

修士学位論文  
LHC-ATLAS 実験 Run3 に向けた機械学習  
を用いた消失飛跡用トリガーの開発  
(Development of the disappearing-track trigger with  
machine learning for the LHC-ATLAS Run3)

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻  
澤田研究室 小林祐也

2022 年 1 月 28 日

## 概要

LHC-ATLAS 実験は LHC 加速器を利用した高エネルギー実験であり、ヒッグス粒子の発見など多くの功績を残している。しかし標準模型では説明できない多くの未解決の問題が残っており、LHC では現在も標準模型を超える物理の探索が行われている。超対称性粒子や暗黒物質の探索もその1つである。

超対称性理論は多くの未解決の問題を解決すると期待されている。多くの模型が考えられる中で、ウィーノを最軽量の超対称性粒子 (LSP) とする AMSB 模型は過去の実験で得たパラメータの制約を満たし、LSP が暗黒物質の場合はその残存密度から得られる質量の上限は LHC で発見が期待される領域にあるため有力な模型といえる。AMSB 模型において生成されたチャージーノは長寿命であるため検出器内で崩壊する消失飛跡となる。したがってこの消失飛跡の探索が、超対称性粒子の発見に有効となる。

2022 年から新たに LHC で始まる Run 3 に向けて ATLAS の検出器やトリガーなどで様々なアップデートが行われていて、過去の実験では捉えられなかった様々な事象が探索できるようになる。本研究では Run 3 に向けて新たに導入する消失飛跡用の後段トリガーを開発した。消失飛跡は非常に短いため、トリガーでの再構成に際して多くの偽の飛跡を作ってしまう。消失飛跡トリガーは消失飛跡に対する感度が必要であると同時にそれ以外の飛跡を高い精度で除去しなければいけないため効率的な選別が必要となる。

消失飛跡トリガーは、トリガーでの飛跡再構成を行う際に飛跡が短いために再構成に失敗してしまったものも取得することで高い信号効率を保持し、その影響で増加した偽の飛跡を効率的に除去するために機械学習による選別を導入した。その結果として、ATLAS の各後段トリガーに与えられているトリガーレートの要請を満たし、かつ従来の消失飛跡解析で用いられていた後段トリガーよりも消失飛跡のモンテカルロサンプルに対して高い信号効率を出すことに成功した。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	素粒子と標準模型 . . . . .	1
1.2	超対称性理論 . . . . .	3
1.3	AMSB 模型 . . . . .	5
1.4	消失飛跡 . . . . .	5
<b>第 2 章</b>	<b>LHC-ATLAS 実験</b>	<b>10</b>
2.1	LHC 加速器 . . . . .	10
2.2	ATLAS 検出器 . . . . .	11
<b>第 3 章</b>	<b>物理オブジェクトの定義</b>	<b>20</b>
3.1	飛跡 . . . . .	20
3.2	消失横運動量 ( $E_T^{miss}$ ) . . . . .	21
<b>第 4 章</b>	<b>消失飛跡トリガーによる飛跡の再構成アルゴリズム</b>	<b>22</b>
4.1	スペースポイントの構成 . . . . .	23
4.2	トリプレットシードの構成 . . . . .	23
4.3	パターン認識 . . . . .	23
4.4	飛跡の延長 . . . . .	23
4.5	クリーニングカット . . . . .	24
4.6	クローン除去 . . . . .	24
4.7	飛跡のフィッティング . . . . .	25
4.8	SCT ヒットを除いた再フィッティング . . . . .	25
<b>第 5 章</b>	<b>消失飛跡トリガーによる信号と背景事象の選別</b>	<b>27</b>
5.1	プリセクション . . . . .	27

5.2	機械学習を用いた選別 . . . . .	28
<b>第 6 章</b>	<b>モンテカルロサンプルとデータサンプル</b>	<b>31</b>
6.1	学習と評価に用いたサンプル . . . . .	31
<b>第 7 章</b>	<b>消失飛跡トリガーによる選別と性能評価</b>	<b>33</b>
7.1	BDT 選別に用いる入力変数の最適化 . . . . .	34
7.2	トリガーレートと信号効率の評価 . . . . .	40
7.3	物理解析への影響 . . . . .	44
<b>第 8 章</b>	<b>結論と今後の展望</b>	<b>45</b>
8.1	結論 . . . . .	45
8.2	今後の展望 . . . . .	46
	<b>参考文献</b>	<b>48</b>
<b>付録 A</b>	<b>BDT の入力変数と各カテゴリ信号効率</b>	<b>50</b>
<b>付録 B</b>	<b>BDT 入力変数一覧</b>	<b>51</b>
B.1	pix4lsct0 . . . . .	51
B.2	pix4lsct1+ . . . . .	52
B.3	pix3lsct0 . . . . .	53
B.4	pix3lsct1+ . . . . .	54

# 目次

1.1	標準模型の粒子と対応する超対称性粒子 [1] . . . . .	3
1.2	ゲージ結合定数のエネルギー依存性 . . . . .	4
1.3	LSP の残存密度と質量 . . . . .	5
1.5	ニュートラリーノの質量と $\Delta m = m_{\tilde{\chi}_1^\pm} - m_{\tilde{\chi}_1^0}$ の関係 [5]. . . . .	6
1.4	陽子陽子衝突によるチャージーノ $\tilde{\chi}_1^\pm$ とニュートラリーノ $\tilde{\chi}_1^0$ の生成 [4]	7
1.6	長寿命チャージーノ $\tilde{\chi}_1^\pm$ が生成された時のシミュレーション . . . . .	7
1.7	チャージーノの寿命・質量に対する棄却領域 [4] . . . . .	8
2.1	LHC の Run スケジュール [7] . . . . .	11
2.2	ATLAS 検出器の概観 [8] . . . . .	12
2.3	ATLAS 検出器における磁石の配置 . . . . .	13
2.4	(a) 内部飛跡検出器内の位置 $z$ における磁場の大きさ。(b)MDT 内の $ \eta $ における磁場の積分値の分布 [8]. . . . .	14
2.5	内部飛跡検出器の概観 [9] . . . . .	14
2.6	内部飛跡検出器の概要 . . . . .	15
2.7	カロリメータの概要 [8] . . . . .	16
2.8	ATLAS ミューオン検出器の概観 [8] . . . . .	17
2.9	Run 3 でのトリガーシステムの概要 [11] . . . . .	18
2.10	Run 2 での HLT 全体の平均レート . . . . .	19
4.1	消失飛跡トリガーのフロー . . . . .	22
5.1	決定木の概略図 [13] . . . . .	28
7.1	各カテゴリにおける信号 (signal) と背景事象 (background) の分布 . . .	33
7.2	pix4lsct1+ の $p_T$ と refit $p_T$ . . . . .	34

7.3	pix3lsct1+ の $z_0$ と $d_0$ . . . . .	35
7.4	pix4lsct0 の $\chi^2/\text{ndof}$ と $\chi^2/\text{ndof}$ pix . . . . .	35
7.5	pix4lsct1+ のピクセルヒットの個数と SCT ヒットの個数 . . . . .	36
7.6	pix4lsct1+ のアイソレーションの分布 . . . . .	37
7.7	pix4lsct1+ のフェイルトラック、サクセストラックの分布 . . . . .	37
7.8	pix4lsct1+ の ROC 曲線 . . . . .	38
7.9	各カテゴリにおける BDT 選別による信号効率と背景事象効率 . . . . .	41
7.10	前段トリガーと後段トリガーのレート . . . . .	42
7.11	各カテゴリのトリガーレート . . . . .	42
7.12	各トリガーにおける信号効率 . . . . .	43
7.13	消失飛跡トリガーにおける信号効率と使用したチャージノ MC の質量 依存性 (91 GeV–1000 GeV) . . . . .	43
7.14	$E_T^{miss} > 110\text{GeV}$ トリガーと消失飛跡 (DisTrk) トリガーの信号効率の $E_T^{miss}$ 依存性 . . . . .	44
B.1	pix4lsct0 に使用している変数一覧 . . . . .	52
B.2	pix4lsct1+ に使用している変数一覧 . . . . .	53
B.3	pix3lsct0 に使用している変数一覧 . . . . .	54
B.4	pix3lsct1+ に使用している変数一覧 . . . . .	55

# 表目次

2.1	LHC のパラメータ . . . . .	11
4.1	クリーニングカット . . . . .	24
5.1	カテゴリ分けの詳細 . . . . .	30
7.1	BDT のハイパーパラメータ . . . . .	38
7.2	各カテゴリで BDT に使用した変数 . . . . .	39
7.3	各カテゴリにおける BDT ワーキングポイントと信号効率、背景事象効率	40
A.1	入力変数と信号効率 . . . . .	50

# 第 1 章

## 序論

本章では、本研究の動機となる標準模型とそれを超える物理、特に超対称性理論、及び AMSB 模型における最軽量の超対称性粒子が作る消失飛跡について述べる。

### 1.1 素粒子と標準模型

素粒子とは物質を構成する最小単位であり、その反応や相互作用を記述する理論を標準模型と呼ぶ。素粒子に働く相互作用は、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用、重力相互作用の 4 種類があると考えられ、標準模型では重力以外の 3 種類の相互作用について定式化されている。中でも電磁相互作用と弱い相互作用は電弱統一理論によってまとめられていて、強い相互作用はまだ統一されていないが量子色力学によって記述されている。標準模型で記述される素粒子には、物質を構成するクォークとレプトン各 6 種類、計 12 種類のフェルミオンと、力を媒介する 4 種類のゲージボゾン、1 種類のヒッグス粒子があり、ATLAS 実験を始めとした様々な実験によって標準模型が多くの実験結果と矛盾しないことが分かっている。

#### 1.1.1 標準模型の問題点とそれを超える物理

しかし標準模型にはいくつかの未解決の問題があり、それらの解決のために標準理論の枠を超えた物理が必要となる。LHC-ATLAS 実験ではこうした標準理論を越えた物理の探索が目標の 1 つとなる。以下ではその代表例を示す。

## 暗黒物質

宇宙空間に存在する物質とエネルギーの中で標準模型で記述可能なものは僅か 5% 程度である。宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎから、標準模型で記述される物質以外にも質量を持つ未発見の物質が約 5 倍あると考えられ、それを暗黒物質と呼ぶ。

暗黒物質が満たす性質として

- 目に見えない。すなわち電磁相互作用をしない。
- 強い相互作用をしない。
- 現在の宇宙に残存している。すなわち安定である。
- 非相対論的粒子である。

といったものが挙げられる。これらを満たす素粒子は標準模型の枠組みでは存在しない。標準模型を拡張し、新しい素粒子モデルの可能性を探ることが暗黒物質探索に繋がる。有力な候補として、後述する超対称性粒子が考えられている。

## 大統一理論

標準模型は電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用のそれぞれのゲージ対称性に基づいて  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$  のゲージ理論となっている。標準模型では世界に存在する 4 つの相互作用のうち重力を取り扱えていないことに加え、それ以外の 3 種類の相互作用も統一することは出来ていない。大統一理論とは、非常に大きいエネルギースケール  $O(10^{16})$  GeV においてこれら 3 つの力はもともと 1 つの力であったとする理論であり、このエネルギー領域で強い相互作用と電弱相互作用のゲージ結合定数が一致し、力が統一されると考えられている。

## 階層性問題

2012 年に LHC によって発見されたヒッグス粒子の質量は 125 GeV である。これは大統一理論のエネルギースケールと比較して非常に小さい。大統一理論のエネルギースケールを  $\Lambda$  とすると、ヒッグス粒子の質量の二乗  $m_h^2$  は、ヒッグス粒子の裸の質量  $m_{\text{bare}}$  と輻射補正による大きな量子補正  $\delta m_h^2$  を用いて以下の様に表される。

$$m_h^2 = m_{\text{bare}}^2 + \delta m_h^2 \quad \delta m_h^2 \propto \Lambda^2 \quad (1.1)$$

$\Lambda$  をエネルギースケール  $O(10^{16})$  GeV とすると、ヒッグス粒子の質量が 125 GeV であるならば  $m_{\text{bare}}^2$  と量子補正  $\delta m_h^2$  の間に 28 桁もの微調整が必要となる。これは非常に不

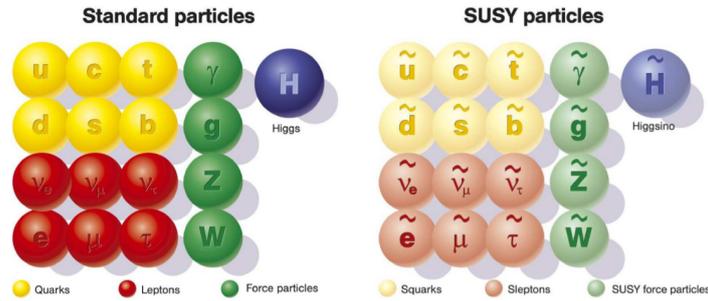


図 1.1: 標準模型の粒子と対応する超対称性粒子 [1]

自然であるため、輻射補正による二次発散  $\delta m_h^2$  を取り除くような標準模型を超える物理が必要となる。

## 1.2 超対称性理論

この様に標準模型には未解決の問題点が存在する。これらを解決するために様々な標準模型を超える物理が議論されているが、本節ではその有力な候補となる超対称性理論について述べる。

### 1.2.1 超対称性 (SUSY)

超対称性理論は標準模型における各粒子に超対称性を仮定する理論である。標準模型における素粒子はボソンとフェルミオンの2種類に大別され、それぞれスピンの整数、半整数という性質を持ち、統計性などの違いがある。

超対称性はこのスピンに関する対称性であり、図 1.1 の様に標準模型の各粒子の対となる超対称性粒子を预言する。超対称性粒子は元の粒子とスピンの  $\frac{1}{2}$  だけ異なり、かつ他の性質は全て同じとなる粒子である。ただし標準模型の粒子と同様のエネルギースケールには超対称性粒子は見つかっていない。これは超対称性が破れていて、その影響で超対称性粒子は元の粒子よりも重くなってしまっているためと考えられている。

### 1.2.2 超対称性理論が解決する問題

超対称性を導入すると、前節で述べた標準模型の未解決問題に対して有効な解が得られると考えられている。これらのことから LHC-ATLAS 実験では超対称性粒子の探索が行われている。

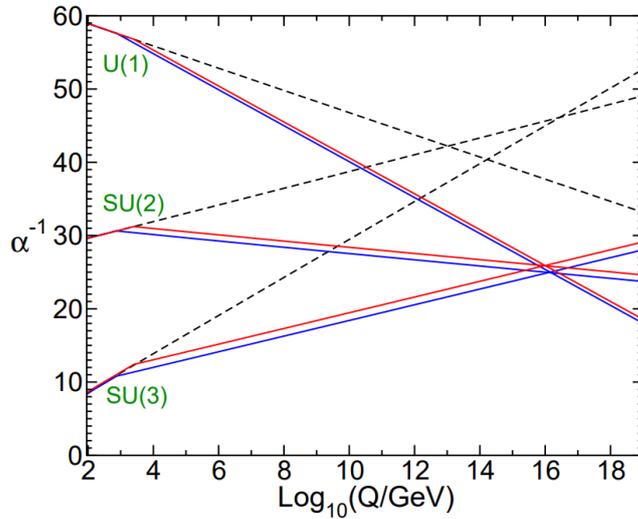


図 1.2: ゲージ結合定数のエネルギー依存性 [2]。標準模型 (黒点線) では 3 つの相互作用の結合定数は一致しないが超対称性理論では  $O(10^{16})\text{GeV}$  あたりで一致する。

## 暗黒物質

超対称性粒子のうち最も軽いものを LSP (Lightest SUSY Particle) と呼び、これが暗黒物質の候補となる。LSP は崩壊先がなく安定であり、かつ中性粒子であれば電磁相互作用もしない。後述するニュートラリーノはこれらを満たす有力な候補となる。

## 大統一理論

超対称性理論を導入すると、3 つの相互作用の結合定数は高いエネルギースケールで標準模型に比べて非常によく一致する (図 1.2)。

## 階層性問題

超対称性によりヒッグス質量の計算に出てくる輻射補正の二次発散が打ち消され、階層性問題は解消される。

### 1.2.3 超対称性理論と暗黒物質

現在の冷えた宇宙では LSP の対生成が起こらないため、宇宙空間における LSP の残存密度は対消滅断面積から推定できる。そのため超対称性粒子の質量は残存密度  $\Omega_{DM}h^2 = 0.12$  から制限がつく。後述する、本研究の対象となる純粋ウィーノが LSP

