

修士論文

国際リニアコライダーのための高精細 CCD を用いた
崩壊点検出器のシミュレーション研究
~A simulation study of a vertex detector system
using fine-pixel CCD for the ILC~

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻

森 達哉

平成 25 年

概要

国際リニアコライダー (International Linear Collider; ILC) は、250-500 GeV(アップグレードで1TeV)の重心系エネルギーを持つ高ルミノシティの電子・陽電子衝突型線形加速器である。

ILCの重要な目的の一つとして、ヒッグス粒子の結合定数の精密測定があげられる。この測定は、2012年7月にCERNのLHCで発見されたヒッグス粒子が、素粒子に質量を与えるヒッグス機構を構築するかの検証となる。結合定数を精密測定するにはヒッグス粒子がb、cクォークに崩壊したかを精度良く同定する必要がある。b、cクォークの固有崩壊長は各々400~500 μm 、100~300 μm なので、この差異を識別できる高い崩壊点分解能を持った崩壊点検出器が要求される。このため衝突点付近に配置される崩壊点検出器では分解能の高いシリコンピクセルセンサーを用いる。しかし、衝突点付近で発生するビーム由来の電子・陽電子バックグラウンドの影響でピクセル占有率が過度に上昇すると、飛跡の再構成が難しくなる。

ILCでの実験には、高い位置分解能を達成しつつ、ピクセル占有率を低く抑えた崩壊点検出器の開発が必須である。2014年現在、世界中でILCの要求を満たす崩壊点検出器の開発が進められており、日本グループは高精細 CCD (FPCCD : Fine Pixel CCD) をセンサーに用いた崩壊点検出器を開発している。FPCCDはピクセルサイズ5 μm \times 5 μm の非常に細かいピクセルのCCDイメージセンサーで、そのピクセルの細かさから非常に高い位置分解能、低いピクセル占有率を実現することが期待される。

本研究ではILCの物理パフォーマンスを向上させる手段として、FPCCD崩壊点検出器の性能をシミュレーションにより評価し、得られた結果から設計の検討と最適化を行い、フレーバータグの性能を改善することを目的とする。第1章で国際リニアコライダー計画について述べる。第2章ではILCで期待される物理と崩壊点検出器の関係について言及し、第3章で研究対象であるFPCCD崩壊点検出器を説明する。第4章では、本研究で使用したソフトウェアパッケージ(ILCSoft)の詳細を説明する。第5章では占有率の評価、クラスターによるペアバックグラウンドの除外アルゴリズムの開発について述べ、第6章でインパクトパラメータ分解能の評価について説明し、第7章でトラッキング効率の評価とFPCCD崩壊点検出器のためのトラックファインダーの開発について詳述し、最後に第8章で、フレーバータグの性能評価について説明する。

目次

第 1 章 国際リニアコライダー計画 (International Linear Collider ; ILC)	1
1.1 現代の素粒子物理学	1
1.2 ILC の加速器	2
1.2.1 ILC の電子源	2
1.2.2 陽電子源	3
1.2.3 減衰リング	3
1.2.4 主線形加速器	4
1.3 ビーム構造	5
1.4 検出器	5
1.4.1 プッシュプル方式	5
1.4.2 ILD 検出器	6
1.4.3 崩壊点検出器 (VXD)	7
1.4.4 シリコン飛跡検出システム	10
1.4.5 主飛跡検出器 (TPC)	10
1.4.6 カロリメータ	11
1.4.7 ミューオン検出器	14
1.4.8 前方検出器	15
1.5 Particle Flow Algorithm (PFA)	17
第 2 章 ILC で期待される物理と崩壊点検出器	20
2.1 フレーバータグ	20
2.2 ヒッグス機構	21
2.3 ヒッグスの物理とフレーバータグ	24
2.3.1 ヒッグスの崩壊分岐比の測定	24
2.3.2 ヒッグスの自己結合定数の測定	25
2.3.3 ヒッグスとトップクォークの湯川結合の測定	26
第 3 章 高精細 CCD (FPCCD) を用いた崩壊点検出器	28
3.1 FPCCD 崩壊点検出器	29
3.1.1 FPCCD 崩壊点検出器の構造	29
3.1.2 FPCCD 崩壊点検出器の特徴	29

第4章	ソフトウェアパッケージ ILCSoft	33
4.1	シミュレーション研究の流れ	33
4.2	FPCCD 専用のソフトウェア	33
4.2.1	FPCCDDigitizer	33
4.2.2	FPCCDClustering	34
4.3	ILD におけるトラッキングアルゴリズム	34
4.3.1	現行のトラッキングアルゴリズムの概要	34
4.3.2	SiliconTracking のアルゴリズム	35
第5章	占有率の評価とクラスターによるペアバックグラウンドの除去	42
5.1	占有率の評価	42
5.1.1	セットアップと評価方法	42
5.1.2	評価結果	43
5.1.3	結論	46
5.2	クラスターによるペアバックグラウンドの除去	46
5.2.1	セットアップ	46
5.2.2	第一種クラスターカットの説明	46
5.2.3	第二種クラスターカットの説明	50
5.2.4	第一種クラスターカット + 傾きカット + ζ 幅カット	55
第6章	インパクトパラメータ分解能の評価	57
6.1	セットアップと評価方法	57
6.2	評価結果	58
第7章	トラッキング効率の評価と新トラッキングアルゴリズムの開発	61
7.1	トラッキング効率の評価	61
7.1.1	正しく再構成されたトラックとトラッキング効率	61
7.1.2	セットアップと評価方法	62
7.1.3	評価結果	63
7.2	新トラッキングアルゴリズムの開発	64
7.2.1	現行のトラッキングの問題点と解決策	64
7.2.2	FPCCD のクラスターの形状を用いた外挿処理	69
7.2.3	FPCCDTrackFinder の開発	70
7.3	トラッキング効率の評価 (FPCCDTrackFinder の場合)	71
7.3.1	ペアバックグラウンドを考慮しない評価	71
7.3.2	ペアバックグラウンドを考慮した評価	72
7.3.3	FPCCDTrackFinder と CPU 時間	72
第8章	フレーバータグ性能評価	74
8.1	Z-pole イベントを用いたフレーバータグ性能評価	74
8.1.1	セットアップと評価方法	74

8.1.2	評価結果	75
8.2	$Z^* \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 250 GeV イベントを用いたフレーバータグ性能評価	76
8.2.1	セットアップと評価方法	76
8.2.2	評価結果	77
8.2.3	CPU 時間とメモリ使用量の比較	82
第 9 章	まとめ	84
付録 A	標準模型のラグランジアン	86
付録 B	トラックパラメターの定義	87
付録 C	ペアバックグラウンドヒットの ζ 分布と ξ 分布	90
謝辞		175

