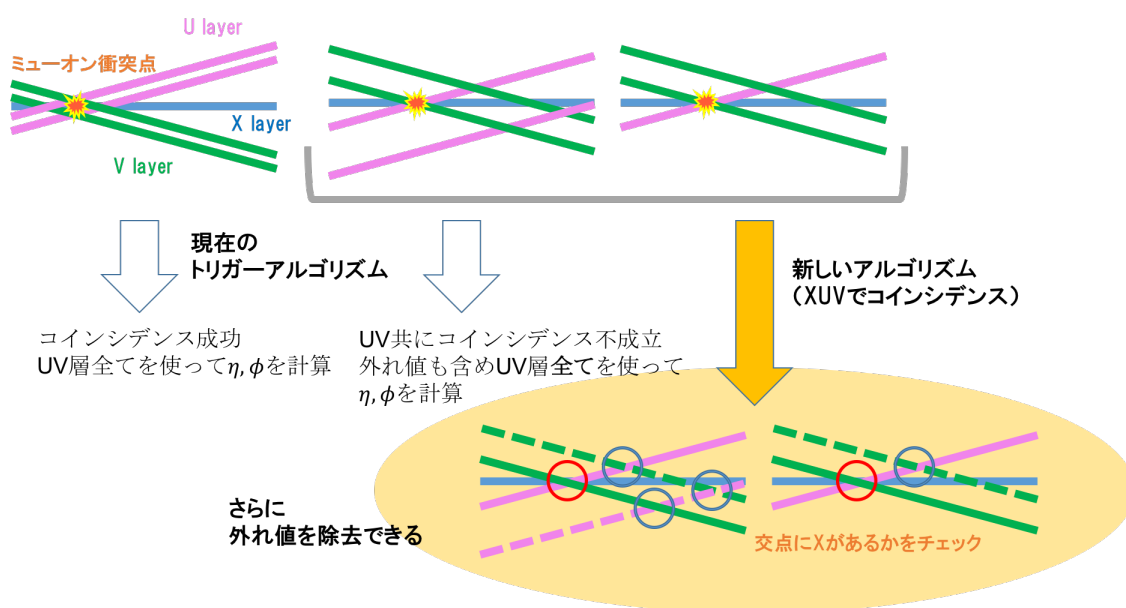


図 50 UV layer に対するアルゴリズム追加

は U layer 2 層同士、V layer 2 層同士が Slope road の幅  $h$  でコインシデンスを取っている、U が一層しかない、もしくは 2 つが離れたところにあるなどコインシデンスが取れない場合には、U (V) layer を使わないようにするが、両方ともコインシデンスが取れない時には外れ値も含めて全ての信号を使い、 $\eta, \phi$  の値を計算している。そこで、今回の研究では、こうした UV 両方でコインシデンスが取れなかった場合について、XUV



の間でコインシデンスを行い、外れ値を除去することを考えた。考えとしては、UV の交点を最大 4 つ確認し、そこに X が存在しているかを見る、というものである。図 50 の右端の例では、UV3 層のうち 1 つに外れ値が含まれている。この時、V layer の 2 ストリップは離れた場所にあるためコインシデンスを通らない。さらに U layer も 1 信号しかないためコインシデンスを通らず、結果として UV 全ての 3 ストリップが使われ、外れ値が計算の中に混入してしまう。新しいアルゴリズムでは、こうした両方ともにコインシデンスができなかった場合に、UV の交点をチェックする。右端の例では X が交点と重なる場所に存在しているものは 1 つだけであるので、外れ値を除外して正しいストリップを選ぶことができる。アルゴリズム実装上では、この UV の「交点をチェック」する動作を単純な計算で行うことができる。交点の位置での傾き LocalX/Z の値は図 51 に示すように、 $(M_U + M_V)/2$  で計算ができる。足し算と 1bit 分の割り算をし、これと  $\Delta\theta$  の算出のために計算された  $M_X$  の値と比較を取ること、このコインシデンスは実装できる。全ての交点で XUV