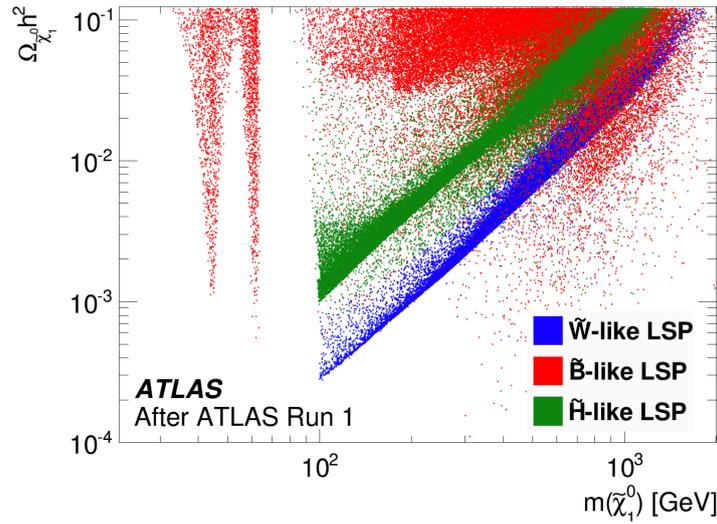


図 1.3: LSP の残存密度と質量 [3]。縦軸が LSP 残存密度、横軸が LSP 質量を表す。青色が純粋ウィーノが LSP の場合であり、その質量は 3 TeV 未満に制限される。

となる AMSB 模型の場合、断面積が他モデルに比べ比較的大きく、質量の上限が 3 TeV 程度となる [4]。図 1.3 はウィーノ、ビーノ、ヒッグシーノがそれぞれ LSP となるときの許容される質量であり、 $\Omega_{DM} h^2 = 0.12$  の時に overclose してしまわない条件から LSP 質量に上限がつく。

### 1.3 AMSB 模型

AMSB 模型 (Anomaly Mediated SUSY Breaking model) は超対称性理論のモデルの 1 つである。この模型の特徴として、LSP が純粋ウィーノとなることが挙げられる。ウィーノ、ビーノ、ヒッグシーノは混合状態をとり、それぞれニュートラリーノ ( $\tilde{\chi}_1^0$ ) とチャージーノ ( $\tilde{\chi}_1^\pm$ ) となるが、AMSB 模型ではヒッグシーノが重いため、ニュートラリーノは純粋な中性ウィーノ、チャージーノは純粋な荷電ウィーノとなる。純粋なウィーノが LSP の場合、質量が 3 TeV 未満にその存在が期待されるため LHC での発見が期待される。そのため、本研究では AMSB 模型の LSP 探索を目標としている。

### 1.4 消失飛跡

本研究で注目する物理は、図 1.4 に示すようなチャージーノとニュートラリーノの陽子陽子衝突による直接生成であり、これらの粒子の探索が目標となる。純粋ウィーノが

LSP の場合、チャージノの飛跡は非常に特徴的なものとなる。荷電ウィーノ  $\tilde{\chi}_1^\pm$  と中性ウィーノ  $\tilde{\chi}_1^0$  の質量起源は同様であるため質量は縮退する。ただし、輻射補正の違いから非常に小さい質量差が生まれる。その質量差  $\Delta m = m_{\tilde{\chi}_1^\pm} - m_{\tilde{\chi}_1^0}$  は図 1.5 に示すように約 160 MeV 程度であり、このわずかな違いからチャージノからニュートラリーノへの崩壊は長寿命となる。その寿命は

$$\Gamma(\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 \pi^\pm) = \Gamma(\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu) \times \frac{16\Delta m}{m_\pi m_\mu^2} \left(1 - \frac{m_\pi^2}{\Delta m^2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{m_\mu^2}{m_\pi^2}\right)^{-2} \quad (1.2)$$

となり、各パラメータに値を代入すると、チャージノの寿命は約 0.2 ns となる。

このことから、チャージノの崩壊は  $O(0.1-10)$  cm 程で起こることになる。そのため、生成されたチャージノは飛跡検出器内で崩壊することになる。その中でも図 1.6 は、内側の Pixel 検出器 (衝突点から 33 mm–123 mm) とその外側の SCT 検出器 (299 mm–514 mm) の間で崩壊する様子を表す。この時、ニュートラリーノは中性粒子であるため検出器には反応せず、パイオンは低運動量 (約 160 MeV) であるため検出器内の強い磁場に巻き取られる。パイオンは相互作用点から来ていないので飛跡にはならない。それゆえチャージノの飛跡は検出器内で消えたように見える消失飛跡として観測される。

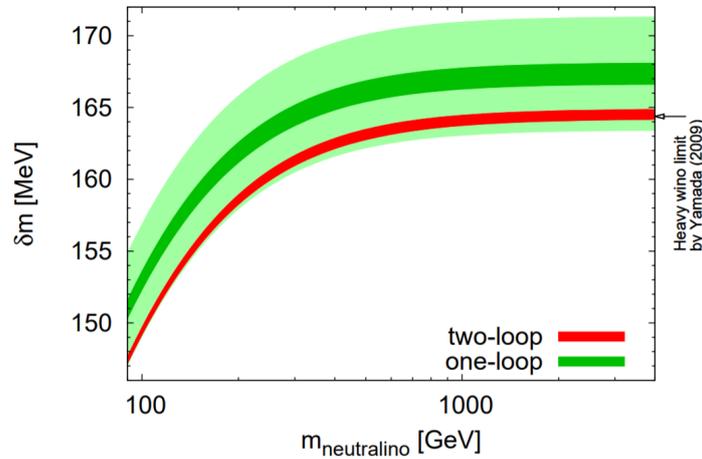


図 1.5: ニュートラリーノの質量と  $\Delta m = m_{\tilde{\chi}_1^\pm} - m_{\tilde{\chi}_1^0}$  の関係 [5]。

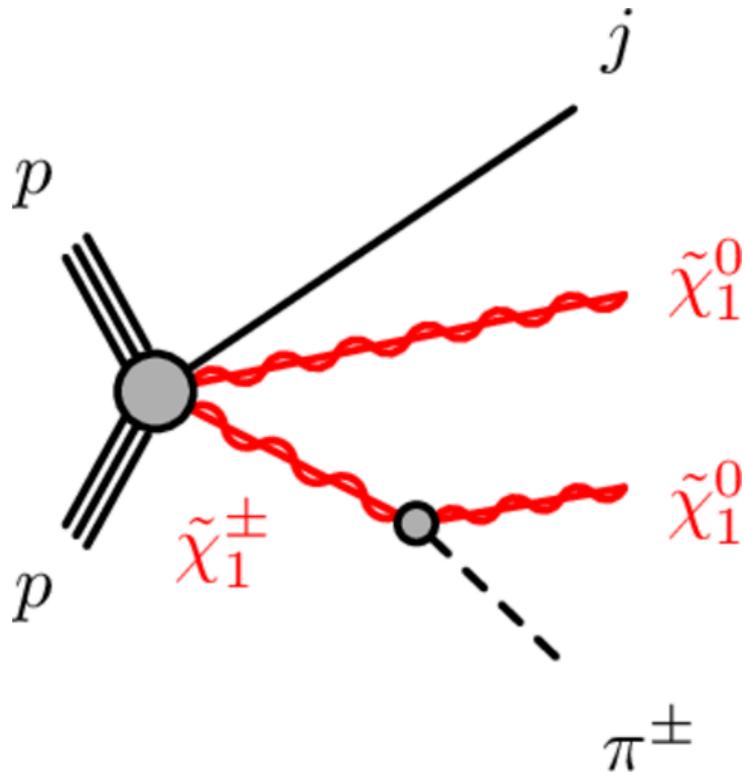


図 1.4: 陽子陽子衝突によるチャージーノ  $\tilde{\chi}_1^\pm$  とニュートラリーノ  $\tilde{\chi}_1^0$  の生成 [4]

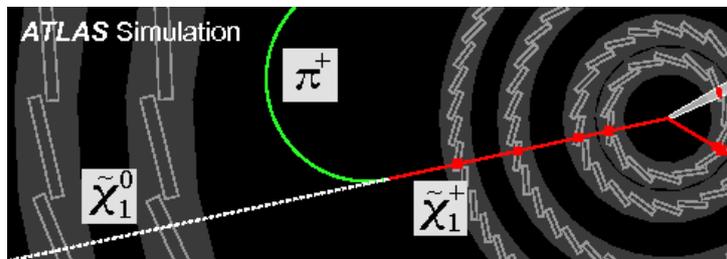


図 1.6: 長寿命チャージーノ  $\tilde{\chi}_1^\pm$  が生成された時のシミュレーション [6]。SCT 検出器と Pixel 検出器の間で崩壊することで、検出器に反応しないニュートラリーノ  $\tilde{\chi}_1^0$  と低運動量パイオンが生じ、消失飛跡となる。

#### 1.4.1 現在の消失飛跡解析

図 1.7 は Run 2 までの消失飛跡探索から分かっている AMSB 模型のチャージーノの質量と寿命に関する制限である。黒い破線が理論上の純粋ウィーノのパラメータであり、Run 3 ではこの棄却領域の外側の探索を目指す。0.2 ns の寿命を持つチャージーノに対

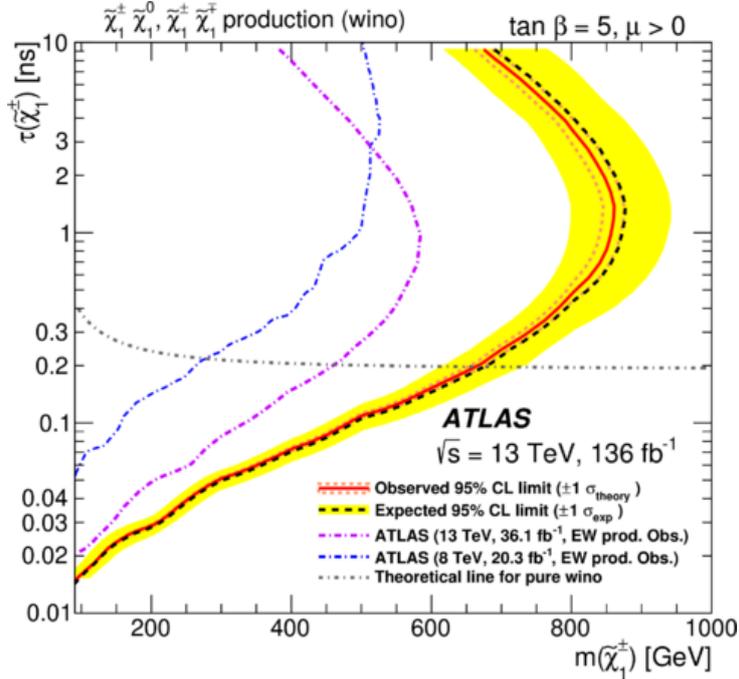


図 1.7: チャージノの寿命・質量に対する棄却領域 [4]

しては

$$m_{\tilde{\chi}_1^\pm} < 660 \text{ GeV} (95\% \text{CL}) \quad (1.3)$$

の制限が付けられている。

Run 2 までの消失飛跡解析では消失飛跡専用のトリガーは用意されておらず、消失横運動量に関するトリガーとオフラインでの選別を用いて解析を行っている。

### 消失飛跡トリガーの導入

トリガーの概要については 2.2 節及び 4 章に示す。Run 2 までは消失飛跡に特化した後段トリガーは無かったため、Run 2 までの消失飛跡の解析は  $E_T^{miss}$  (3 章) に関するトリガーを使用していたが、消失飛跡は未発見である。Run 3 では更なる探索領域の拡充と消失飛跡への感度向上を目標に消失飛跡トリガーを開発と導入を行う。トリガーレートの要請を満たしつつ Run 2 よりも高い信号効率を出すことで、Run 3 での消失飛跡の解析が大きく改善する。

消失飛跡は短いため飛跡再構成が難しく、飛跡の延長の失敗や、多くの偽の飛跡が生じることによる背景事象の増大とそれによるトリガーレートの増大が問題となる。本研究では、トリガーでの飛跡再構成に際し飛跡の延長に失敗したものを成功したものと同様に再

構成を行うことで消失飛跡を保持し、機械学習を用いた選別を用いて背景事象と信号事象の選別を効果的に行う。機械学習の入力変数の最適化を行い選別性能を最大化し、トリガーレートが 10 Hz 以下となるようなトリガーの作成を目的とする。

## **本論文の構成**

本論文では 2 章で LHC-ATLAS 実験の概要と構成について、3 章では開発に使用した物理オブジェクトの定義を述べる。4 章では開発した消失飛跡トリガーの構成を示し、5 章に開発の要となる機械学習を用いた選別、6 章で実験に使用したデータサンプルの詳細を述べ、7 章でトリガーの性能と物理解析への影響を述べる。最後に 8 章で結論と今後の展望をまとめる。

## 第 2 章

# LHC-ATLAS 実験

LHC-ATLAS 実験は CERN で行われている加速器実験であり、LHC 加速器と ATLAS 検出器を用いて標準理論の検証とそれを超える物理の探索のための実験を行っている。本章では、LHC 加速器と ATLAS 検出器について詳述する。

### 2.1 LHC 加速器

Large Hadron Collider (LHC) は周長 27 km の世界最大の円形加速器であり、陽子などのハドロンを加速・衝突させることが出来る。そのビームラインは地下 100 m に存在しており、各ポイントに ATLAS 検出器や CMS、ALICE、LHCb 実験の検出器が設置されている。

LHC では 2010 年から運転が開始され、2012 年までは重心系エネルギーが 7–8 TeV での運転が行われた。その後点検やアップグレードのために長期間の運転停止がなされ、2015 年に重心系エネルギーを 13 TeV に上げて運転が再開した。2018 年までこの運転は行われ、再び長期間の運転停止がなされ 2022 年の運転再開に向けた調整が行われている。2012 年までの運転を Run 1 と呼び、2015 年から 2018 年の運転を Run 2、2022 年から始まる運転を Run 3 と呼び、本研究はこの Run 3 に向けて新たに導入するトリガーに関する研究となっている。

表 2.1 に示す様に、Run 3 では重心系エネルギー 13.6–14 TeV での運転が行われる予定であり、Run 2 よりデータの統計量は大きく増え、検出器やトリガーのアップデートもなされるため多くの発見が期待される。

表 2.1: LHC のパラメータ

パラメータ	Run 2	Run 3
重心系エネルギー	13 TeV	13.6–14 TeV
最大瞬間ルミノシティ [ $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	$2 \times 10^{34}$	$2 \times 10^{34}$
積分ルミノシティ [ $\text{fb}^{-1}$ ]	190	350

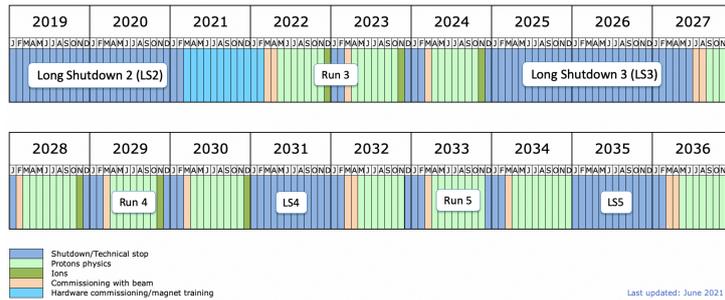


図 2.1: LHC の Run スケジュール [7]

## 2.2 ATLAS 検出器

図 2.2 に示す様に ATLAS 検出器は 3 つの検出器に大別され、それぞれ内部飛跡検出器、カロリメータ、ミューオンスペクトロメータである。それぞれ目的とする測定が違い、そこには多くの機能が含まれる。本節では、ATLAS 実験の根幹をなす検出器について詳述するとともに、本研究の対象でありデータ分析の根幹をなすトリガーシステムについて示す。

### 2.2.1 座標系

ATLAS 実験における粒子や検出器の説明のためにはじめに座標系について定義する。

ビーム軸上の衝突点を座標系の原点とし、ビーム軸方向を  $z$  軸の正、ビーム軸に対し垂直な平面を  $x - y$  平面とする。 $x, y$  軸について LHC リングの中心方向が  $x$  軸正方向であり、上方 (重力方向の逆) が  $y$  軸正方向である。方位角  $\phi$  はビーム軸回りの角度、極角  $\theta$  はビーム軸からの角度として定義される。