目次

1.1	ILC の全体図	2
1.2	電子源	3
1.3	陽電子源	4
1.4	ニオブ製超伝導加速空洞	4
1.5	クライオモジュール	5
1.6	ビーム構造	5
1.7	プッシュプル方式の概要	6
1.8	ILD 検出器の全体像	7
1.9	ILD 検出器の断面図	8
1.10	崩壊点検出器の断面図	8
1.11	シリコン飛跡検出器システムの全体図	10
1.12	TPC の全体図	11
1.13	ECAL の全体図	12
1.14	SiECAL(左) と ScECAL(右) の Detector Slab の断面図	13
1.15	HCAL の全体図	14
1.16	AHCAL オプションにおけるモジュール内の構成	15
1.17	SDHCAL オプションにおけるガス検出器の構造	15
1.18	前方検出器の全体図	16
1.19	LumiCal と BeamCal のレイヤーの構成	17
1.20	BeamCal に落とす電子・陽電子ペアのエネルギー分布	18
1.21	100 GeV ジェットの PFA による再構成	19
2.1	ポテンシャル V の形状	22
2.2	ヒッグス粒子との結合の強さ	25
2.3	ヒッグスの崩壊分岐比測定のための生成過程 $e^+e^- \rightarrow HZ$	26
2.4	ヒッグス粒子の自己結合測定のための生成過程 $e^+e^- \rightarrow ZHH$	27
2.5	湯川結合測定のための生成過程 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$	27
3.1	FPCCD 試作機	28
3.2	クラスターの説明	30
3.3	クラスターによる位置分解能の向上	30
3.4	シグナル由来とペアバックグラウンド由来のクラスターの違い	31
3.5	クラスター形状による外挿ミスの削減	31

4.1	FPCDDigitizer の処理	34
4.2	ILD におけるトラッキング処理	35
4.3	トラックシード生成	37
4.4	外挿処理	38
4.5	トラック同士の結合処理	39
4.6	未処理のヒットのトラックへの付け足し	40
4.7	Kalman Filter による再フィット	41
5.1	直接ペアヒットと反跳ペアヒットの時刻分布	43
5.2	クラスター内のピクセル数分布	47
5.3	クラスターの ξ 方向の長さ分布	48
5.4	クラスターの ζ 方向の長さ分布	49
5.5	$t\bar{t} \rightarrow 6jets @ 350 \text{ GeV}$ により生成された右上がりクラスターのヒット位置分布	51
5.6	ペアバックグラウンドにより生成された右上がりクラスターの位置分布	51
5.7	右上がりクラスターのカット範囲	52
5.8	ζ 幅カットの説明	53
5.9	$t\bar{t}$ イベントとペア BG のクラスターの z 座標とピクセルあたりの ζ 方向の幅	54
6.1	d_0 のガウシアンフィット ($p = 100 \text{ GeV}/c$, $\theta = 85^\circ$)	58
6.2	インパクトパラメータ分解能の評価結果	59
7.1	トラッキング効率の評価	63
7.2	(A) 外側のレイヤーのヒットを基準に処理幅を決定	66
7.3	(C) トラックパラメータからの外挿範囲の決定	68
7.4	外挿処理とクラスター形状	70
7.5	「FPCCD + FPCCDTrackFinder」対「FPCCD + 現行のトラッキング」(横運動量、ペア BG 無し)	71
7.6	「FPCCD + FPCCDTrackFinder」対「FPCCD + 現行のトラッキング」($\cos \theta$ 、ペア BG 無し)	72
7.7	FPCCD + FPCCDTrackFinder とペアバックグラウンドの影響 (横運動量)	73
7.8	FPCCD + FPCCDTrackFinder とペアバックグラウンドの影響 ($\cos \theta$)	73
8.1	フレーバータグの評価結果 (Z-pole イベント)	76
8.2	フレーバータグの評価結果 ($Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q} @ 250 \text{ GeV}$ 、ペア BG 無し)	78
8.3	フレーバータグの評価結果 ($Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q} @ 250 \text{ GeV}$ 、ペア BG 有り)	78
8.4	再構成された b-jet が含むトラック (FPCCD、ペア BG 無し)	79
8.5	再構成された b-jet が含むトラック (FPCCD、ペア BG 有り)	79
8.6	再構成された b-jet が含むトラック (CMOS、ペア BG 無し)	80
8.7	再構成された b-jet が含むトラック (CMOS、ペア BG 有り)	80

8.8	フレーバータグの評価結果 ($Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 250 GeV、ペア BG 無し)(式 (8.6) の条件込み)	81
8.9	フレーバータグの評価結果 ($Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 250 GeV、ペア BG 有り)(式 (8.6) の条件込み)	82
B.1	x-y 平面に射影されたトラック	87
B.2	s-z 平面に射影されたトラック	88
C.1	各レイヤーの ζ 分布 (250 GeV)	91
C.2	各レイヤーの ζ 分布 (350 GeV)	91
C.3	各レイヤーの ζ 分布 (500 GeV)	92
C.4	各レイヤーの ζ 分布 (1000 GeV)	92
C.5	各レイヤーの ζ 分布 (250 GeV、直接ペア)	93
C.6	各レイヤーの ζ 分布 (350 GeV、直接ペア)	93
C.7	各レイヤーの ζ 分布 (500 GeV、直接ペア)	94
C.8	各レイヤーの ζ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	94
C.9	各レイヤーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	95
C.10	各レイヤーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	95
C.11	各レイヤーの ζ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	96
C.12	各レイヤーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	96
C.13	各レイヤーの ξ 分布 (250 GeV)	97
C.14	各レイヤーの ξ 分布 (350 GeV)	97
C.15	各レイヤーの ξ 分布 (500 GeV)	98
C.16	各レイヤーの ξ 分布 (1000 GeV)	98
C.17	各レイヤーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)	99
C.18	各レイヤーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)	99
C.19	各レイヤーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)	100
C.20	各レイヤーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	100
C.21	各レイヤーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	101
C.22	各レイヤーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	101
C.23	各レイヤーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	102
C.24	各レイヤーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	102
C.25	レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV)	103
C.26	レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV)	103
C.27	レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)	104
C.28	レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、直接ペア)	104
C.29	レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	105
C.30	レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	105
C.31	レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV)	106
C.32	レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV)	106

C.33	レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)	107
C.34	レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、直接ペア)	107
C.35	レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	108
C.36	レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	108
C.37	レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV)	109
C.38	レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV)	109
C.39	レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)	110
C.40	レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、直接ペア)	110
C.41	レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	111
C.42	レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	111
C.43	レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV)	112
C.44	レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV)	112
C.45	レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)	113
C.46	レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、直接ペア)	113
C.47	レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	114
C.48	レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	114
C.49	レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV)	115
C.50	レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV)	115
C.51	レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)	116
C.52	レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、直接ペア)	116
C.53	レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	117
C.54	レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	117
C.55	レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV)	118
C.56	レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV)	118
C.57	レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)	119
C.58	レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、直接ペア)	119
C.59	レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	120
C.60	レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)	120
C.61	レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV)	121
C.62	レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV)	121
C.63	レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)	122
C.64	レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、直接ペア)	122
C.65	レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	123
C.66	レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	123
C.67	レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV)	124
C.68	レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV)	124
C.69	レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)	125
C.70	レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、直接ペア)	125
C.71	レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	126
C.72	レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	126