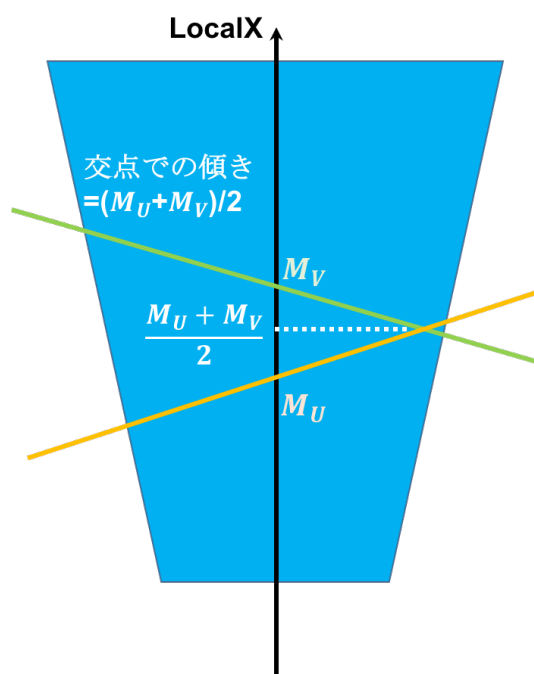


図 51 UV ストリップの交点を持つ傾きの値

の間のコインシデンスが取れない時には、UV のストリップ全てをそのまま使うという形にする。最大 4 個ある交点に対して、コインシデンスを通る交点が 2 個以上ある場合が問題になるが、今回のシミュレーション上では、より  $|(M_U + M_V)/2 - M_X|$  の小さい X layer のストリップに近い方を選べるという理想的な仮定にしておき、最大どの程度外れ値の削減能力があるかを実際のシミュレーションで確認した。シングルミュオンではその影響が見えにくい。パイルアップ 160 のサンプルに対して同じイベントセットで out of requirement の値を比べたものが 6 である。(time window 50ns, 閾値 3X3UV で合わせている。) UV layer に対するアルゴリズムであるため、 $\Delta\theta$  に対しての影響はない。 $\eta, \phi$  についての out of requirement の値は下がっている傾向は見えるが、out of requirement の誤差は両者ともに  $\eta$  では 0.2%、 $\phi$  では 0.3% であるので有意な違いが見えるとは言えない。従ってこのやり方では改善は見られなかった。

表 6 新アルゴリズムによるトリガーの結果

	新アルゴリズム	現行のアルゴリズム
$\Delta\theta$	1.1(OOR33%)	1.1(OOR33%)
$\eta$	0.25(OOR2.9%)	0.25(OOR3.0%)
$\phi$	1.8(OOR5.4%)	1.8(OOR5.8%)

## 8 結論

本研究では LHC-ATLAS 実験の Run3 さらに HL-LHC 計画に向けた Phase1 upgrade において導入されるマイクロメガス検出器について、そのトリガー用ミューオン検出器としての性能を評価し、さらに、現行のトリガーアルゴリズムに対する改善を試みた。具体的には、ATLAS の公式に提供するワークフレームを用いて開発された検出器シミュレーションと、著者が独自に開発したトリガーアルゴリズムのソフトウェアシミュレーションをもとに、ATLAS Run-3 の運転で現行実装予定のアルゴリズムに対してのソフトウェアシミュレーションを行った。そして、マイクロメガストリガーのトラック検出効率及び、角度・位置分解能、並びにトラックレートをシミュレーションで評価した。その結果、現行実装予定のトリガーアルゴリズムにおいて、Run3 でのバックグラウンド環境下でマイクロメガス検出器が要求を満たすパフォーマンスが可能であることを示した。さらに、各種の電子学のパラメータを変えた場合についても同様の検証を行い、フロントエンド電子学において 100ns までの時定数を使用可能であること、さらに、トリガー前段の電子学に存在する人工 dead time を用いて、マイクロメガスから連続的に出る後続のトラックを抑えるオプションが使用可能であることを示した。

## 謝辞

本論文の執筆にあたり、お世話になった皆様に心から感謝を申し上げます。また、論文としてここにまとめた内容を研究するに際し、多くの協力を頂いた方々に深く御礼を申し上げます。

最初に、修士入学前からお世話になりました、指導教官の川本辰男准教授には、ミューオンに関わる全般的な物理の理解、研究の仕方、さらに統計の扱い方、など、様々なことを教えて頂きました。どのような状況でも常に暖かく見守ってくださった川本先生なくしては、研究をやり遂げることはできなかったと思います。この場を借りて二年間の御礼を申し上げます。

そして、様々に指導していただきました ICEPP の教授陣の方々にも、御礼を述べたいと思います。石野雅也教授には、物理の物の見方、ATLAS のシステムに対する理解、そして解析の仕方、問題の対処の仕方など、本当に多くのことを教えていただきました。的確で本質をついたご指導に深く感謝いたします。増淵達也助教には、CERN での生活から、マイクロメガス検出器の扱い方、さらに抵抗測定のやり方について、また、実際のプログラムのデバッグなど、あらゆるところでお世話になりました。深く感謝申し上げます。片岡洋介特任助教には、マイクロメガスの検出器シミュレーションのデバッグや、フォイル検査について大変お世話になりました。深く感謝いたします。奥村恭幸助教には、シミュレーション手法、トリガーシステムについて、さらに、検出器全般の知識について、深いご指導を頂きました。心より感謝を申し上げます。