すなわち、 $(x, y, z)$  の座標系を用いて円筒座標系  $(r, \theta, \phi)$  を表すと

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.1)$$

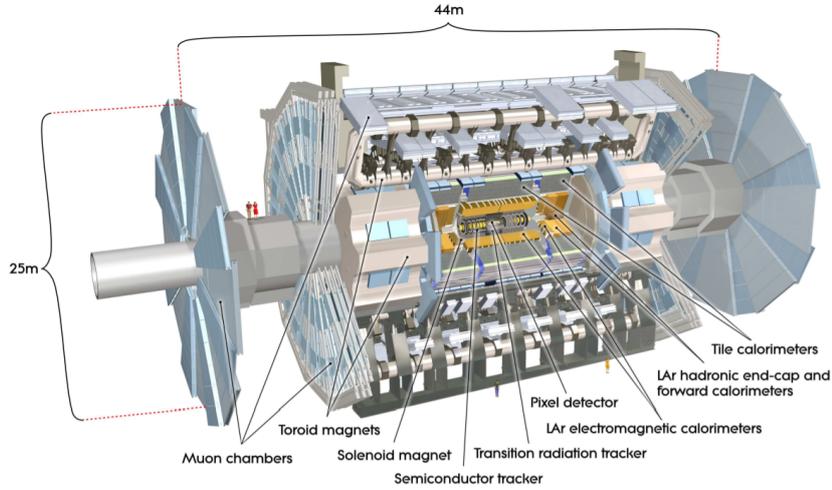


図 2.2: ATLAS 検出器の概観 [8]

$$\theta = \arctan\left(\frac{z}{r}\right) \quad (2.2)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (2.3)$$

また擬ラピディティ  $\eta$  は

$$\eta = -\ln \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.4)$$

と定義される。

図 2.6 に示す様に検出器における  $|\eta|$  の小さい領域をバレル (barrel) 部、 $|\eta|$  の大きい領域をエンドキャップ (endcap) 部と呼ぶ。また 2 粒子間の距離  $\Delta R$  は以下のように方位角と擬ラピディティで定義される。

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2} \quad (2.5)$$

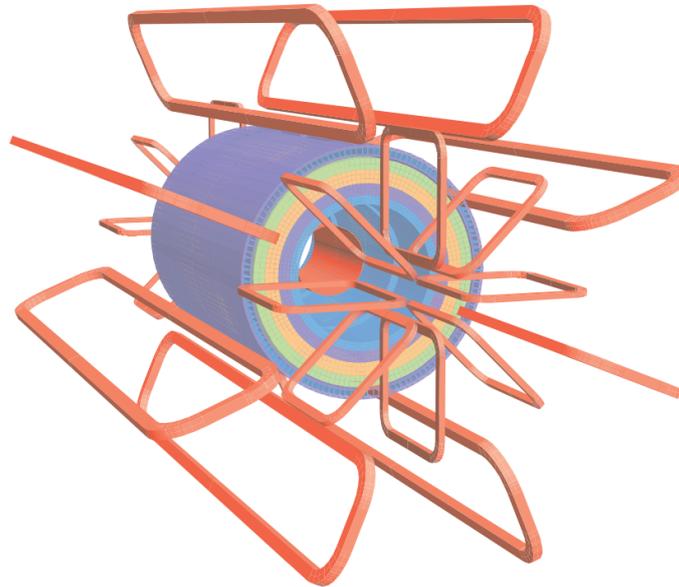


図 2.3: ATLAS 検出器における磁石の配置。中央にソレノイド磁石、外側にトロイダル磁石がある [8]。

### 2.2.2 超伝導磁石

ATLAS 検出器には 2 種類の超伝導磁石（ソレノイド磁石とトロイダル磁石）があり、それによる磁場で荷電粒子を曲げることで、その曲率から運動量を測定する。

中央のソレノイド磁石は内部飛跡検出器と LAr カロリメータの間に配置される。衝突点から出てきた荷電粒子を曲げることで、内部飛跡検出器での粒子の運動量測定や識別を可能にしている。 $z$  軸方向に 2 T の磁場をかけており、その分布は図 2.4a の様になり、検出器の中央では一様な磁場を実現している。

トロイダル磁石はバレル部とエンドキャップ部に分かれており、それぞれ 8 個の磁石で構成されている。 $\phi$  方向に 0.5–1 T の磁場をかけることで、荷電粒子を曲げて運動量の測定に役立つ。磁場の分布は図 2.4b の様になっていて、複数の磁石が複雑な構造をしているため不均一な分布となっている。

### 2.2.3 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は ATLAS 検出器の中で最も内側にありビームラインに近い位置にある。その中でも 3 つの構成要素に分かれており、内側から Pixel 検出器、SCT 検出器、

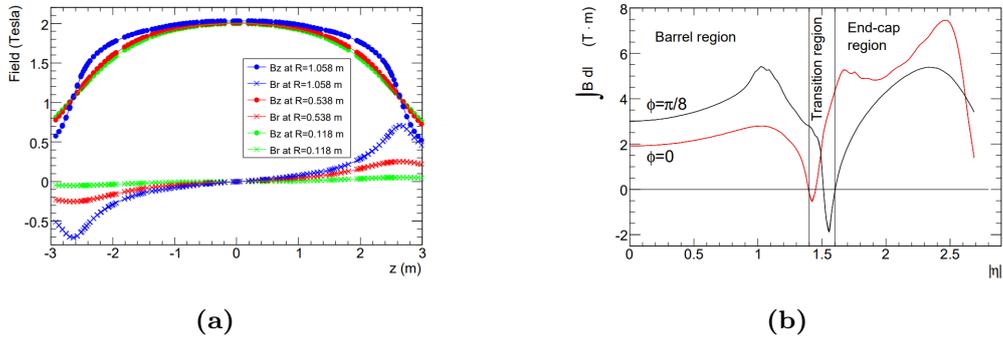


図 2.4: (a) 内部飛跡検出器内の位置  $z$  における磁場の大きさ。 (b) MDT 内の  $|\eta|$  における磁場の積分値の分布 [8]。

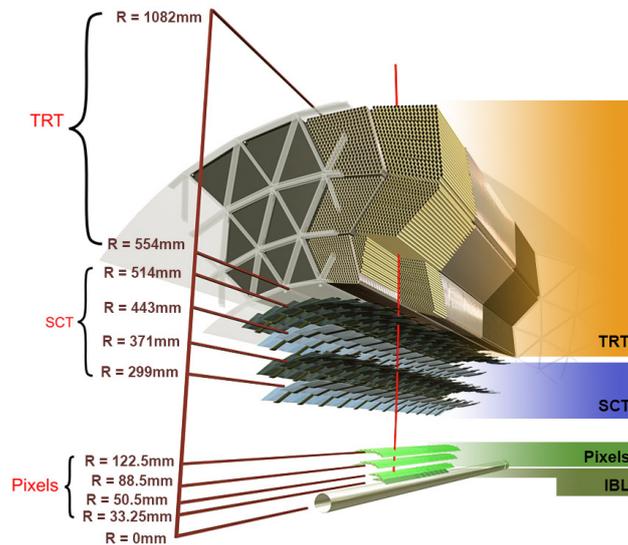


図 2.5: 内部飛跡検出器の概観 [9]

TRT 検出器が配置されている。その位置関係は図 2.5 及び図 2.6 に示す様に、ビームラインからの距離は Pixel 検出器が 33 mm–123 mm、SCT 検出器は 299 mm–514 mm、TRT 検出器は 554 mm–1082 mm である。衝突点に最も近く、生成された荷電粒子の通過位置を精度良く測定するために高い位置、運動量分解能が必要になる。本研究の対象とする消失飛跡は Pixel 検出器と SCT 検出器の間で崩壊する非常に短い飛跡であり、Pixel 検出器や SCT 検出器の位置関係や層の数は本論文において重要である。この節では Pixel、SCT、TRT の 3 つの検出器について詳述する。

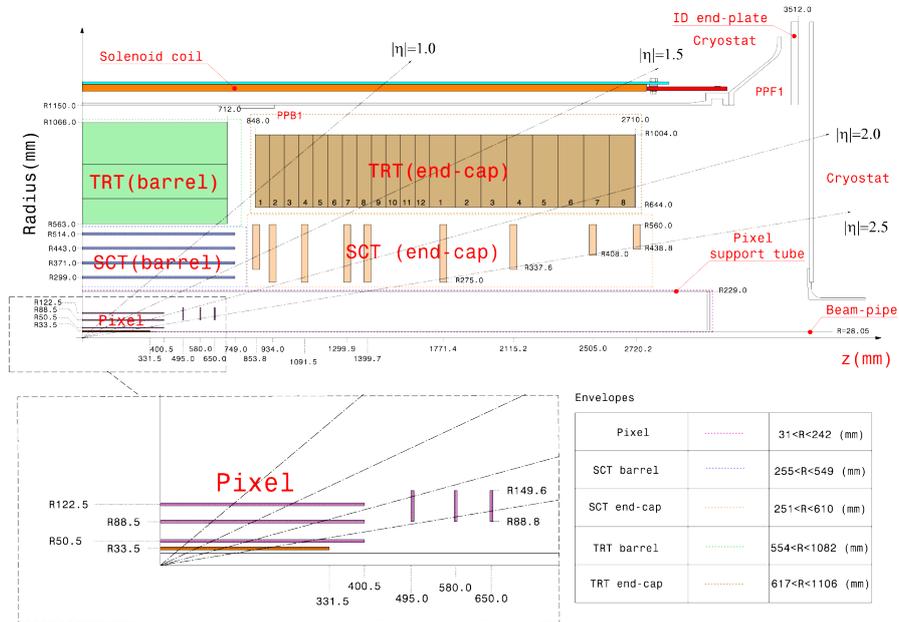


図 2.6: 内部飛跡検出器の概要 [10]。各検出器がバレル部とエンドキャップ部に分かれている。

## Pixel 検出器

Pixel 検出器はバレル部に 4 層、エンドキャップ部 (両側) に 3 層の検出器で構成される。バレル部の最内層は Insertable B-Layer (IBL) と呼ばれ、ビーム軸から 33 mm の位置にある。ピクセルサイズは非常に小さく、 $50 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$  (IBL は  $50 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ ) である。この高い粒度に加え、複数のピクセルの情報を統合して粒子の位置を求めるため非常に位置分解能が良い。その分解能は、バレル部で  $r - \phi$  方向に  $10 \mu\text{m}$ 、 $z$  方向に  $115 \mu\text{m}$ 、エンドキャップ部では  $r - \phi$  方向に  $10 \mu\text{m}$ 、 $z$  方向に  $115 \mu\text{m}$  となっている。

## SCT 検出器

SCT 検出器はシリコン型半導体検出器であり、図 2.6 の様にバレル部に 4 層、エンドキャップ部に 9 層の検出器を持つ。これらの層は 2 重になったシリコンストリップセンサーを持ち、それらが  $40 \text{ mrad}$  の角度で張り合わされることで、入射粒子の 2 次元的な位置の測定を可能になっている。位置分解能は、バレル部、エンドキャップ部ともに  $r - \phi$  方向に  $17 \mu\text{m}$ 、 $z$  方向に  $580 \mu\text{m}$  である。

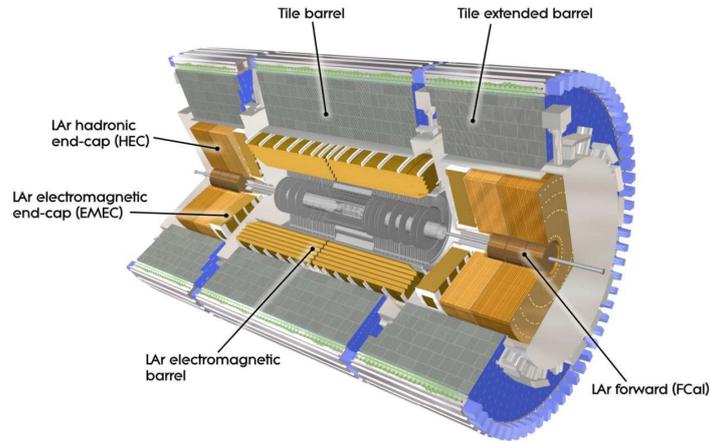


図 2.7: カロリメータの概要 [8]

## TRT 検出器

TRT 検出器は、ストロー型のドリフトチューブチェンバーを積み重ねた検出器である。内部にはガスが充填されていて、荷電粒子の位置測定や遷移輻射の違いによるパイオンと電子の識別などが出来る。位置分解能は Pixel 検出器よりも悪く、 $130 \mu\text{m}$  である。長い距離の飛跡の再構成に役立つ。本論文で取り扱う消失飛跡は TRT 検出器には到達しない。

## 2.2.4 カロリメータ

図 2.7 に示すように ATLAS のカロリメータは内部飛跡検出器の外側に配置されており、電磁カロリメータ (EM カロリメータ) とハドロンカロリメータに大別され、それぞれ電子や光子、ジェットの測定などに用いられる。また消失横運動量の測定にも用いられる。

## 2.2.5 ミューオン検出器

ミューオン検出器は ATLAS 検出器の最外層に位置し (図 2.8)、カロリメータから出てきたミューオンを捕捉する。その構成要素は大きく 4 つに大別され、運動量測定用の Monitored Drift Tube (MDC) と Cathode Strip Chambers (CSC)、トリガーに情報を渡すための Thin Gap Chambers (TGC)、Resistive Plate Chamber (RPC) によって構成されている。

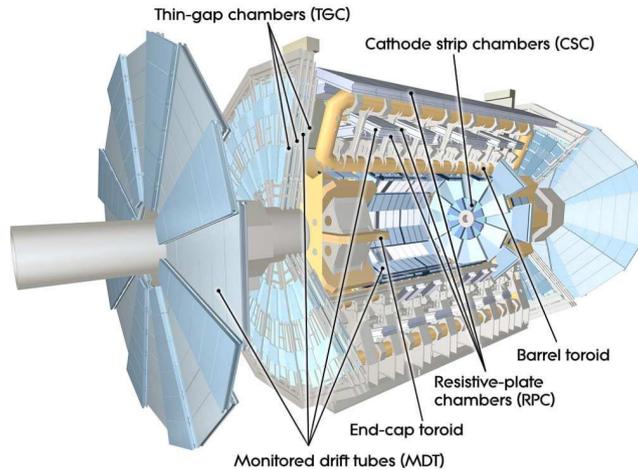


図 2.8: ATLAS ミューオン検出器の概観 [8]

## 2.2.6 トリガー

ATLAS 実験では 40 MHz という高頻度で陽子陽子衝突が起きる。それ故非常に多くの粒子が生成されるが現状のシステムで記録できるイベントはおおよそ 1 kHz 程度であり、記録するイベントを選別する必要がある。

図 2.9 は Run 3 における ATLAS のトリガーシステムである。ATLAS のトリガーシステムは不必要なデータを落とし、効率的なデータ選別を行う。ただし高速かつ感度を高く保った状態での選別を実現しなければいけないため、ATLAS トリガーでは 2 段階の選別を行い効率化を図っている。1 つ目がハードウェアレベルで行われている前段トリガー (Level 1 Trigger :L1) で、簡易的な選別を行いイベントレートを 40 MHz → 100 kHz に落とす。2 つ目がソフトウェアレベルで行われている後段トリガー (High Level Trigger : HLT) で、ここで L1 よりも時間をかけて高度な処理を施し、信号感度を保ったままイベントレートを 100 kHz → 1.2 kHz 程度に落とす。

### Level 1 Trigger : L1 : 前段トリガー

L1 トリガーでは  $2.5 \mu\text{s}$  という非常に短い時間で事象選別を行うためハードウェアレベルで処理される。主に 3 種類の機構に分類され、カロリメータの情報を用いて選別を行う L1Calo、ミューオン検出器の情報を用いて選別を行う L1Mu、加えてこれら 2 つを組み合わせた L1Topo がある。ここで選別されて残ったレート 100 kHz のイベントが HLT に送られる。