C.73	レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV)	127
C.74	レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV)	127
C.75	レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)	128
C.76	レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、直接ペア)	128
C.77	レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	129
C.78	レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	129
C.79	レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV)	130
C.80	レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV)	130
C.81	レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)	131
C.82	レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、直接ペア)	131
C.83	レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	132
C.84	レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	132
C.85	レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV)	133
C.86	レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV)	133
C.87	レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)	134
C.88	レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、直接ペア)	134
C.89	レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	135
C.90	レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	135
C.91	レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV)	136
C.92	レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV)	136
C.93	レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)	137
C.94	レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、直接ペア)	137
C.95	レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	138
C.96	レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)	138
C.97	レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)	139
C.98	レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV)	139
C.99	レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)	140
C.100	レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、直接ペア)	140
C.101	レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	141
C.102	レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	141
C.103	レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)	142
C.104	レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV)	142
C.105	レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)	143
C.106	レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、直接ペア)	143
C.107	レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	144
C.108	レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	144
C.109	レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)	145
C.110	レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV)	145
C.111	レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)	146
C.112	レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、直接ペア)	146

C.113	レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	147
C.114	レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	147
C.115	レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)	148
C.116	レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV)	148
C.117	レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)	149
C.118	レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、直接ペア)	149
C.119	レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	150
C.120	レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	150
C.121	レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)	151
C.122	レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV)	151
C.123	レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)	152
C.124	レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、直接ペア)	152
C.125	レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	153
C.126	レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	153
C.127	レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)	154
C.128	レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV)	154
C.129	レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)	155
C.130	レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、直接ペア)	155
C.131	レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	156
C.132	レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、反跳ペア)	156
C.133	レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV)	157
C.134	レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV)	157
C.135	レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	158
C.136	レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	158
C.137	レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	159
C.138	レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	159
C.139	レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV)	160
C.140	レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV)	160
C.141	レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	161
C.142	レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	161
C.143	レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	162
C.144	レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	162
C.145	レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV)	163
C.146	レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV)	163
C.147	レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	164
C.148	レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	164
C.149	レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	165
C.150	レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	165
C.151	レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV)	166
C.152	レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV)	166

C.153	レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	167
C.154	レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	167
C.155	レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	168
C.156	レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	168
C.157	レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV)	169
C.158	レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV)	169
C.159	レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	170
C.160	レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	170
C.161	レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	171
C.162	レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	171
C.163	レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV)	172
C.164	レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV)	172
C.165	レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	173
C.166	レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、直接ペア)	173
C.167	レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	174
C.168	レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)	174

表目次

1.1	各実験におけるインパクトパラメータ分解能の典型的パラメータ	9
5.1	各レイヤーの占有率 (250 GeV)	43
5.2	各レイヤーの占有率 (350 GeV)	43
5.3	各レイヤーの占有率 (500 GeV)	44
5.4	各レイヤーの占有率 (1 TeV)	44
5.5	各レイヤーのヒット数密度 (250 GeV)	44
5.6	各レイヤーのヒット数密度 (350 GeV)	44
5.7	各レイヤーのヒット数密度 (500 GeV)	45
5.8	各レイヤーのヒット数密度 (1 TeV)	45
5.9	第一種クラスターカット	49
5.10	第一種クラスターカットによるクラスター残存率	49
5.11	第一種クラスターカットによるピクセルヒット残存率	50
5.12	第一種クラスターカット + 傾きカットによるクラスター残存率	52
5.13	第一種クラスターカット + 傾きカットによるピクセルヒット残存率	53
5.14	第一種クラスターカット + ζ 幅カットによるクラスター残存率	55
5.15	第一種クラスターカット + ζ 幅カットによるピクセルヒット残存率	55
5.16	全カット後のクラスター残存率	56
5.17	全カット後のピクセルヒット残存率	56
6.1	CMOS の性能設定	58
6.2	FPCCD の性能設定	59
8.1	レイヤー毎の読み出しに寄与するバンチ衝突の数	77
8.2	各セットアップ毎の CPU 時間と最大メモリ消費量	82

第1章 国際リニアコライダー計画 (International Linear Collider ; ILC)

1.1 現代の素粒子物理学

現代の素粒子物理学は「標準模型」と呼ばれる素粒子の性質とそれらの相互作用を記述する理論模型をベースにして発展してきた。標準模型は様々な実験によりその正当性が高い精度で確認されており、現在最も正確な理論といえる。この理論ではクォークやレプトン、ゲージボソンはゲージ対称性によりもともとは質量を持たないが、その自発的対称性の破れにより質量を持つ。この質量獲得の機構をヒッグス機構と呼び、標準理論の根幹を成している。このヒッグス粒子と思われる新粒子が2012年7月4日、CERNのLHC(Large Hadron Collider)で発見され、後続の実験結果はその新粒子がヒッグス粒子であることを支持しているが、その粒子がヒッグス機構を持つことを示すまでには至っていない。ヒッグス機構を検証するためにはヒッグス粒子の精密測定が不可欠であり、それを実現することが現在の素粒子物理学の最重要課題である。また、近年の実験により標準理論では説明できない現象も観測されている。その中でも最も注目されているものがダークマターの存在である。ダークマターとは電磁相互作用をしない未知の物質である。銀河や星を構成する通常の物質が宇宙全体の4%程度であるのに対し、ダークマターは約20%を占めることがわかっている。標準理論ではダークマターの候補となり得る粒子は存在しないため、標準理論を超えた新しい物理模型の構築が必要である。上記の課題を実験的に検証するためには、粒子を高いエネルギーに加速させ衝突させる加速器が必要となる。LHCがヒッグス機構を示せていないのは、LHCが陽子と陽子を衝突させるハドロンコライダーであることに起因する。ハドロンコライダーは非常に高いエネルギーを生むことができる(LHCの場合2013年運行時の重心系エネルギーは8 TeV)。しかし、内部構造をもったハドロンを衝突させるためバックグラウンドが多く発生するため精密測定は難しい。一方で電子陽電子を衝突させるレプトンコライダーもある。レプトンコライダーは内部構造を持たない電子陽電子の衝突によりバックグラウンドが少ないため精密測定が可能である。よってヒッグス粒子や新粒子の性質を明らかにするためにはレプトンコライダーが不可欠である。しかし質量の軽い電子・陽電子を円形加速器で加速するとシンクロトロン放射によりビームのエネルギー損失が生じ、高い衝突エネルギーを実現することは難しい。そこで提案されているのが、粒子を直線的に加速させる国際リニアコライダー(International Linear Collider ; ILC)実験である。ILC実験は電子・陽電子衝突の線形加

速器を用いた次世代の高エネルギー実験である。加速器は、全長が約 30 km で電子と陽電子を直線的に加速し正面衝突させる。重心系エネルギーは $E_{CM} = 250 \sim 500 \text{ GeV}$ の間で調整ができ、アップグレードで 1 TeV まで向上する。ピーク luminositi は 500 GeV と 1 TeV のビームランでそれぞれ $1.8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ と $3.6 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を目指している。電子・陽電子のエネルギーや偏極を指定することができるので、崩壊モードによってはバックグラウンド事象を抑制し、シグナルの結合定数の高精度での測定が可能である。バックグラウンド事象が少ない環境でヒッグス粒子やトップクォークの精密測定、標準理論を超える物理の検証、暗黒物質の候補となる粒子の探索などが期待されている。以下では ILC の加速器と測定器について述べる。