最後に、齋藤智之特任助教には、研究の基本となる検出器シミュレーションの開発や知識、そして、トリガーシミュレーションの開発など、この研究全てにわたって監督いただき、多大なご指導を賜りました。この研究は齋藤特任助教のお力添えなくしては成り立たなかったことと考えます。CERN での生活でも支えていただき、研究への熱意の面でも多大なアドバイスを頂きました。この場を借りまして、厚く御礼を申し上げます。大変お世話になりました。

さらに、研究室の先輩であります小林愛音氏、加藤千曲氏、山崎友寛氏、山谷昌大氏、木村光太郎氏にも、いただいたご助力に感謝を申し上げます。特に、山崎友寛氏には、マイクロメガス検出器の実機の動かし方から解析の仕方まで、一から全てのことを教えて頂きました。忍耐強く指導いただきましたことに感謝を申し上げます。また、山谷昌大氏にも、フォイルの検査、そして論文の執筆にあたって多くのご支援をいただきました。感謝申し上げます。

ICEPP の他の先生方にも折に触れてご指導を頂きまして感謝を申し上げます。また、プログラミングや研究についてだけではなく、CERN での生活など全般について多くのことを教えて頂きました、ICEPP のマイクロメガスグループ以外の先輩の方々にも感謝してやみません。そして、修士入学前からゼミなどで共に頑張ってきた同期の皆にも心より御礼を申し上げます。そして、時に、足りない点を補いサポートしてくれた ICEPP の後輩の皆にも、心より感謝を申し上げます。

そして、つつがない学生生活を送る上で、常にフォローしてくださっていた事務の方々、教務の方々にも深く感謝いたしております。特に、ICEPP 事務の塩田雅子氏、山浦華世氏、竹本葉子氏、加瀬由美氏、原田靖子氏、長山明日香氏をはじめとした皆様に、2 年間のサポートに感謝を申し上げます。

また、神戸大にフォイル検査の出張中にお世話になりました、神戸大の越智敦彦准教授をはじめ、越智研究室の皆様、ならびに、フォイル検査に尽力を頂いた神戸大の学生の皆様に改めて感謝を申し上げます。

最後に、この論文を書くにあたり、影に日向に支えていただいた両親と家族に感謝を述べ、謝辞といたします。

## 参考文献

- [1] Lyndon Evans, Philip Bryan, LHC machine, JINST 3 (2008) S08001
- [2] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResultsRun2>
- [3] [https://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/components/magnets/types\\_of\\_magnets.htm](https://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/components/magnets/types_of_magnets.htm)
- [4] <https://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/components/magnets.htm>
- [5] ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, JINST 3 (2008) S08003.
- [6] ATLAS Collaboration, “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC” Physics Letter B, Volume 716, Issue 1, 17 September 2012, Pages 1-29
- [7] Studies of the performance of the ATLAS detector using cosmic-ray muons - ATLAS Collaboration (Aad, G. et al.) Eur.Phys.J. C71 (2011) 1593 arXiv:1011.6665
- [8] ATLAS Muon Spectrometer: Technical Design Report. Technical Design Report ATLAS. CERN, Geneva, 1997. CERN/LHCC/97-22.
- [9] Technical Design Report New Small Wheel, ATLAS Collaboration
- [10] ATLAS TDAQ System Phase-I Upgrade Technical Design Report, ATLAS Collaboration, 2013
- [11] Rossi, L. and Bruning, O., High Luminosity Large Hadron Collider A description for the European Strategy Preparatory Group, Tech. Rep. CERN-ATS-2012-236, CERN, Geneva, Aug, 2012.
- [12] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/L1MuonTriggerPublicResults>
- [13] <https://indico.cern.ch/event/446382/attachments/1154295/1694120/vmm-spec-v4.pdf>
- [14] P. Gkoutoumis, 2017, JINST 12 C01088
- [15] <https://cds.cern.ch/record/1091474>
- [16] 日本物理学会『物理データ辞典』朝倉書店 (2006)
- [17] J.P. Guillaud, A.E. Sobol. Simulation of diffractive and non-diffractive processes at the LHC energy with the PYTHIA and PHOJET MC event generators. 2004, pp.1-20.
- [18] <https://cds.cern.ch/record/2131686/files/ATL-COM-MUON-2016-006.pdf>
- [19] Quantum Field Theory, M. Srednicki, 2006.
- [20] CERN Document Server / Photos <http://cds.cern.ch/collection/Photos>.
- [21] The ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2015-009.
- [22] ATLAS Collaboration. ” The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider” .2008 JINST 3 S08003.
- [23] HL-LHC: High Luminosity Large Hadron Collider, <http://hilumilhc.web.cern.ch/about/hl-lhc-project>
- [24] MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments, 1996 · Y. Giomataris
- [25] Brian Clark, David Lopez Mateos, Nathan Felton, John Huth, John Olivera : An Algorithm for Micromegas Segment Reconstruction in the Level-1 Trigger of the New Small Wheel