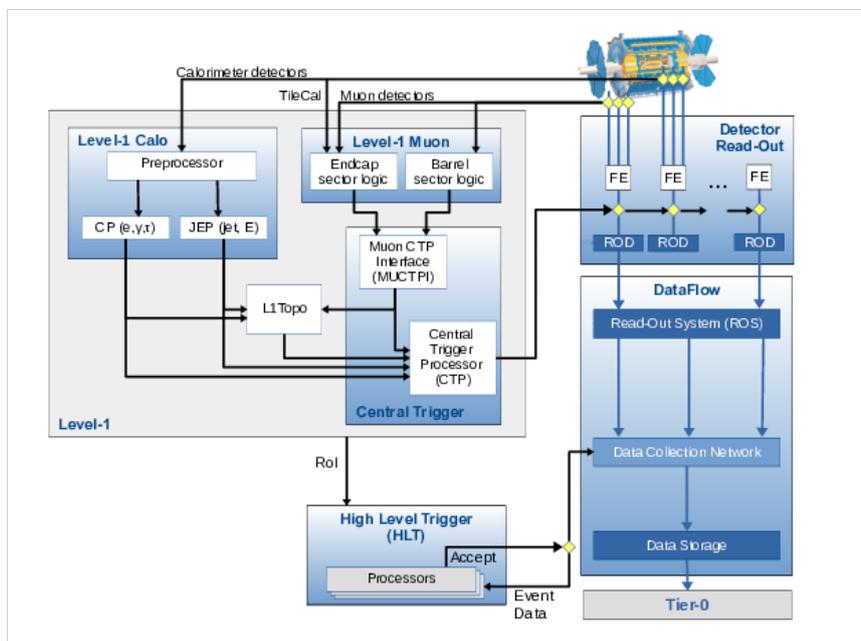


図 2.9: Run 3 でのトリガーシステムの概要 [11]

### High Level Trigger : HLT : 後段トリガー

本研究の主題である消失飛跡トリガーは HLT に分類される。HLT では L1 で与えられた Region of Interest (RoI) という興味のある  $\eta, \phi$  領域の情報を基に複雑な処理をソフトウェアレベルで行うことが出来る。L1 では使用していない内部飛跡検出器の情報などを用いることで飛跡や物理量の情報を使い L1 よりも高精度な選別を行う。図 2.10 に示すように Run 2 において HLT による選別でイベントレートは平均 1.2 kHz であった [12]。

4 章以降で述べる消失飛跡トリガーでは通常のトラッキングに加え、トラッキングに失敗した飛跡にも再構成を行うことで消失飛跡への感度を上げている。

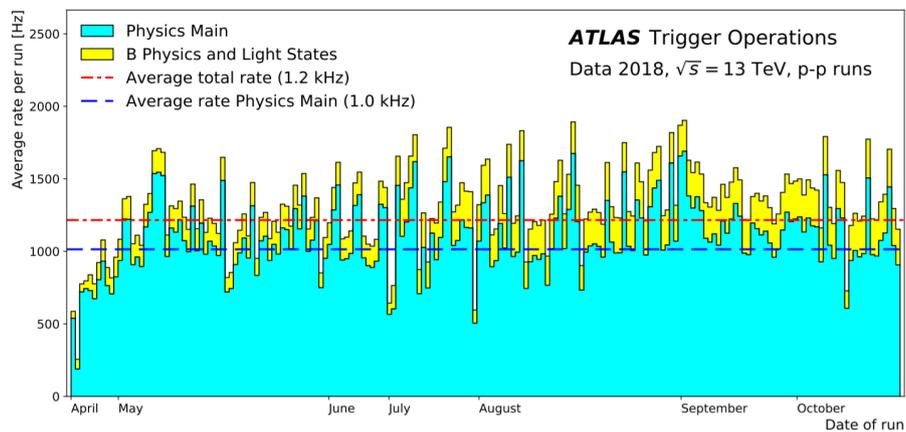


図 2.10: Run 2 での後段トリガー全体の平均レート。赤線は全体の平均を表し青線は主要な物理トリガーの平均を表す [12]。

## 第 3 章

# 物理オブジェクトの定義

本研究において用いる粒子などの情報を物理オブジェクトと呼ぶ。以下では消失飛跡トリガーで用いる物理オブジェクトの定義を説明する。

### 3.1 飛跡

飛跡は、ATLAS 検出器を荷電粒子が通過した時に作られる粒子の軌道である。トリガーでは飛跡を検出器の情報から再構成し、運動量や方向などの情報を用いて選別を行う。

#### 3.1.1 飛跡のパラメータ

飛跡のパラメータは以下の様に定義される。

- インパクトパラメータ  $(d_0, z_0)$  :  $d_0$  は衝突点と飛跡との横方向 ( $x, y$  方向) の距離を表しており、 $z_0$  は縦方向 ( $z$  方向) の距離を表している。
- $\theta, \phi$  : プライマリーバーテックスにおける飛跡の方向を表す。
- $p_T$  : 飛跡の横運動量。
- ヒット : 各飛跡に対応する ATLAS 検出器の反応点。
- アイソレーション : 飛跡の周辺 (距離  $\Delta R$  内) の他の飛跡の有無。無い場合は孤立しているとされ、興味のある事象から直接生成されたものである確率が高い。

### 3.1.2 偽の飛跡

再構成した飛跡の中には、実際の飛跡とは異なると考えられる偽の飛跡が多く存在する。これは、ヒット数が少ないことによる低精度の再構成や、飛跡から期待される位置にヒットが検出されないなどの多くの要因によって生じる。この偽の飛跡が消失飛跡の研究における主要な背景事象となる。

## 3.2 消失横運動量 ( $E_T^{miss}$ )

消失横運動量は検出器により検出された全ての物理オブジェクトの横運動量の総和の逆ベクトルとして定義される。

$$E_T^{miss} = - \sum_{all} \vec{p}_T \quad (3.1)$$

ビーム軸に対し横方向の運動量の和は保存されるため、 $E_T^{miss}$  はニュートリノやニュートラリーノなど検出器で観測できないものの横方向の運動量の和と考えられる。消失飛跡はその性質上大きな  $E_T^{miss}$  を残すため、 $E_T^{miss}$  を利用したトリガーを Run 2 までの消失飛跡解析では使用していた。この時の  $E_T^{miss}$  はカロリメータのみから計算されているためミューオンの寄与は入っていない。本論文の 6 章では消失飛跡トリガーと  $E_T^{miss}$  トリガーを組み合わせた後段トリガーを使ってトリガー性能を出している。

## 第4章

# 消失飛跡トリガーによる飛跡の再構成アルゴリズム

トリガーでは粒子の飛跡の情報を用いて選別を行うため、検出器のヒット情報から粒子の飛跡を再構成する必要がある。Run 2 以降のトリガーでは Fast Track Finder (FTF) を用いて飛跡候補を効率的に探索し、それを基に飛跡の再構成を行う。以下では FTF 及び消失飛跡トリガーでの飛跡を再構成するアルゴリズムについて述べると共に、図 4.1 にその工程の概略図を示す。

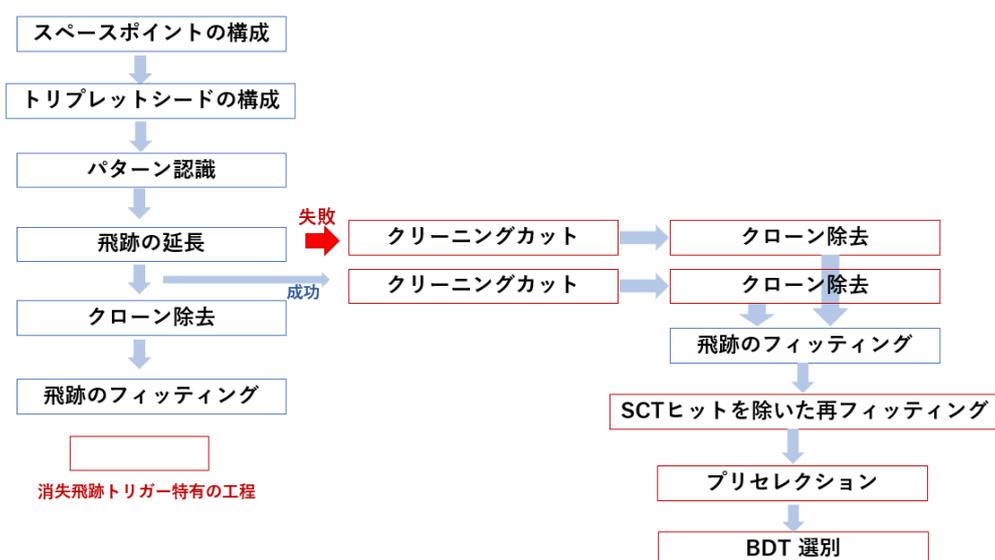


図 4.1: 消失飛跡トリガーのフロー。赤枠が消失飛跡トリガー固有の工程となる。

## 4.1 スペースポイントの構成

スペースポイントは各検出器のヒット情報から推定した荷電粒子の空間的な位置を表す。Pixel 検出器及び SCT 検出器は複数のモジュールのヒット情報から荷電粒子の通過位置を精度よく決めることが出来る。これら2つの検出器からそれぞれのスペースポイントの情報を取得する。

## 4.2 トリプレットシードの構成

取得したスペースポイントのうち3つを用いて、飛跡を作成するための種となるトラックシードを作る。Run 3 からは3つのスペースポイントの由来となるヒットを持つ検出器の組み合わせは、Pixel-Pixel-Pixel 及び SCT-SCT-SCT というシードパターンになっている。

## 4.3 パターン認識

FTF によるパターン認識では、トリプレットにより作ったトラックシードに対し、その3点を基に軌道を推定し、同じ粒子軌道の一部である確率の高い他のヒットを推定する。このパターン認識は、Run 3 では予め機械学習で予測したパターンを用いて行われる。

## 4.4 飛跡の延長

トラックシードを延長して、拡張した検出器のレイヤーのヒットを探し (TRT のヒットは使用しない)、延長した飛跡を作る。この時、消失飛跡の様に SCT 検出器まで到達せず、ヒット数が少なく短い飛跡ではトラックシード外のヒットとの結合に失敗しやすい。

消失飛跡トリガーでは、こうした延長に失敗した飛跡 (以降フェイルトラックと呼ぶ) に興味のある消失飛跡が多く含まれるため、延長に成功した飛跡 (サクセストラックと呼ぶ) だけでなく失敗したフェイルトラックも利用する。通常のトラッキングではフェイルトラックは棄却されるが、消失飛跡トリガーではサクセストラックと同様に次節以降の処理を行う。

## 4.5 クリーニングカット

作られる飛跡には多くの偽の飛跡が含まれるため、 $p_T$  や検出器ごとのヒット数などを用いてカットを行う。表 4.1 の様に延長に成功したサクセストラックには各検出器におけるバレル部でのヒット数、フェイルトラックには  $\chi^2/(\text{自由度})$  を用いたカットを行い、偽の飛跡を落とす。

表 4.1: クリーニングカット

条件	サクセストラック	フェイルトラック
$p_T$ [GeV]	$p_T > 3 \text{ GeV}$	$p_T > 3 \text{ GeV}$
$\frac{\chi^2}{(\text{自由度})}$	$\frac{\chi^2}{(\text{自由度})} < 3$	$\frac{\chi^2}{(\text{自由度})} < 20$
バレル部における IBL ヒットの個数 $N_i$	$N_i \geq 1$	-
バレル部における Pixel ヒットの個数 $N_p$	$N_p \geq 3$	-
バレル部における SCT ヒット ( $\chi^2 < 3$ ) の個数 $N_s$	$N_s \leq 2$	-
ヒット ( $\chi^2 < 3$ ) が 2 個以上の SCT の層数 $N_{sm}$	$N_{sm} = 0$	-

## 4.6 クローン除去

シェアドヒットと呼ばれる、1つのヒットに対し複数の飛跡が共有してしまっているようなヒットが存在する。シェアドヒットを含むような飛跡は偽の飛跡である確率が高いため、シェアドヒットを多く含むような飛跡は排除される。

FTF の他のトラッキング工程と消失飛跡トリガーのトラッキング工程におけるクローン除去は手法が異なる。

### FTF の通常のトラッキングにおけるクローン除去

各飛跡の品質 (Q) がそれぞれのヒットに対して計算される。

$$Q(\text{Pixel}) = 1.2 \times \left(17 - \frac{\chi^2}{2}\right) \quad (\chi^2 \text{は各 Pixel ヒットに対する} \chi^2) \quad (4.1)$$

$$Q(\text{SCT}) = 17 - \chi^2 \quad (\chi^2 \text{は各 SCT ヒットに対する} \chi^2) \quad (4.2)$$

これらにより計算された飛跡の品質が高い順に以下の判定を行い、どちらかを満たしたものを保持し、そうでないものを棄却する。

- その飛跡の全てのヒットが他の品質の高い飛跡で使われていない。
- 他の品質の高い飛跡とのシェアドヒットでないヒット  $\geq 3$

#### 消失飛跡トリガーのトラッキングにおけるクローン除去

消失飛跡トリガーでは消失飛跡となるものを残したいため、 $\chi^2$  の小さい、すなわち品質の良い SCT ヒットを持つ飛跡に対して品質を低く評価するバイアスを設ける。すなわち、上記の各ヒットに対する品質  $Q$  について、飛跡全体の品質を

$$Q(\text{Pixel}) - Q(\text{SCT}) \quad (4.3)$$

で評価する。計算された飛跡の品質が高い順に以下の判定を行い、どちらかを満たしたものを保持し、そうでないものを棄却する。

- その飛跡の全てのヒットが他の品質の高い飛跡で使われていない。
- 他の品質の高い飛跡とのシェアドヒットでない Pixel ヒット  $\geq 2$

これらはフェイルトラックとサクセストラック双方で同様に行われ、シェアドヒットを含むような偽の飛跡を排除する。

## 4.7 飛跡のフィッティング

通常のトリガーでは飛跡延長に成功した飛跡に対しフィッティングを行い、飛跡再構成を行う。消失飛跡トリガーではサクセストラックと失敗したフェイルトラックそれぞれに対しフィッティングを行い、飛跡再構成を行う。

## 4.8 SCT ヒットを除いた再フィッティング

本研究で扱うチャージノによる消失飛跡は、Pixel 検出器と SCT 検出器の間で崩壊するという条件を課している。しかし、SCT 検出器の近くで崩壊した場合、生成される低運動量パイオンが SCT 検出器にヒットを残し、そのヒットを基に消失飛跡が再構成さ

れることがある。この場合に作られる飛跡は SCT にヒットが無い場合の飛跡に比べ曲率や運動量が大きく異なっているため、次節の機械学習による選別において本来の物理量とは異なった値が示されることになる。そのため、再構成した飛跡において SCT ヒットを除いた状態での再フィッティングを行うことで、本来の消失飛跡の物理量を得ることが出来る。この再フィッティングによって得られたパラメータは機械学習による選別の時にのみ使い、それ以外に飛跡の情報を使用するときは通常の再構成による飛跡の情報となる。

これらにより再構成された飛跡の情報を用いて、消失飛跡トリガーでは選別を行う。この選別を次章で詳述する。

## 第5章

# 消失飛跡トリガーによる信号と背景事象の選別

本研究では、トリガーで再構成した飛跡に対し機械学習による選別を行うことで信号事象である消失飛跡と背景事象の高精度な選別を行うことを目的とする。消失飛跡の背景事象として主要なものは前述した偽の飛跡である。信号事象と背景事象に使用するサンプルは6章で詳述し、本節では消失飛跡トリガーでの再構成後の事象選別について述べる。

### 5.1 プリセレクション

再構成された飛跡の中には多くの偽の飛跡が含まれる。機械学習による選別を行う前に、簡単な事象選別を行うことで偽の飛跡を削減し、学習や選別における計算量を抑えることが出来る。信号事象の減少を抑え、かつ偽の飛跡の量を可能な限り削減できる様に選別基準を設けた。

プリセレクションに使用した選別基準は以下のようになる。

- $|d_0| \leq 5.0$  mm
- $|z_0| \leq 50.0$  mm
- Pixel 検出器のバレル部でのヒットの個数  $\geq 3$
- Pixel 検出器のバレル部での飛跡のフィッティングに対する  $\chi^2/(\text{自由度}) \leq 5$