1.2 ILC の加速器

加速器は大きく分けて電子・陽電子源 (Electron・Positron Source)、減衰リング (Damping Ring)、主線形加速器 (Main Linac) の 3 つの要素から構成される。図 1.1 はその全体図である。第一に電子・陽電子源で電子・陽電子を生成、これをビームとして利用し、第二に減衰リングにおいてビームの広がりを抑える。最後に主線形加速器でビームを一気に加速する。以下では、これら 3 つの要素それぞれについて説明する [1] [2] [4] [5]。

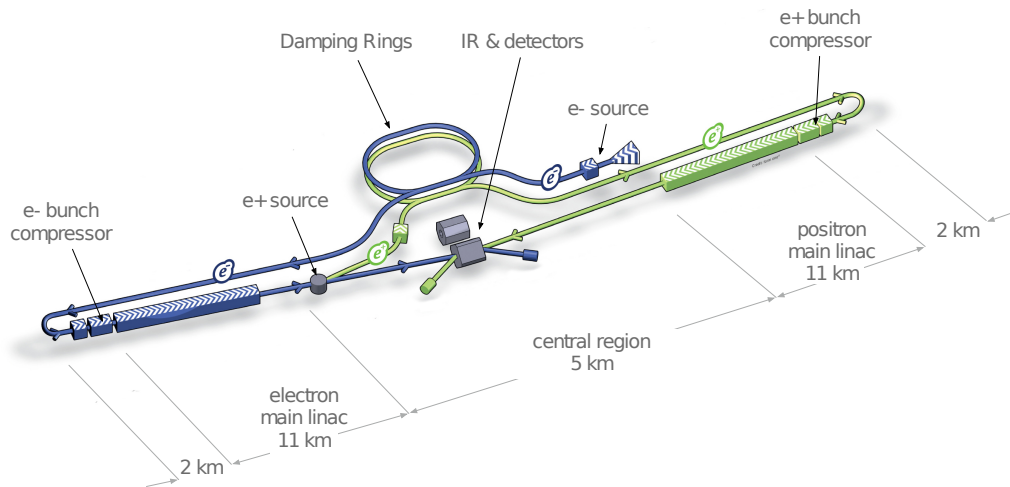


図 1.1: ILC の全体図

1.2.1 ILC の電子源

図 1.2 に示す電子源では、電子銃の中にある GaAs フォトカソードに偏極したレーザーを照射し、偏極した電子ビームを生成する。そしてこのビームは常伝導の加速管を用いて 75 MeV まで加速させ、同時にバンチ化される (バンチについては 1.3 節を参

照)。その後、超電導の加速管で 5 GeV まで加速させる。最後に超電導ソレノイドでスピンの方向を進行方向に対し垂直にし、ビームを圧縮して減衰リングに送る。現在、電子ビームの偏極は 90 % を目標値としている。

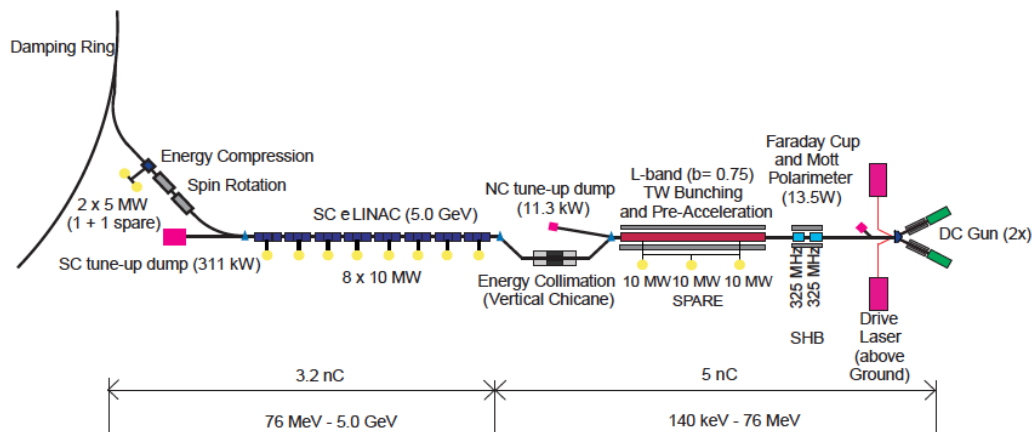


Figure 2.7. Schematic View of the Polarised Electron Source.

図 1.2: 電子源

1.2.2 陽電子源

図 1.3 に示す陽電子源では、電子源で生成された電子ビームを利用する。電子源で生成された電子ビームは、主線形加速器で加速され、螺旋形状の超電導アンジュレーターを通過する。アンジュレーターでは、磁場の向きを交互に変えることにより制動放射から 10 MeV ~ 30 MeV 程のエネルギーを持つ光子を生成する。その後、電子ビームは再び主線形加速器に戻される。一方、光子は厚み 0.4 放射長 (1.4 cm 相当) の Ti 合金の円盤に衝突し、電磁シャワーが生じて大量の電子・陽電子が生成される。続いて磁場を用いて電子と残った光子は捨てて、陽電子だけを取り出す。取り出した陽電子は常伝導の加速管で 400 MeV まで加速させる。最後に、電子源と同じように超電導の加速管で 5 GeV まで加速させ、次に超電導ソレノイドでスピンの方向を進行方向に垂直にし、ビームを圧縮して減衰リングに送る。現在、初期の陽電子ビームの偏極は 30 % を目標にしており、アップグレードにより最終的には 60 % まで上げる予定である。

1.2.3 減衰リング

減衰リングは高ルミノシティを実現するため電子・陽電子のビームの拡がりを抑制する。電子・陽電子源で生成された 5 GeV の電子・陽電子ビームは周長 3.2 km の減衰リングに入射し、約 200 ms の間周回する。周回している間に、ビーム内の各電子・陽

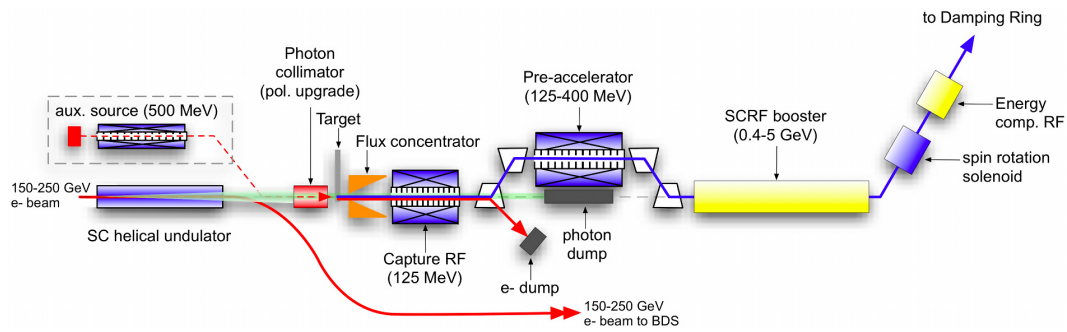


図 1.3: 陽電子源

電子は制動放射によりエネルギーを失うが、進行方向には一定の割合で加速される。結果としてビームの横方向の運動量が減衰されビームの拡がりを抑えることができる。減衰リングから取り出されたビームは 15 GeV まで加速された後、主線形加速器に入射される。

1.2.4 主線形加速器

ILC の主線形加速器は減衰リングから取り出されたビームを 15 GeV から 250 GeV まで加速させる ($E_{CM} = 500$ GeV の場合)。このビーム加速を実現するには平均加速勾配が 31.5 MV/m 必要である。これを実現するため、各主線形加速器に図 1.4 に示す 9 個のセルから成り立つ約 1 m のニオブ製超伝導加速空洞を約 7400 個用いる。この加

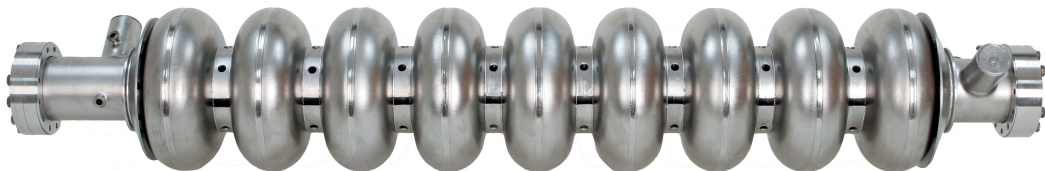


図 1.4: ニオブ製超伝導加速空洞

速空洞は 1.3 GHz の高周波を生成し、絶対温度 2 K で動作する。低温環境を構築するクライオモジュールは図 1.5 のように設計されている。なお、図 1.5 の中心部の四重極磁石はビームを収束させる目的で設置する。

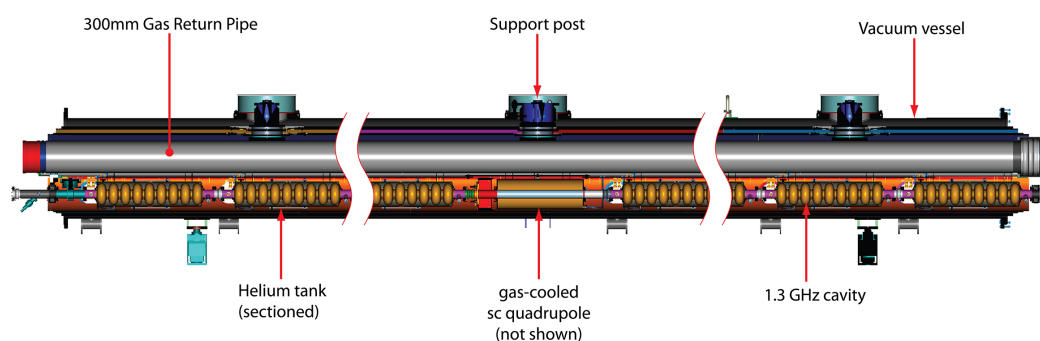


図 1.5: クライオモジュール

1.3 ビーム構造

ILC のビーム構造は電子、又は陽電子をバンチと呼ばれる塊にして、図 1.6 のように配置させる。1 ms の間に多数のバンチが入射され、その後 199 ms が経過するまでは次のバンチは入射しない。この 1 ms の間に流れ込んでくるバンチ全体はトレインと呼び、バンチ数は重心系エネルギー 500 GeV までのビームランでは 1 トレインあたり 1312 バンチ、1 TeV でのビームランでは 2450 バンチとなる。トレイン間隔が広いことを利用して、イベントトリガー無しのデータ読み出しや、検出器電気回路のパルス駆動による熱発生抑制などを行う（パルス運転になるのは、主線形加速器に高勾配の高周波を印可するための加速器側の事情による）。

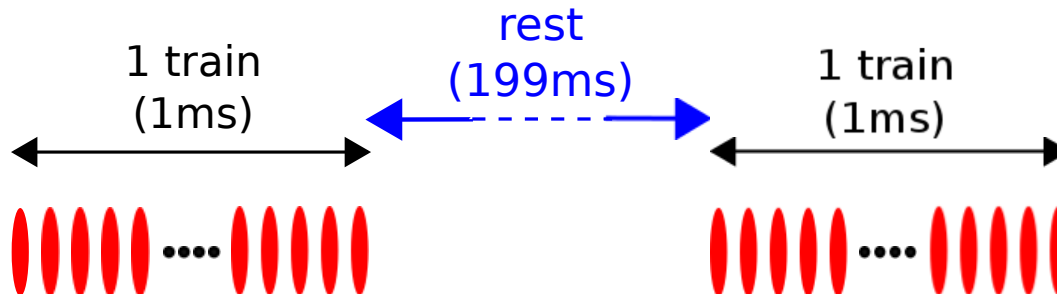


図 1.6: ビーム構造

1.4 検出器

1.4.1 プッシュプル方式

2014 年現在、ILC のための 2 つの検出器はプッシュプル方式で運転する予定である。プッシュプル方式とは、図 1.7 のように、2 つの検出器を並べて設置し、交互に一方をビームライン上に設置、もう片方をガレージに置き互い違いにデータを収集する手法のことである [1]。2 つの検出器を用いるのは、実験結果のクロスチェックや開発グ