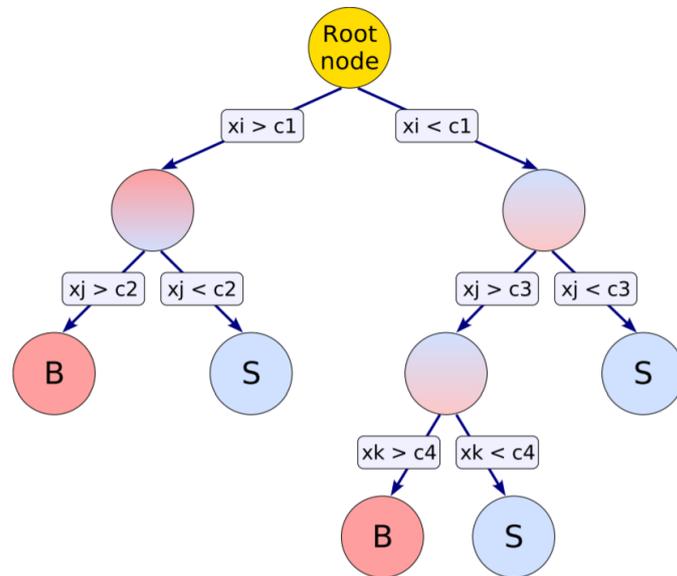


図 5.1: 決定木の概略図 [13]

## 5.2 機械学習を用いた選別

機械学習を用いた多変量解析を用いることで、信号事象と背景事象の効率的な選別を目的とする。本研究では機械学習の手法として Boosted Decision Tree (BDT) を用いた。

### 5.2.1 Boosted Decision Tree (BDT)

Boosted Decision Tree は弱学習機である Decision Tree (決定木) の組み合わせ (ブースティング) で強い学習機を実現する。

#### 決定木

決定木の概念図を図 5.1 に示す。決定木では、各入力変数に対しそれぞれ信号事象と背景事象を選別するカットをかけていき、木の深さが一定に達するか、選別後の最終ノードに属するイベントの数が一定以下になるまで選別を続ける。カットに対し各入力変数は、複数回使用される、あるいは 1 回も使われないことがある。図 5.1 の最終ノードにおける S は信号事象に分類され、B が背景事象に分類されたこと表す。

## AdaBoost

BDT では複数の決定木を組み合わせて強学習機を作るためにブースティングを行い、選別能力と安定性の向上を図る。ブースティングの手法として本研究では Adaptive Boost (AdaBoost) [13] を用いた。AdaBoost では、ある決定木で誤って分類されたイベントがあると、次の決定木ではそのイベントが重みづけされた上で分類が行われる。これは誤分類されたイベントを次の決定木で正しく分類するための重みづけである。この時の重み  $\alpha$  は前の決定木の誤判定率  $err$  に基づいて計算される。

$$\alpha = \frac{1 - err}{err} \quad (5.1)$$

こうして重みづけされた各学習機による分類結果を  $h(x)$  で表すと、最終的に学習機を組み合わせた AdaBoost の分類結果  $y_{Boost}(x)$  は

$$y_{Boost}(x) = \frac{1}{N_{collection}} \sum_i^{N_{collection}} \ln(\alpha_i) \cdot h_i(x) \quad (5.2)$$

$h(x)$  は 1 に近いほど信号事象らしく、 $-1$  に近いほど背景事象らしいとみなされ、 $y_{Boost}(x)$  は値が大きいほど信号事象らしく、値が小さいほど背景事象らしいことを表す。

このようにして組み合わされた学習機は単体の決定木よりも選別能力が高く過学習しにくい。しかし、モデルの複雑さや統計量の不足などの要因で過学習になるおそれがあるため、注意して調整しなければならない。

### 5.2.2 BDT による選別

消失飛跡トリガーでは前述の BDT を用いた多変量解析により信号事象と背景事象の選別を行う。本研究では消失飛跡と背景事象の選別を効率的に行うために 4 つのカテゴリに分類してそれぞれで BDT の最適化、学習を行った。4 つのカテゴリは表 5.1 の様に Pixel 検出器のヒットの個数、SCT 検出器のヒットの個数を用いて分類する。

1 解析あたりのトリガーの要請として、Run 2 データにおける  $E_T^{miss} > 50$  GeV の前段トリガーと  $E_T^{miss} > 80$  GeV の後段トリガー、消失飛跡トリガーを全て通過したレートが 10 Hz 以下が望ましい。それゆえ、トリガーレートが 10 Hz 未満になることを基準に、可能な限り信号効率を保つために BDT の学習と入力変数の最適化を行った。詳細は後述する。

表 5.1: カテゴリ分けの詳細

カテゴリ	飛跡と互換性の高い ( $\chi^2 < 3$ ) Pixel 層のヒット数	SCT ヒットの個数
pix4lsct0	4	0
pix4lsct1+	4	$\geq 1$
pix3lsct0	3	0
pix3lsct1+	3	$\geq 1$

## 第 6 章

# モンテカルロサンプルとデータサンプル

### 6.1 学習と評価に用いたサンプル

#### 6.1.1 信号：チャージーノモンテカルロ (MC)

本研究では信号事象としてチャージーノのモンテカルロ (MC) サンプルを使用した。

MC サンプルはジェネレーターを用いて生成される。ジェネレーターは注目する生成過程に対してファインマン図から断面積を計算し、その生成と粒子の運動をシミュレートする。様々な過程に対応するジェネレーターがあり、チャージーノの MC サンプルはジェネレーターの MadGraph、Pythia8、EvtGen を使用して生成した。Geant4 と呼ばれる、ジェネレーターで生成された粒子が検出器でどのような反応を起こすかをシミュレーションするツールを用いて、チャージーノからニュートラリーノへの崩壊をシミュレートした。以下では本研究で信号事象として使用するチャージーノ MC サンプルのパラメータを述べる。

- 寿命：1 ns
- 生成機構：チャージーノ対生成
- チャージーノの質量：91,200,300,400,500,600,700,800,900,1000 GeV を各 30000 イベント
- 崩壊位置：Pixel-SCT 検出器間で崩壊する。 $13 \text{ cm} < \text{チャージーノの崩壊距離} < 30 \text{ cm}$

### 6.1.2 学習に使用した背景事象

学習における背景事象には pix4lsct0 の様な特殊なカテゴリでも十分な統計量を確保するため RPVLL フィルターを用いて選別した Run 2 の実データを使用した。取得したデータは重心系エネルギーが 13 TeV の 2018 年の実験で得られた衝突データである。RPVLL フィルターはオフラインのフィルターであり、消失飛跡の解析のために HLT とオフラインの選別を使って高  $p_T$  や質の高い飛跡などの興味のある領域を選別したデータを作る。

### 6.1.3 評価に使用した背景事象

性能評価における背景事象には Enhanced Bias data (EB データ) を使用した。トリガーレートを評価するには、そのトリガーが興味のある運動学領域 (例えば高  $p_T$ ) に十分な統計が必要となるが、この領域の断面積は全非弾性断面積に比べて非常に小さい。そのためバイアスの無いデータでは興味のある領域の統計を確保するために非常に大きなデータが必要になってしまう。

EB データは予め複数の L1 トリガーによって選択されやすい運動学領域 (例えば高  $p_T$ ) にバイアスをかけてあるデータサンプルである。これにより興味のある運動学領域の統計を保証するため、HLT のトリガーレート評価に使用できる [14]。取得したデータは重心系エネルギーが 13 TeV の 2018 年の実験で得られた衝突データである。

## 第7章

# 消失飛跡トリガーによる選別と性能評価

図 7.1 に示すように各カテゴリによって信号事象と背景事象の分布は異なる。各カテゴリに対して個別に入力変数の種類を最適化した BDT を用いることで効率的な選別を行う。

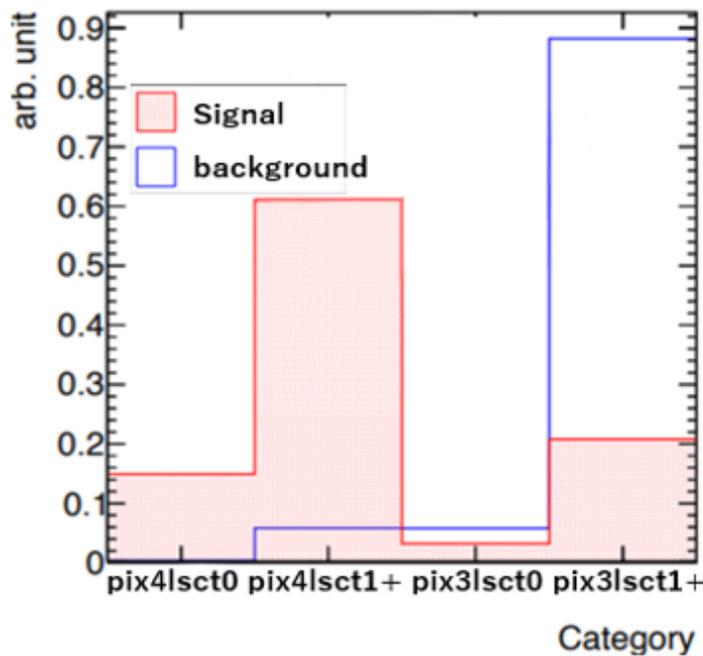


図 7.1: 各カテゴリにおける信号 (signal) と背景事象 (background) の分布。各分布は 1 に正規化されている。

## 7.1 BDT 選別に用いる入力変数の最適化

### 7.1.1 BDT 入力変数

BDT 選別に使用できる変数は再構成した飛跡に関する情報である。refit w/o SCT は 4.8 章で述べた SCT ヒットを消して再フィッティングした時の結果を意味する。ここでは変数の意味とその分布の一部を示す。各カテゴリ毎の全ての変数分布は付録 B で示す。

#### $p_T$ と $p_T$ (refit w/o SCT)

信号事象であるチャージノは Initial State Radiation (ISR) ジェット による反跳で背景事象よりも  $p_T$  は大きくなる。そのため図 7.2 に示すように  $p_T$  は有用な変数となる。ただし、pix4lsct1+、pix3lsct1+ では崩壊して出来たパイオンが SCT 検出器にヒットを残すため、正しい  $p_T$  が計算されない場合がある。そのため SCT ヒットを除いてフィッティングした飛跡の  $p_T$  も有用な変数となる。

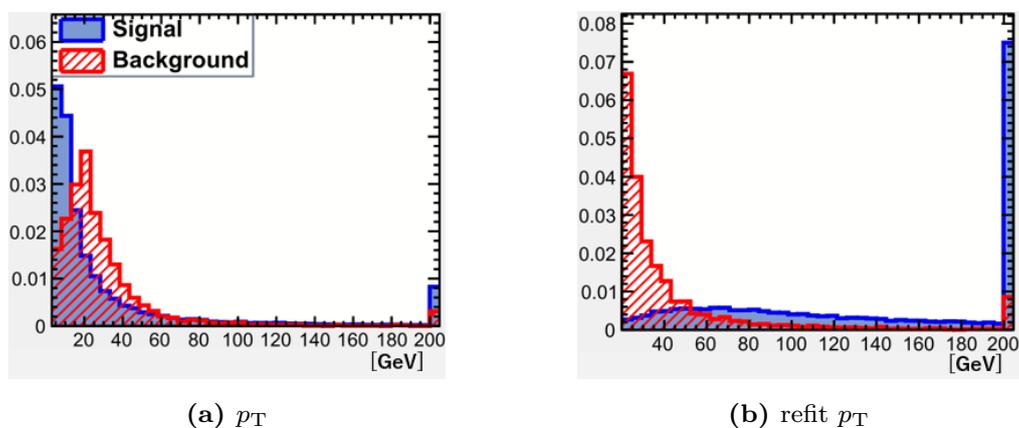


図 7.2: pix4lsct1+ の  $p_T$  と refit  $p_T$ 。青が信号事象、赤が背景事象を表す。

#### $|z_0|$ と $|d_0|$ 及び再フィッティングした $|z_0|$ と $|d_0|$

これらの飛跡パラメータは飛跡に対応するバーテックスから計算される。図 7.3 に示すように背景事象は信号事象に比べその分布は広い裾野を持つため、選別に有用な変数となる。

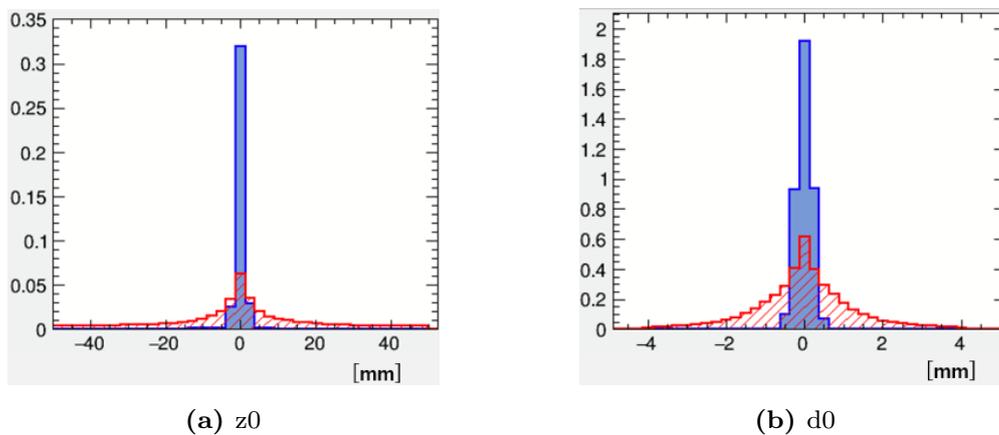


図 7.3: pix3lsct1+ の  $z_0$  と  $d_0$ 。青が信号事象、赤が背景事象を表す。他のカテゴリでも同様に背景事象は信号事象に比べ広い裾野を持つ。

### $\chi^2/\text{ndof}$ と $\chi^2/\text{ndof pix}$

図 7.4 に示すように  $\chi^2/\text{ndof}$  は再構成した飛跡と対応するヒットの間の  $\chi^2$  を自由度で割った値となる。 $\chi^2/\text{ndof pix}$  は Pixel 検出器のヒットに関する値である。分布は信号事象と背景事象で大きな差異はないが、他の変数との相関が低く入力変数として有用である。

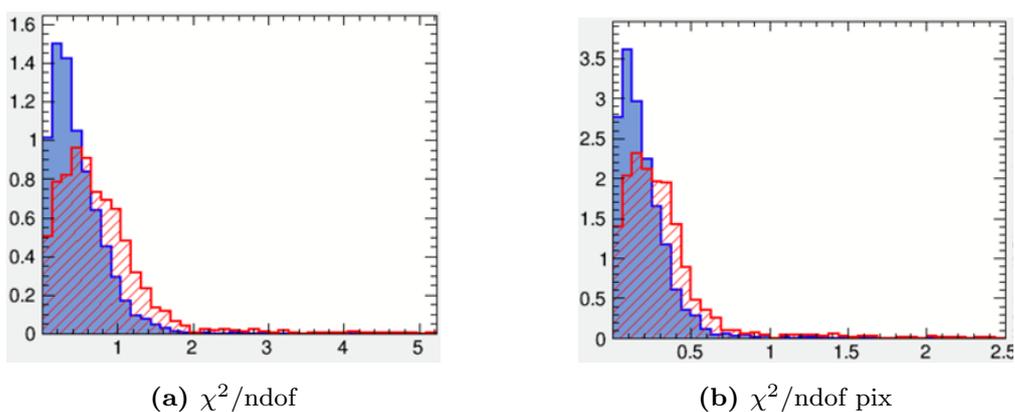


図 7.4: pix4lsct0 の  $\chi^2/\text{ndof}$  と  $\chi^2/\text{ndof pix}$ 。青が信号事象、赤が背景事象を表す。

## 各検出器 (Pixel,SCT) のヒット数

図 7.5 に示すように各検出器のヒット数もまた有用である。特に SCT 検出器のヒット数は信号事象は 0~2 程度であるのに対し、背景事象の多くは 2 個以上のヒットを持つため強力な変数となる。ただし、pix4lsct1+、pix3lsct1+ カテゴリでしか使用できない。