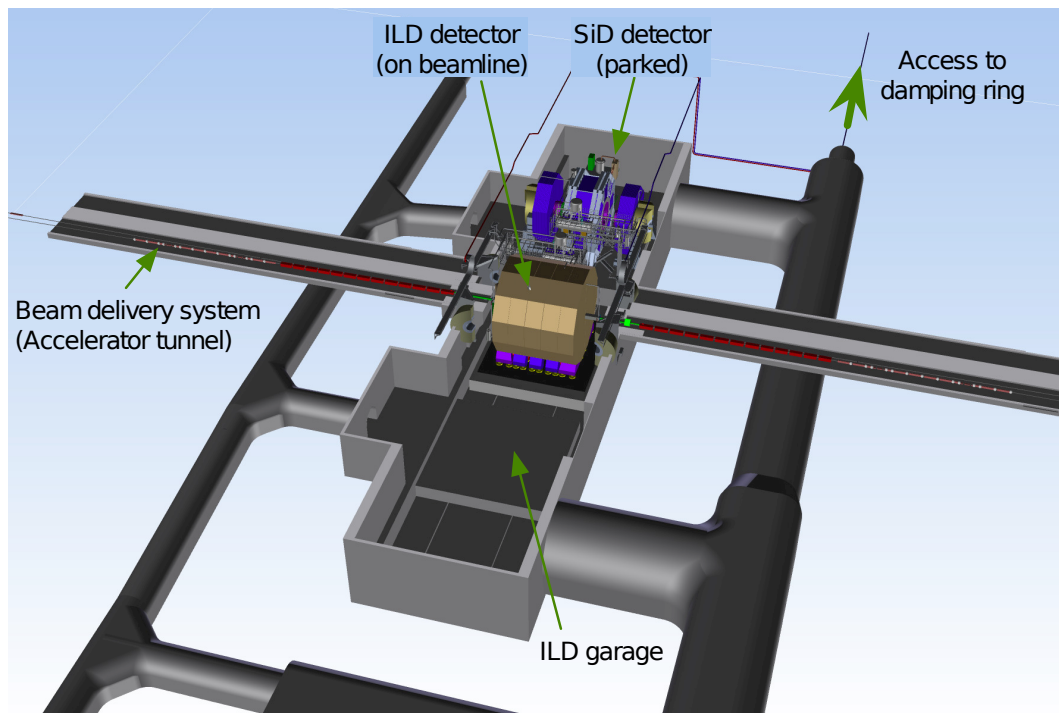


図 1.7: プッシュプル方式の概要

ループ間競争による技術開発促進のためである。また、ガレージに置かれる検出器はその間にメンテナンスを行い、ビームライン上の検出器はデータを取り続けられるため効率的にデータを貯められる。この2つの検出器はILD(International Large Detector)、SiD(Silicon Detector)と呼ばれている。以降のページでは、私はILD検出器の開発をしているのでILDについてだけ記述する [1][3] [4] [5]。

1.4.2 ILD 検出器

ILD 検出器 (図 1.8、図 1.9) は汎用型衝突実験検出器であり、Particle Flow Algorithm (PFA) と呼ばれるジェットエネルギー再構成アルゴリズムを最適化するように設計されている。ILD 検出器内の主な構成要素は衝突点に近いものから、崩壊点検出器 (Vertex Detector; VXD)、シリコン内部飛跡検出器 (Silicon Inner Tracker; SIT)、中央飛跡検出器 (Time Projection Chamber; TPC)、電磁カロリメータ (Electromagnetic Calorimeter; ECAL)、ハドロンカロリメータ (Hadronic calorimeter; HCAL) である。これらの検出器は 3.5 T のソレノイド内に格納されている。以下、ILD 検出器を構成する各検出器について説明する。

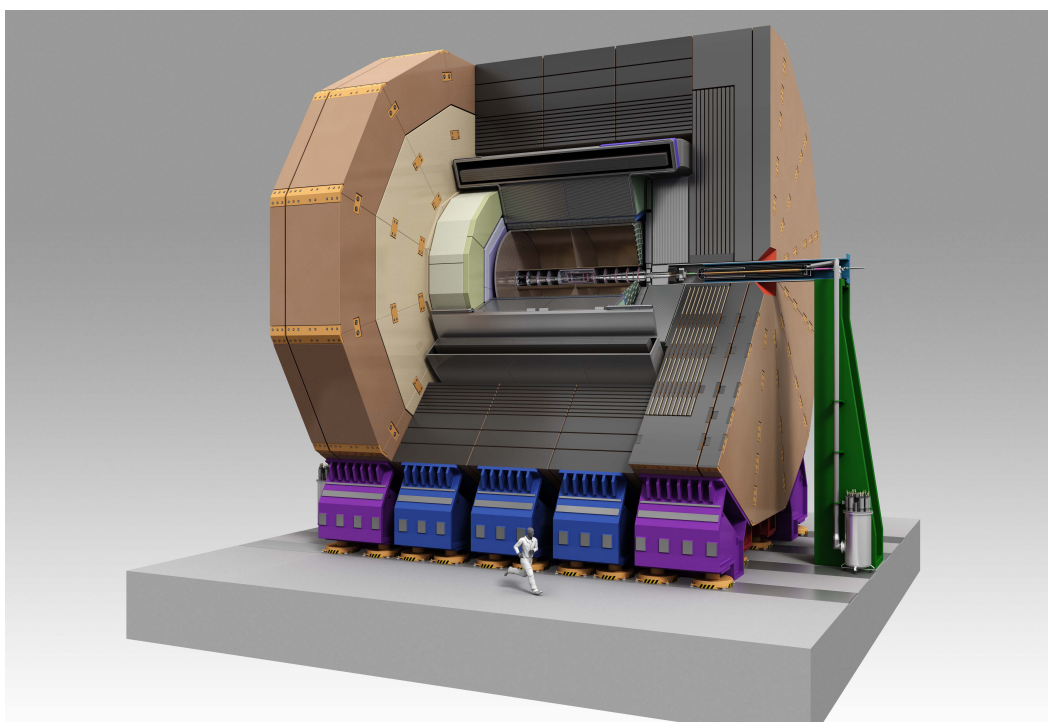


図 1.8: ILD 検出器の全体像

1.4.3 崩壊点検出器 (VXD)

ILC 実験の多くの物理解析で要求される高精度の b 、 c クォークの同定 (フレーバータグ) は粒子の崩壊点の測定精度に大きく依存する。高精度なフレーバータグの実現のため、崩壊点検出器 (VXD) は粒子の崩壊点を精度よく測定する重要な役割を果たす。崩壊点を精度良く測定するために、ILD 測定器の構成要素の内、衝突点に最も近い場所に設置され、位置分解能の高いピクセル型のシリコン半導体が有感層に用いられる。図 1.10 は VXD 全体の断面図 (4分の1) で、左図がビーム軸に平行な方向、右図がビーム軸に垂直な方向から見た図である。図中の赤い線が粒子に有感な層であり、1~3 の各レイヤーの表裏に有感層が設置されることが分かる。このように設置された有感層をダブルトレイヤーと呼ぶ。ダブルトレイヤーの利点は、粒子がダブルトレイヤーを通過したときに残す2つの通過点をベクトルとしてみなすことができ、粒子の飛跡再構成に有用なことである。以後、本論文ではダブルトレイヤーの表裏にあるレイヤーを別々のレイヤーとみなし、内側からレイヤー 0, 1, 2, 3, 4, 5 と呼ぶことにする。

崩壊点の検出原理の基本は、崩壊してできた多数の粒子の飛跡を再構成し、その内2つ以上の飛跡が重なる点を崩壊点として測定する。このため崩壊点分解能は、再構成された飛跡の精度を表すインパクトパラメータ分解能に大きく依存する。ILC で探索する物理のために要求される飛跡のインパクトパラメータ分解能 ($\sigma_{r\phi}$) は次式で表

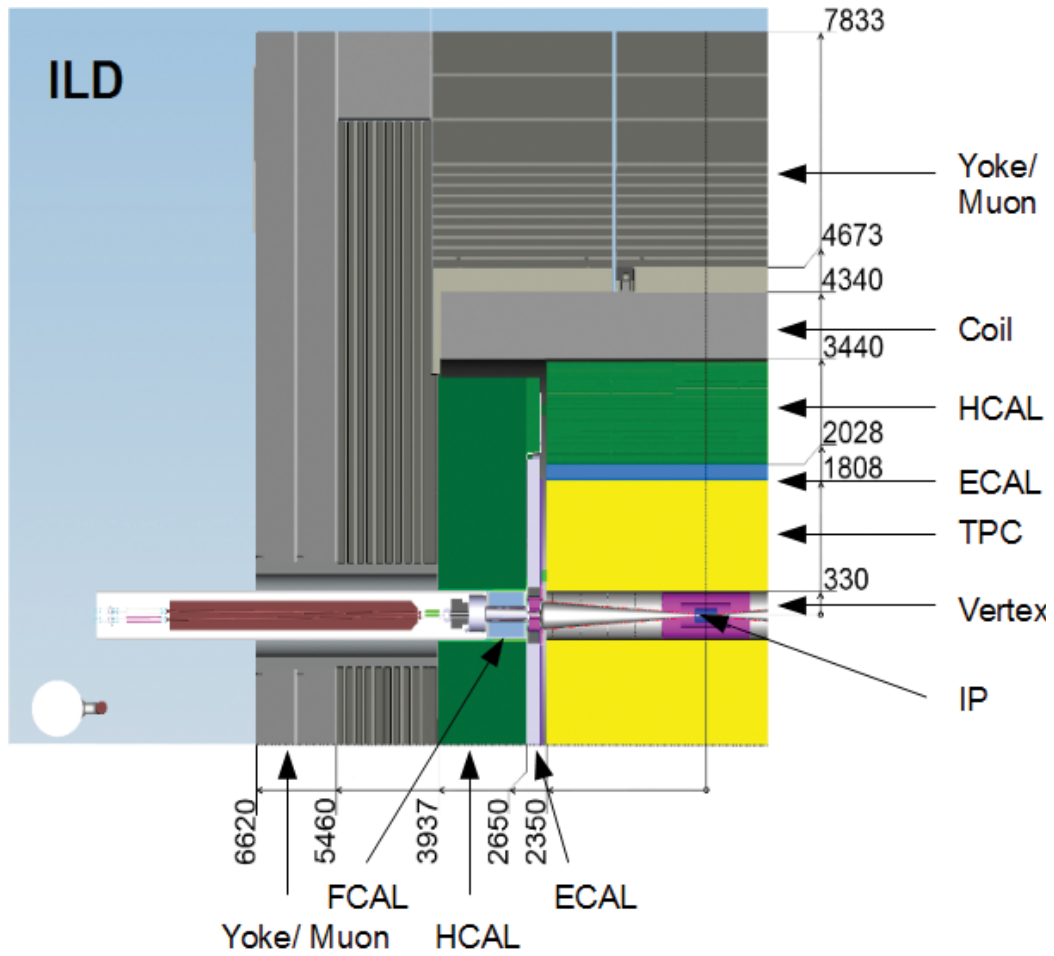


図 1.9: ILC 検出器の断面図

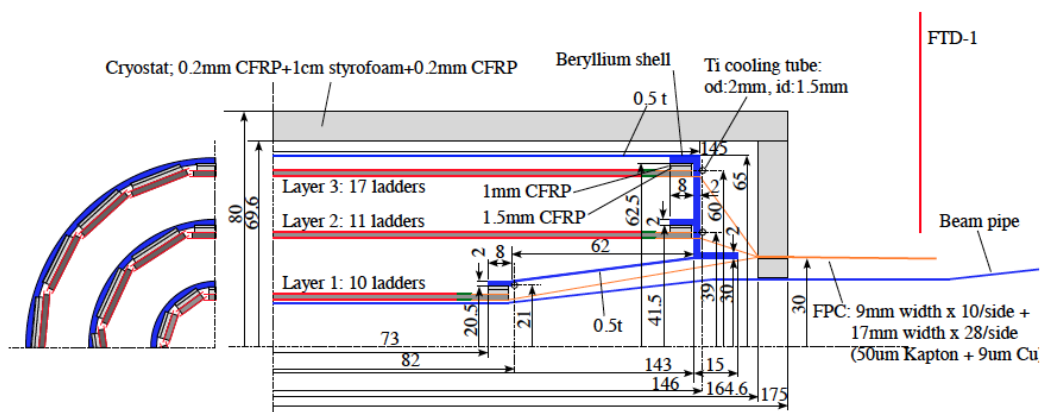


図 1.10: 崩壊点検出器の断面図

表 1.1: 各実験におけるインパクトパラメータ分解能の典型的パラメータ

実験	a [μm]	b [$\mu\text{m} \cdot (\text{GeV}/c)$]
LEP	25	70
LHC	12	70
ILC	5	10

すことができる。

$$\sigma_{r\phi} = a \oplus \frac{b}{p\beta \sin^{3/2} \theta} \quad [\mu\text{m}] \quad (1.1)$$

ここで $\beta = \frac{v}{c}$ 、 p は運動量の大きさ [GeV/c]、 θ は粒子発生時における進行方向と磁場方向との間の角度である。第一項は粒子の運動量に依存しない項であり検出器の分解能に依存する。第二項は多重クーロン散乱による分解能の低下の効果を表し、低運動量で顕著である。ILC で要求される性能は $a = 5$ 、 $b = 10$ であり、表 1.1 に示すように他の実験と比較しても非常に優れた精度が求められている。要求性能を満たすために、可能な限りビームラインと有感層の間の距離を短くすればいいが、電子・陽電子ペアバックグラウンドによる占有率との兼ね合いもあって限度がある。ペアバックグラウンドとは、VXD において最も支配的な背景事象であり、ビームバンチ同士の衝突により生じる低エネルギーの電子・陽電子のことを指す。現在の VXD の設計 (図 1.10) では、衝突点とレイヤー 0 の距離は 16 mm と非常に短く、膨大なペアバックグラウンドがレイヤーを通過する。標準的なピクセルサイズ ($25 \times 25 \mu\text{m}^2$) のセンサーで 1 トレイン分のデータを蓄積すると、全ピクセル数と粒子の通過により反応したピクセル数の割合である「ピクセル占有率」が 10% を越えてしまう。このような条件では観測したいシグナルとペアバックグラウンドを区別することが難しく、粒子の飛跡の再構成が困難となる。飛跡を正しく再構成するためにはピクセル占有率を 2~3% 以下に抑える必要がある。ILC の要求性能を満たす技術は確率しておらず、世界各国で技術確立に向けた研究開発が進んでいる。現在、この問題に対する解決策として以下の 2 つの方針が考えられている。

- (1). トレインが衝突している間にデータを複数回高速で読み出す。
- (2). ピクセルサイズを小さくする。

日本グループ以外は (1) の 1 トレイン分のヒット情報を 20~200 バンチ衝突毎に分割して読み出すことでピクセル占有率を下げる方法を採用している。一方、我々日本グループは (2) の高精細 CCD をセンサーに用いてピクセル占有率を抑える方針を採っている。この高精細 CCD (FPCCD; Fine Pixel CCD) 崩壊点検出器に関しては第 3 章で詳しく説明する [6]。

1.4.4 シリコン飛跡検出システム

ILD のシリコン飛跡検出システムは各検出器の測定情報の同期、粒子の運動量測定精度の向上のために用いられる。シリコン内部飛跡検出器 (SIT)、シリコン外部飛跡検出器 (SET)、前方飛跡検出器 (FTD)、エンドキャップ飛跡検出器 (ETD) で構成され、それぞれ図 1.11 のように設置される。シリコン飛跡検出システムはバンチ毎にデータを読む出せるので、単一バンチのデータの読み出しができない TPC や VXD の飛跡から着目するイベントバンチの飛跡を選び出すために活用される。また、SIT、SET の $R-\phi$ 方向の空間分解能は $7\mu\text{m}$ と優れており、また図 1.11 にあるように SIT と SET は動径方向に大きく離れているため粒子の運動量測定精度を向上させる。