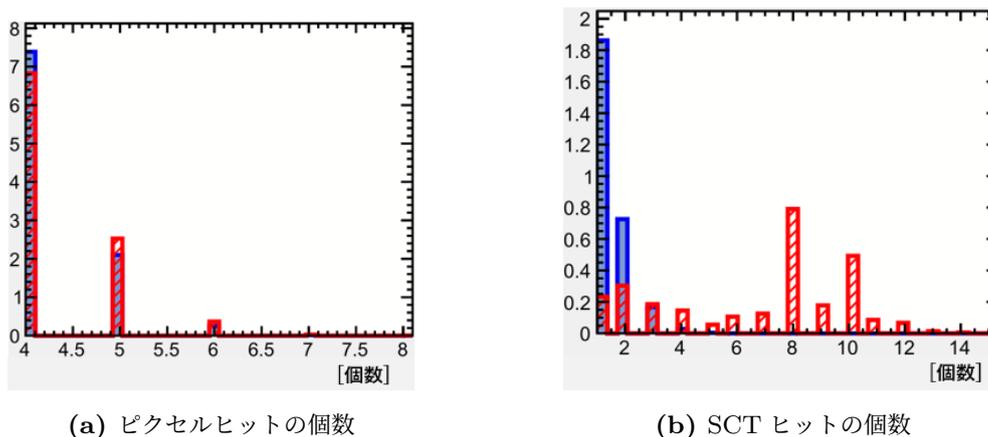


図 7.5: pix4lsct1+ のピクセルヒットの個数と SCT ヒットの個数。青が信号事象、赤が背景事象を表す。

## アイソレーション

アイソレーションはその粒子と他の粒子との距離  $\Delta R$  であり、pix4lsct1+ の場合の分布は図 7.6 の様になる。それぞれ  $\Delta R < 0.1$ 、 $0.1 < \Delta R < 0.2$  を満たすものをアイソレーション ( $\Delta R < 0.1$ )、アイソレーション ( $0.1 < \Delta R < 0.2$ ) として利用する。信号事象はその生成過程に随伴する粒子がないため独立した ( $\Delta R$  が大きいような) 飛跡が多く、背景事象は独立でない粒子が多く存在するため全てのカテゴリにおいて有用な変数となる。

## フェイルトラックとサクセストラック

4.4 節で述べたように消失飛跡トリガーでは通常のトリガーのトラッキングで失敗したフェイルトラックも再構成して選別にかける。pix4lsct0 及び pix3lsct0 では信号事象、背景事象共にヒット数が少なく全てがフェイルトラックとなるため、この変数は有用でない。しかし pix4lsct1+ と pix3lsct1+ では、信号事象のほぼ全てが SCT に 1~2 個程度のヒットしか持たないが、背景事象は崩壊しないため SCT 検出器に十分なヒットがある。そのため図 7.7 に示すように、pix4lsct1+ と pix3lsct1+ では、信号事象はフェイル

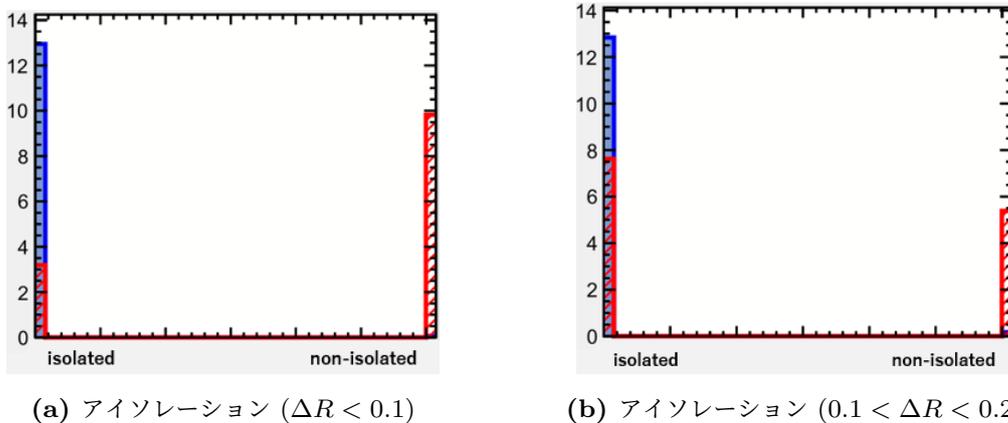


図 7.6: pix4lsct1+ のアイソレーションの分布。青が信号事象、赤が背景事象を表す。

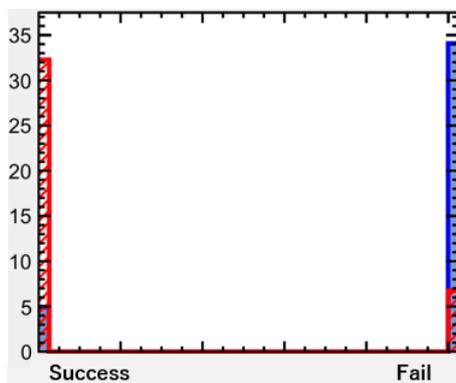


図 7.7: pix4lsct1+ のフェイルトラック、サクセストラックの分布。青が信号事象、赤が背景事象を表す。

トラックが多くなり、背景事象はトラッキングに成功した飛跡が多くなるため、選別に有力な変数となる。

### 7.1.2 学習と変数の最適化

学習には TMVA と呼ばれる多変量解析ツールの BDT を使用した。表 7.1 は BDT の代表的なハイパーパラメータであり、ブースティング手法として AdaBoost を採用した。

各 4 カテゴリにおいて、前述した入力変数を調整して信号事象と背景事象を分類する BDT の学習を行った。選別性能が最大化するように、入力変数の選択の最適化を行った。最適化に用いた指標は BDT の選別による背景事象効率が 1% となる時 (すなわち 99% の背景事象を除去できる時) の信号効率の値である。表 A.1 に示す様に信号効率の値が最大

表 7.1: BDT のハイパーパラメータ。全てのカテゴリで同じパラメータの BDT を使用している。

パラメータ	値
ブースティング手法	AdaBoost
決定木の数	850
最終ノードのイベントの数	全イベント数の 2.5%
決定木の深さ	3
決定木の分割数	20

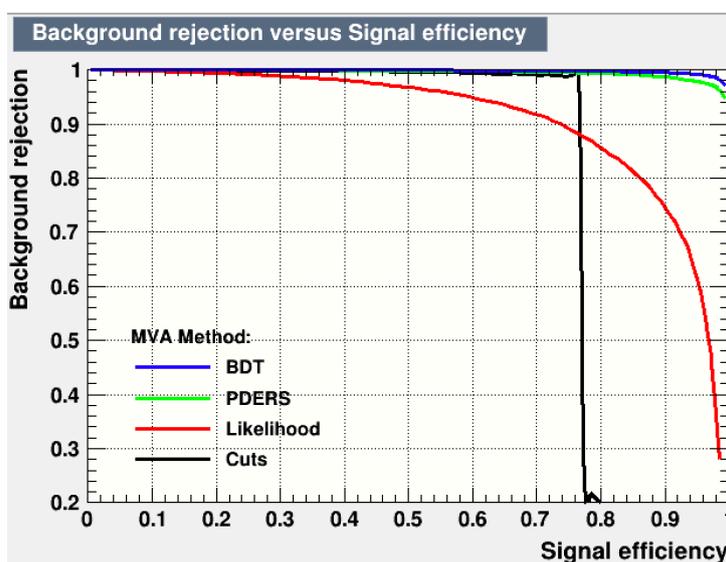


図 7.8: pix4lsct1+ の ROC 曲線。縦軸が背景事象の除去率 ( $1 -$  背景事象効率) であり、横軸が信号効率。青が BDT で最も面積が大きい。PDERS(緑)、Likelihood(赤)、Cut(黒) は TMVA による BDT とは異なる分類手法で、BDT はこれら全ての手法よりも ROC 曲線の面積が大きく、効率よい選別が行えている。

となる様な入力変数を各カテゴリにおいて求めた。その詳細は付録 A で後述する。以下の表 7.2 には最適化後の各カテゴリにおける BDT 入力変数を示す。図 7.8 は pix4lsct1+ カテゴリの ROC 曲線であり、面積が大きいほど選別能力が高いことを表す。青色の曲線が BDT の ROC 曲線であり、面積が大きく BDT が信号事象と背景事象を効率よく分けている。

表 7.2: 各カテゴリで BDT に使用した変数

BDT 入力変数	pix4lsct0	pix4lsct1+	pix3lsct0	pix3lsct1+
$p_T$	○	○	○	○
$ z_0 $	○		○	○
$ d_0 $	○		○	○
$\chi^2/\text{ndof}$	○		○	○
$\chi^2/\text{ndof pix}$	○	○	○	
$p_T$ (refit w/o SCT)	○	○	○	○
$ z_0 $ (refit w/o SCT)		○	○	○
$ d_0 $ (refit w/o SCT)		○	○	○
$\chi^2/\text{ndof}$ (refit w/o SCT)	○			○
refit $p_T/p_T$	○	○		○
refit $(\chi^2/\text{ndof})/(\chi^2/\text{ndof})$		○		
ピクセルヒットの個数	○	○	○	○
SCT ヒットの個数		○		○
バレル部のヒットの個数	○		○	○
アイソレーション ( $\Delta R < 0.1$ )	○	○	○	○
アイソレーション ( $0.1 < \Delta R < 0.2$ )	○	○	○	○
フェイルトラックとサクセストラック		○		○
BDT 入力変数の個数	12	12	12	15

### 7.1.3 BDT ワーキングポイントの最適化

BDT により各カテゴリの各イベントに対し BDT スコアが計算される。BDT スコアは大きいほど信号らしく小さいほど背景事象らしくなる。図 7.9 は BDT スコアに対する信号事象、背景事象の効率を表し、横軸は BDT スコアを表す。BDT ワーキングポイントは各カテゴリの閾値となる BDT スコアのことであり、BDT スコアが閾値未満のものは棄却し、閾値以上のものを取得する。この閾値が小さいほど信号事象に対する効率が上がり、値が大きいほど背景事象の選別能力が上がる。

消失飛跡トリガーでは最終的なトリガーレートが 10 Hz 未満を満たす中で出来るだけ高い信号効率を実現することが目標となる。図 7.1 に示すように、カテゴリ pix4lsct0、

pix4lsct1+ は信号事象が多く、カテゴリ pix3lsct0、pix3lsct1+ は背景事象が多いため、トリガーレートを低く、かつ信号効率を高くするには pix4l カテゴリで高い信号効率を、pix3l カテゴリで非常に低い背景事象効率を実現する必要がある。そのため表 7.3 に示すように BDT ワーキングポイントは pix4l カテゴリで 100% となるように、pix3l カテゴリではトリガーレートが 10 Hz 未満となるように背景事象効率を決定した。この時の効率は EB データを用いて計算した。

表 7.3: 各カテゴリにおける BDT ワーキングポイントと信号効率、背景事象効率

カテゴリ名	BDT WP	信号効率	背景事象効率
pix4lsct0	-0.1	100%	$0.24 \pm 0.12\%$
pix4lsct1+	-0.08	100%	$0.17 \pm 0.01\%$
pix3lsct0	0.04	65%	$(7.0 \pm 2.1) \times 10^{-3}\%$
pix3lsct1	0.145	55%	$(6.1 \pm 0.6) \times 10^{-3}\%$

この結果としてのトリガーレートと全体の信号効率は次節で詳述する。

## 7.2 トリガーレートと信号効率の評価

### 7.2.1 トリガーレートの見積もり

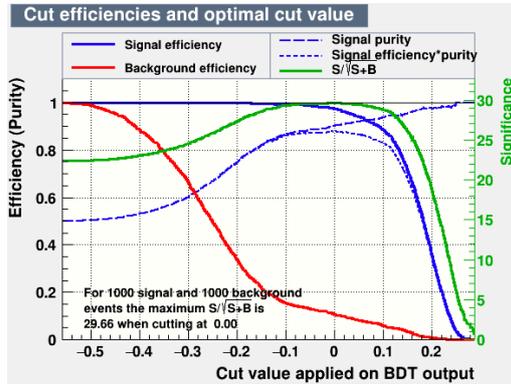
消失飛跡トリガーが想定するトリガーフローは以下のようになる。

- 前段トリガー (L1 トリガー) :  $E_T^{miss} > 50 \text{ GeV}$
- 後段トリガー (HLT トリガー) :  $E_T^{miss} > 80 \text{ GeV}$
- 消失飛跡トリガー

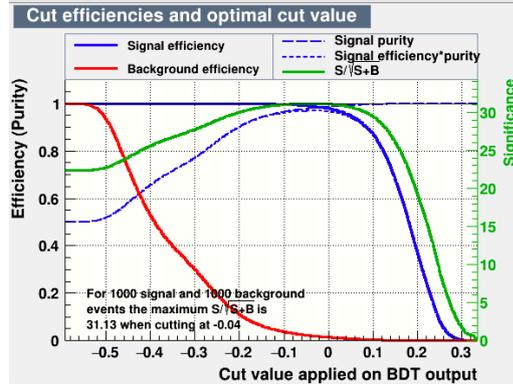
図 7.10 では上述のトリガーフローにおいて、EB データにおける、L1 トリガーを通過したイベント量 (黄色) と消失飛跡トリガーまでの全てのトリガーフローを通過したイベント量 (青色) を表す。

トリガーレートの見積もりは Run 2 実験での実測レートを用いて計算する。Run 2 実験では  $E_T^{miss} > 50 \text{ GeV}$  の L1 トリガーの実測レートは 5.1 kHz であり、この時の瞬間ルミノシティは  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  である。

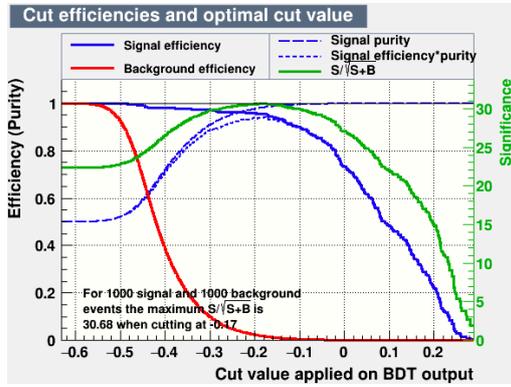
図 7.10 から L1 トリガーを通過した EB データ:30542 イベントの中で、消失飛跡トリガーまで全て通過したイベントは 55 個であり、比率にして約 0.18% にまで落ちている。



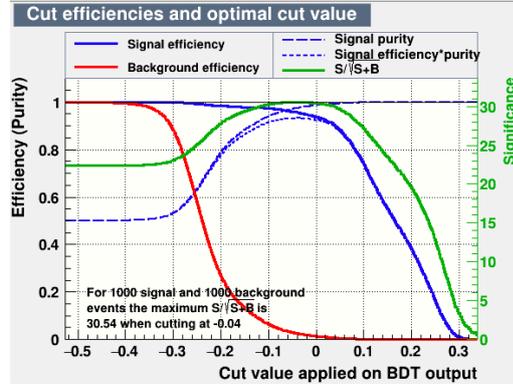
(a) pix4lsct0



(b) pix4lsct1+



(c) pix3lsct0



(d) pix3lsct1p

図 7.9: 各カテゴリにおける BDT 選別による信号効率 (singal efficiency) と背景事象効率 (background efficiency)。横軸は BDT スコアを表す。青の実線が信号効率、赤の実線が背景事象効率、緑の実線は  $\frac{S}{\sqrt{S+B}}$  であり、これは S を信号、B を背景事象として各 1000 事象あたりの BDT 選別後の残存量を表す。

このことから、消失飛跡トリガーのトリガーレートは統計誤差を考慮して、

$$5.1 \text{ [kHz]} \times \frac{55}{30542} = 9.2 \pm 1.2 \text{ [Hz]} \quad (7.1)$$

Run 3 で消失飛跡トリガーに割り当てられるトリガーレートは約 10 Hz であるため、消失飛跡トリガーはその要請を満たしていることが分かる。

図 7.11 は各カテゴリ毎のトリガーレートであり、pix4lsct1+ が最もレートが高くなっている。これは図 7.1 の様にこのカテゴリに非常に多くの信号事象があり、それに対し 100% の信号効率を設定したためである。Run 3 に向けてトリガーレートが 10 Hz よりも大きくする余裕がある場合は、pix3lsct0、pix3lsct1+ の信号効率を上げる。

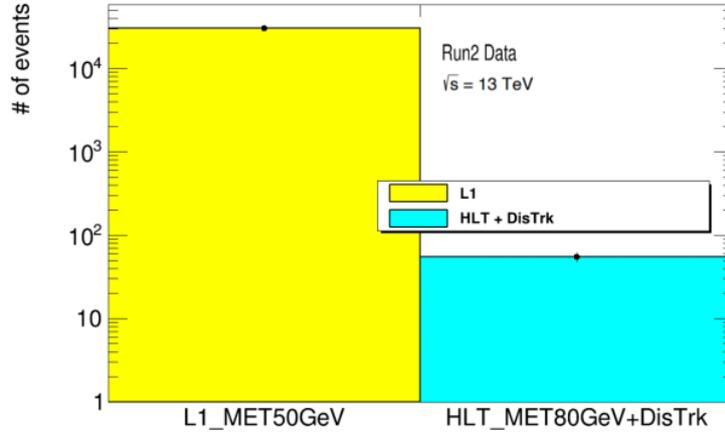


図 7.10: 各トリガー段階における EB データの残存量。水色が最終的に前段トリガーから後段+消失飛跡 (DisTrk) トリガーまで全て通過したイベント量を表す。瞬間ルミノシティは  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

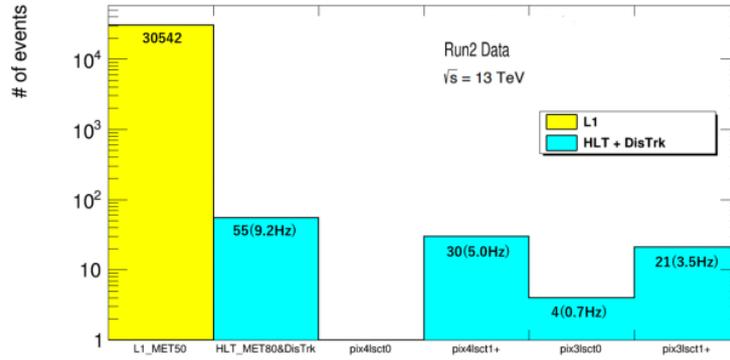


図 7.11: 各カテゴリ毎のトリガーレート。瞬間ルミノシティは  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

## 7.2.2 信号効率

図 7.12 は消失飛跡解析で用いられている既存の  $\text{HLT}:E_T^{miss} > 110 \text{ GeV}$  と本研究の  $\text{HLT}:E_T^{miss} > 80 \text{ GeV} +$  消失飛跡 (DisTrk) トリガー、及びそれらのどちらかを通過した場合の、3 種類のトリガーについて信号効率を示している。これらの効率の分母には L1 トリガー ( $E_T^{miss} > 50 \text{ GeV}$ ) を通過したイベントが用いられている。

Run 2 実験での解析で使われる  $\text{HLT}(E_T^{miss} > 110 \text{ GeV})$  に比べて、本トリガーを使用した場合、4% の信号効率の向上、あるいは併用することで、12% の信号効率向上が見込め、消失飛跡に対する現状よりも高い信号効率を得ることが出来る。

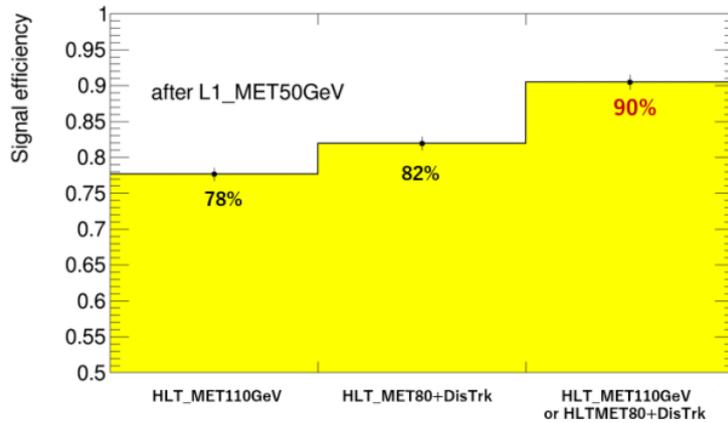


図 7.12: 各トリガーにおける信号効率 (signal efficiency)。ただし分母は  $E_T^{miss} > 50$  GeV の L1 トリガーを通過した信号事象である。

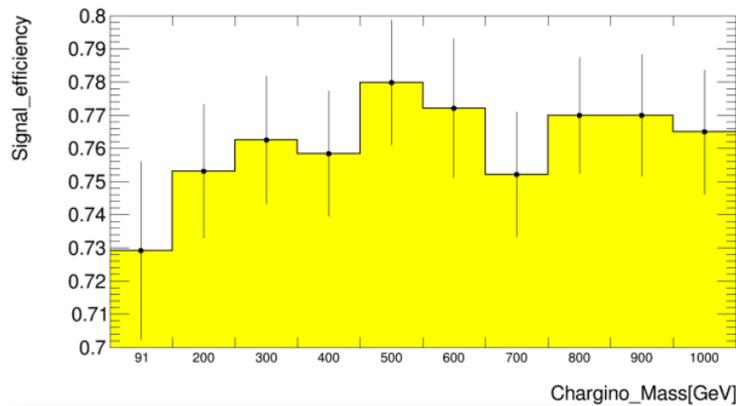


図 7.13: 消失飛跡トリガーにおける信号効率と使用したチャージーノ MC の質量依存性 (91 GeV–1000 GeV)

### 7.2.3 信号効率の質量依存性

本研究では信号事象としてチャージーノ MC の質量は 91 GeV–1000 GeV までをそれぞれ同量混ぜ合わせたものを使用している。消失飛跡トリガーの信号効率とチャージーノの質量との関係は図 7.13 で示される。この図から、各質量においての信号効率は 91 GeV を除いて統計誤差の範囲内に収まっている。91 GeV の信号効率は全体に比べてやや小さいがトリガーの性能に影響を与えるほど大きな差異は存在しなかった。

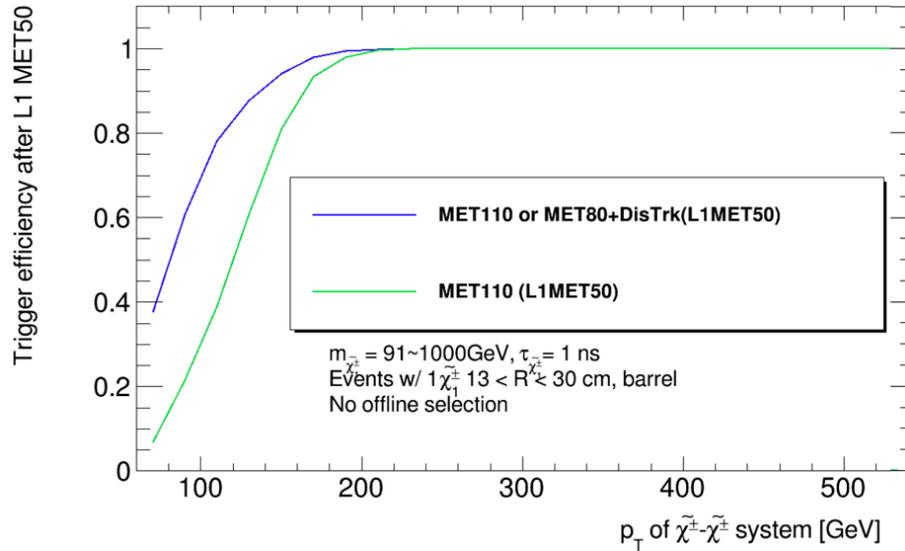


図 7.14:  $E_T^{miss} > 110$  GeV トリガーと消失飛跡 (DisTrk) トリガーの信号感度の  $E_T^{miss}$  依存性。横軸は生成されたチャージノの横運動量の和を表し、消失飛跡となるため  $E_T^{miss}$  に相当する。緑線が Run 2 までの  $E_T^{miss} > 110$  GeV トリガーで青線が消失飛跡トリガーと  $E_T^{miss} > 80$  GeV を併用したトリガー。縦軸は  $L1E_T^{miss} > 50$  GeV トリガーを通過した事象を分母としたときの信号効率。

### 7.3 物理解析への影響

図 7.14 は消失飛跡解析で用いられている既存の HLT: $E_T^{miss} > 110$  GeV と、それと併用して本研究の HLT( $E_T^{miss} > 80$  GeV + 消失飛跡 (DisTrk)) を用いた場合の信号効率の  $E_T^{miss}$  依存性を表す。消失飛跡トリガーを併用した場合、HLT: $E_T^{miss} > 110$  GeV に比べて小さい  $E_T^{miss}$  領域に高い感度があることが分かる。

現在の消失飛跡の解析では HLT: $E_T^{miss} > 110$  GeV をトリガーとして使用しているが、そのため十分な信号効率が得られる領域は図 7.14 より  $E_T^{miss} > 200$  GeV の領域となる。このため、現在の消失飛跡の解析では  $E_T^{miss} > 200$  GeV の事象選択を行って解析している。

本研究より、消失飛跡トリガーを併用することでより小さい  $E_T^{miss}$  領域に対しての信号効率が上がり、Run 3 の消失飛跡解析に繋がる。

## 第 8 章

# 結論と今後の展望

### 8.1 結論

標準模型を超える物理として超対称性粒子の探索が行われている。特に AMSB 模型では純粋ウィーノが LSP となり 3 TeV までにその存在が予見され LHC での発見が期待される。この模型ではチャージーノが長寿命となり、崩壊するとニュートラリーノと低運動量パイオンになるため、その飛跡は消失飛跡となる。故に長寿命チャージーノによる消失飛跡の探索は超対称性粒子発見への重要なプローブとなる。

本研究では、LHC-ATLAS 実験 Run 3 に向けて機械学習を用いた消失飛跡探索用のトリガーの開発を行った。消失飛跡は非常に短く、通常のトラッキングでは上手くいかず棄却されるものも存在するが、棄却されたものも強制的に再構成することで、再構成段階での消失飛跡の感度減少を抑えた。また再構成に要するヒットが少ないために多くの偽の飛跡が存在する。これをクリーニングカットやプリセクション、そして BDT による選別を行うことでトリガーレートを抑えることに成功した。

トリガーレートは  $9.2 \pm 1.2$  Hz という値と見積もられた。これは Run 3 における 1 解析あたりのレート割当 10 Hz の要件を満たす。

また、信号効率において、Run 2 における消失飛跡解析で用いられている HLT( $E_T^{miss} > 110$  GeV) よりも単体で 4% 高い信号効率を示し、特に小さい  $E_T^{miss}$  領域で高い信号効率を示したため、消失飛跡の解析における探索領域をより小さい  $E_T^{miss}$  領域にまで広げられることが分かった。

## 8.2 今後の展望

Run 3 実験は 2022 年に開始される予定であるため、Run 3 の環境で Run 2 の環境と同様のパフォーマンスを示すかどうかの確認が必要となる。加えて開発に伴う訓練と検証では寿命が 1 ns のチャージノのモンテカルロサンプルを使用した。寿命が 0.2 ns の場合にどのようなパフォーマンスを示すかも確認する必要がある。

また、本研究では信号事象としてチャージノのモンテカルロサンプルを使用しているが、実際の Run 3 において探索する対象は実データとなる。そのため、実データによる消失飛跡を用いて本トリガーを評価することで、実際の実験環境下における正確なパフォーマンス検証が行える。故に、Run 2 における  $Z \rightarrow \mu\mu$  の実データを retracking という特殊なトラッキング手法を用いて疑似消失飛跡と見立て、その飛跡に対する本トリガーの性能を評価する実験を行う。

# 謝辞

本研究を行うにあたって様々な方々のご助力がありました。深く感謝いたします。

指導教官である澤田龍准教授には、研究の方針や細かい作法、本論文の執筆にあたっての助言など多くのご指導ご鞭撻を賜りました。また長野邦浩准教授にも、毎週の HLT 会議や高エネルギー加速器研究機構での研究にあたって多くのご助力を頂きました。

ICEPP の先生方にも会議や講義で多くのご指導を頂きました。加えて消失飛跡や機械学習の定例ミーティングで様々なご助言を下された田中純一教授、寺師弘二准教授、齊藤真彦特任助教、森永真央特任助教、岸本巴客員共同研究員には大変感謝しています。

また、HLT の会議で研究、発表に関して多くのご指導を賜りました東京工業大学の山口洋平助教と ATLAS の HLT グループの皆様には大変お世話になりました。

ICEPP での活動及び研究において多くの方の支えがあり、修了することが出来ました。厚く感謝を申し上げます。皆さま、本当に有難うございました。

## 参考文献

- [1] Michael Grefe, Unstable Gravitino Dark Matter - Prospects for Indirect and Direct Detection, arXiv:1111.6779 [hep-ph], <https://arxiv.org/pdf/1111.6779.pdf>
- [2] Stephen P. Martin, A Supersymmetry Primer, arXiv:hep-ph/9709356[hep-ex], <https://arxiv.org/abs/hep-ph/9709356>
- [3] The ATLAS collaboration, Summary of the ATLAS experiment's sensitivity to supersymmetry after LHC Run 1 — interpreted in the phenomenological MSSM, arXiv:1508.06608, <https://arxiv.org/pdf/1508.06608.pdf>
- [4] The ATLAS collaboration, Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature using 136 fb-1 of pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector, arXiv:2201.02472 [hep-ex], <https://arxiv.org/abs/2201.02472>
- [5] Masahiro Ibe, Shigeki Matsumoto, Ryosuke Sato, Mass Splitting between Charged and Neutral Winos at Two-Loop Level, arXiv:1212.5989[hep-ph], <https://arxiv.org/abs/1212.5989>
- [6] ATLAS Collaboration, Search for long-lived charginos based on a disappearing-track signature in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector, JHEP 06 (2018) 022, arXiv:1712.02118[hep-ex], <https://arxiv.org/abs/1712.02118>
- [7] Longer term LHC schedule, <https://lhc-commissioning.web.cern.ch/schedule/LHC-long-term.htm>
- [8] The ATLAS Collaboration, The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider, JINST 3 (2008) S08003, <https://cds.cern.ch/record/1129811?ln=ja>
- [9] ATLAS Collaboration, Alignment of the ATLAS Inner Detector in Run-2, Eur.

- Phys. J. C 80 (2020) 1194, arXiv:2007.07624 [hep-ex], <https://arxiv.org/abs/2007.07624>
- [10] ATLAS Collaboration, Study of the material of the ATLAS inner detector for Run 2 of the LHC, arXiv:1707.02826, <https://arxiv.org/abs/1707.02826>
- [11] ATLAS Collaboration, Operation of the ATLAS trigger system in Run 2, arXiv:2007.12539 [physics.ins-det], <https://arxiv.org/abs/2007.12539>
- [12] ATLAS Collaboration, Trigger menu in 2018, ATL-DAQ-PUB-2019-001, <https://cds.cern.ch/record/2693402?ln=ja>
- [13] A. Hoecker, P. Speckmayer, J. Stelzer, J. Therhaag, E. von Toerne, H. Voss, M. Backes, T. Carli, O. Cohen, A. Christov, D. Dannheim, K. Danielowski, S. Henrot-Versille, M. Jachowski, K. Kraszewski, A. Krasznahorkay Jr., M. Kruk, Y. Mahalalel, R. Ospanov, X. Prudent, A. Robert, D. Schouten, F. Tegenfeldt, A. Voigt, K. Voss, M. Wolter, A. Zemla, TMVA - Toolkit for Multivariate Data Analysis, arXiv:physics/0703039 [physics.data-an], <https://arxiv.org/abs/physics/0703039>
- [14] ATLAS Collaboration, Trigger monitoring and rate predictions using Enhanced Bias data from the ATLAS Detector at the LHC, ATL-DAQ-PUB-2016-002, <https://cds.cern.ch/record/2223498?ln=ja>

## 付録 A

# BDT の入力変数と各カテゴリ信号効率

BDT の選別能力を最大化する際に入力変数の最適化は、背景事象効率が 1% の時のテストサンプルの信号効率が最大化する入力変数を採用した。表 A.1 は背景事象効率が 1% とした時のテストサンプルに対する信号効率を表す。用意した変数の種類は 17 種類であり、表 7.2 を使用した時に信号効率は最大化した。17 個の変数は、表 7.2 で登場する 17 種類である。値が同じである場合は ROC カーブの面積が大きい方を採用した。

**表 A.1:** 全 17 個の入力変数と最適化した際の入力変数を使用時の信号効率。テストサンプルに対する効率を示す。学習データの背景事象効率は 1% で固定している。

カテゴリ	全 17 個の入力変数使用時の信号効率	最適化した入力変数使用時の信号効率
pix4lsct0	0.635	0.650
pix4lsct1+	0.966	0.966
pix3lsct0	0.935	0.938
pix3lsct1+	0.924	0.925

## 付録 B

# BDT 入力変数一覧

以下には本研究で最適化した BDT に使用した入力変数の図を各カテゴリで示す。青色は信号事象 (Signal)、赤色が背景事象 (Background) を表す。

### B.1 pix4lsct0

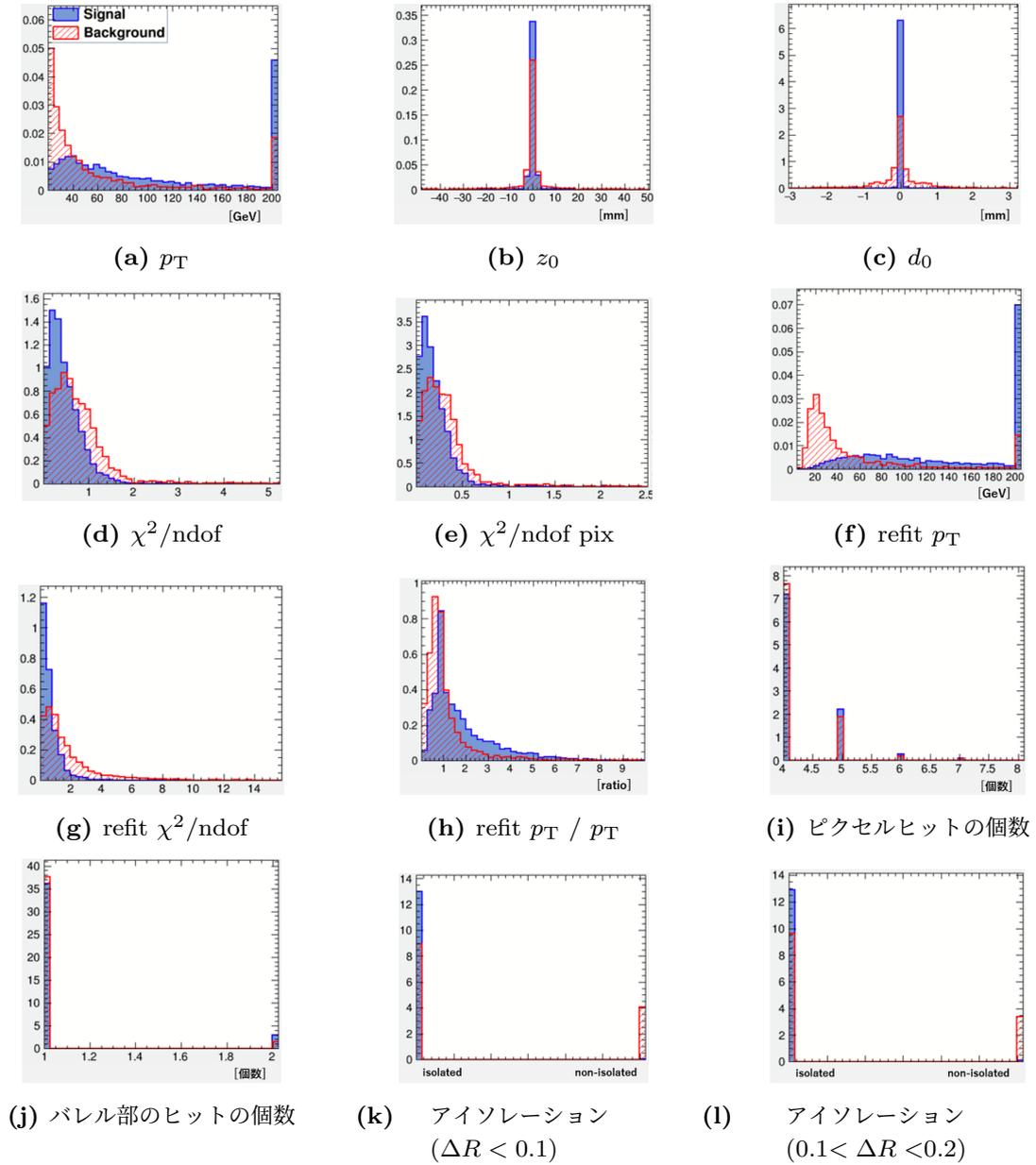


図 B.1: pix4lsct0 に使用している変数一覧

## B.2 pix4lsct1+

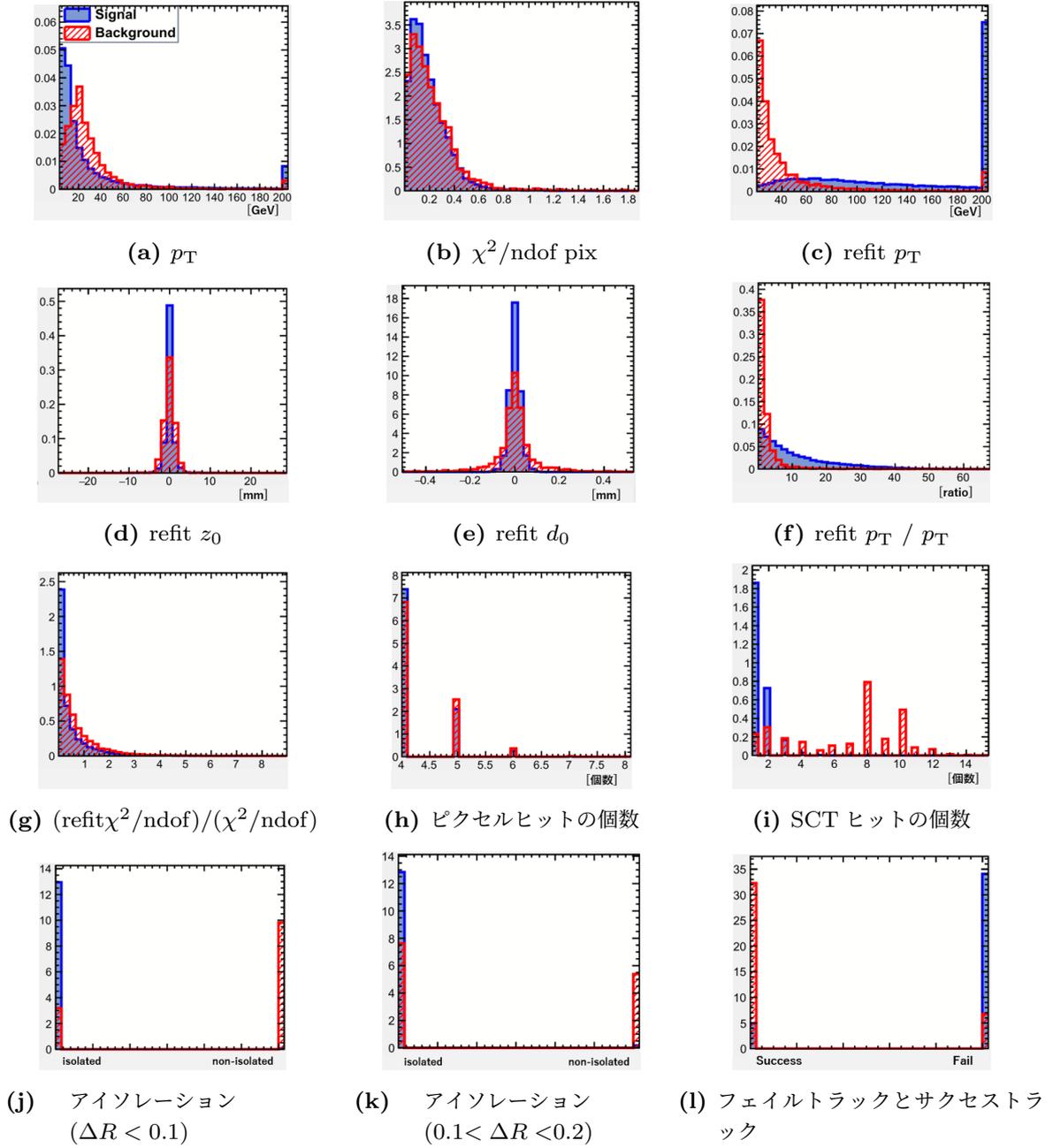


図 B.2: pix4lsct1+ に使用している変数一覧

### B.3 pix3lsct0

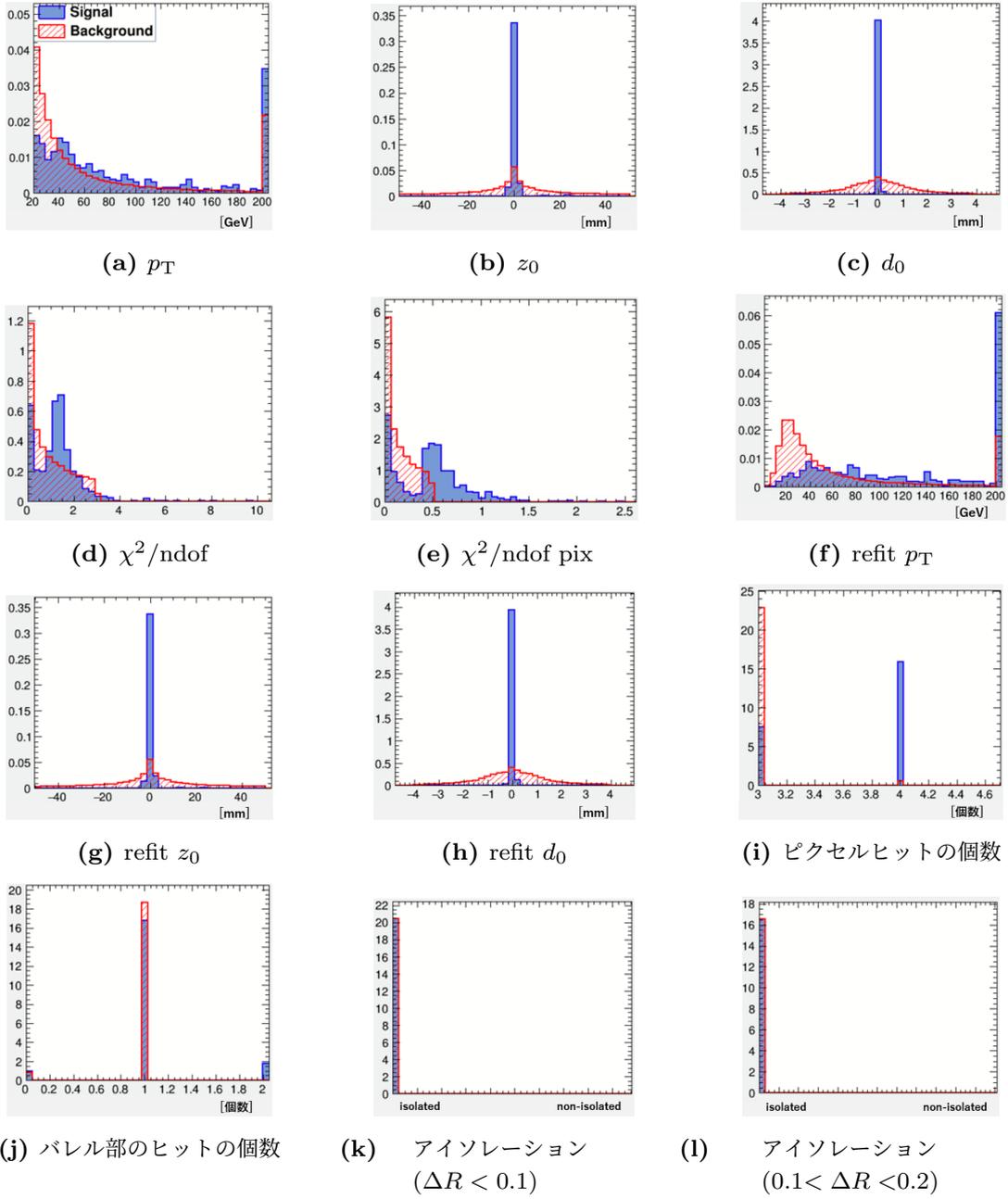


図 B.3: pix3lsct0 に使用している変数一覧

## B.4 pix3lsct1+

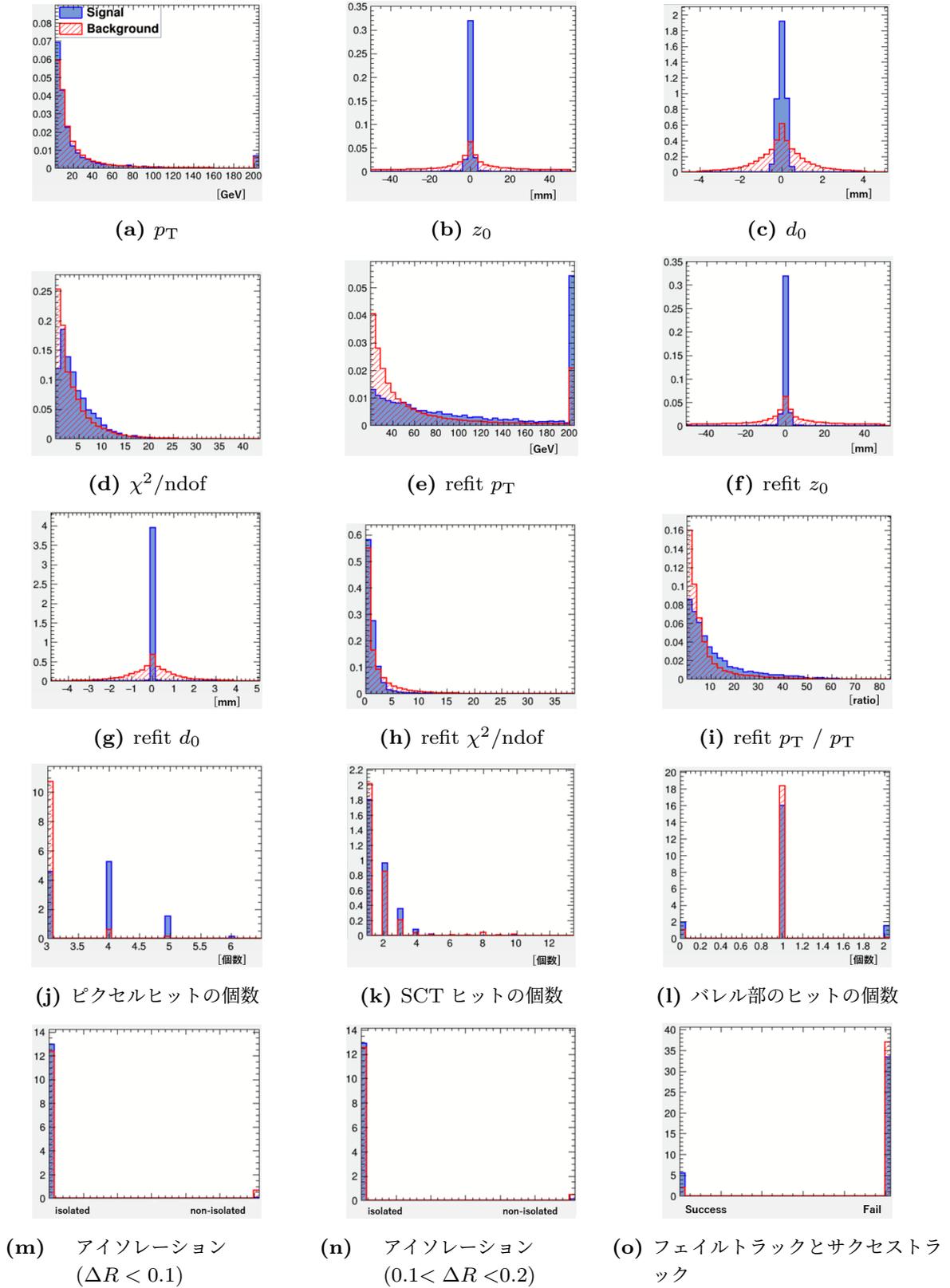


図 B.4: pix3lsct1+ に使用している変数一覧