また、ビーム軸に近い前方領域に飛来する粒子の検出のために FTD、ETD が使われる。ETD は TPC とエンドキャップ型のカロリメータの間に設置され、この2つの検出器の調整、同期のために用いられる。また ETD も $R-\phi$ 方向の空間分解能が $7\mu\text{m}$ と優れているため粒子の運動量測定精度を向上させる。FTD は超前方領域に飛来する粒子を捉えるために用いる。全部で7つのディスク型のシリコン検出器はビームパイプに巻き付くように設置される。同様に VXD とエンドキャップ型のカロリメータ間の情報を繋ぐために用いる。また、ビーム衝突点に近い2つのディスクの $R-\phi$ 方向の位置分解能は $3\sim 6\mu\text{m}$ 、残りの5つのディスクは $7\mu\text{m}$ と優れており、前方方向に飛来する粒子の運動量測定精度を向上させる。

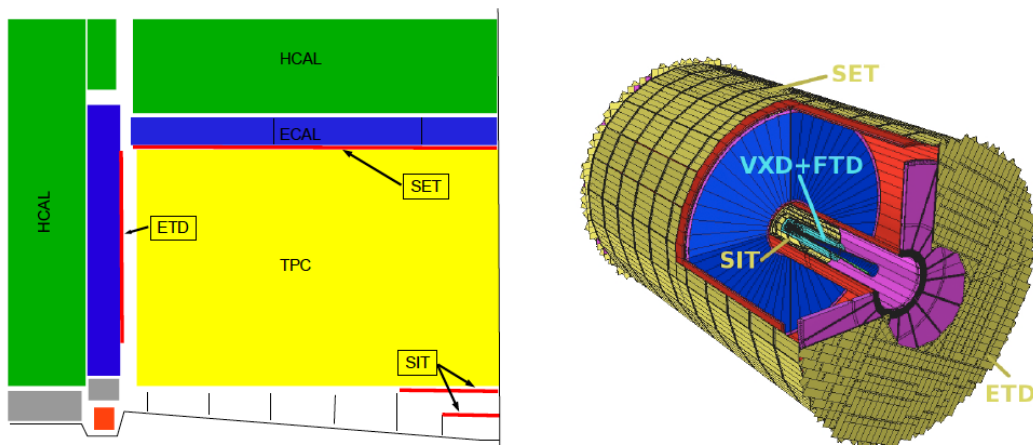


図 1.11: シリコン飛跡検出器システムの全体図

1.4.5 主飛跡検出器 (TPC)

TPC は荷電粒子の飛跡を 3 次元的に再構成するためのガス検出器である (図 1.12)。TPC にはガスが充満しており、荷電粒子が通ると陽イオンと電子に電離する。この電離した電子はビーム軸に対し平行な向きに掛けられている一様電場によりエンドプレート方向にドリフトする。なお、検出器中の磁場もビーム軸に対し平行になってい

るので、ドリフト方向に垂直な方向の拡散は小さい。TPC の端に達した電子は、エンドプレートにある micro-pattern gaseous detector (MPGD) により電子雪崩を起こし、信号として取り出される。この時に要したドリフト時間と MPGD での 2 次元パターンから、粒子の軌道が 3 次的に再構成される。ガスを用いた TPC は物質量が少ないため、TPC の外側にあるカロリメータの測定精度への影響が少ない。また、TPC 中での粒子のエネルギー損失 dE/dx から粒子識別が可能であるため、物理解析に重要な情報を得ることができる。TPC には

$$\sigma(1/P_T) \approx 10^{-4}/(\text{GeV}/c) \quad (1.2)$$

の横運動量分解能、5% 以下の dE/dx 分解能が要求されている。なお横運動量は $P_T \equiv \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$ で定義される (x-y 平面は磁場方向に垂直)。

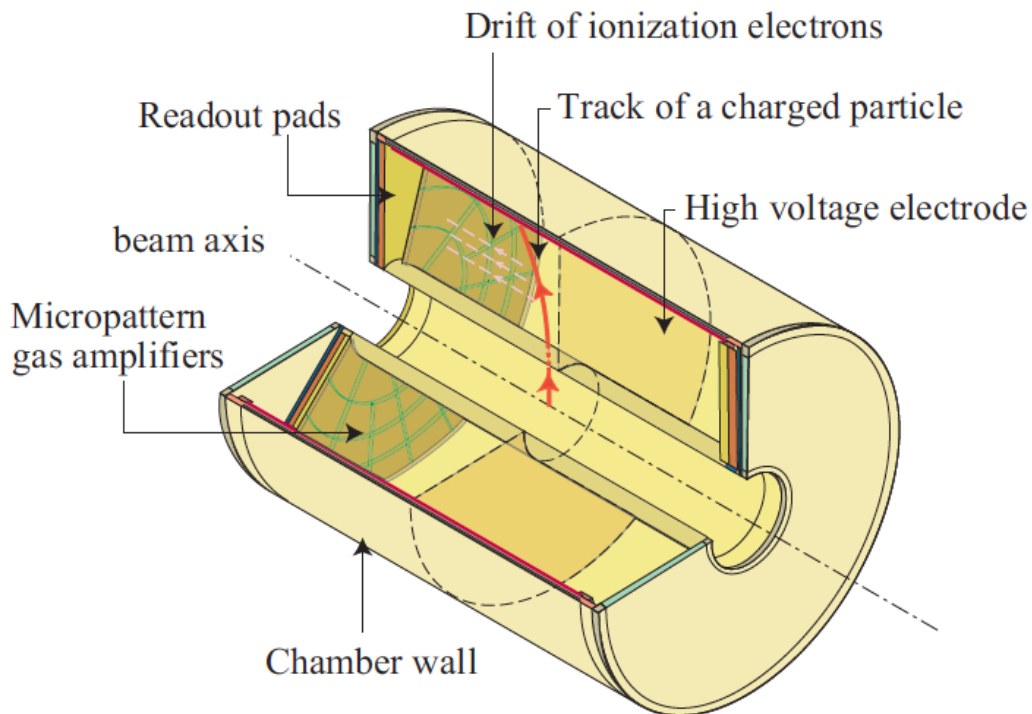


図 1.12: TPC の全体図

1.4.6 カロリメータ

カロリメータは粒子と物質の相互作用により生じるシャワーを利用して粒子のエネルギーを測定する。ILD では電磁シャワーを測定する電磁カロリメータ (ECAL) とハドロンシャワーを測定するハドロンカロリメータ (HCAL) が搭載される。それぞれバレル、2つのエンドキャップから構成されており、ECAL の外側を覆うように HCAL

が配置される。カロリメータは後述する Particle Flow Algorithm (PFA) のために最適化されている。PFA ではシャワーを詳細に再構成するため、カロリメータには高いエネルギー分解能に加え、高性能なパターン認識能力も要求される。また PFA の性能を十分発揮するために、カロリメータより内側の物質量を極力減らし、コイルはカロリメータの外側に置かれる。以下 ECAL と HCAL に関してそれぞれ説明する。

1.4.6.1 電磁カロリメータ (ECAL)

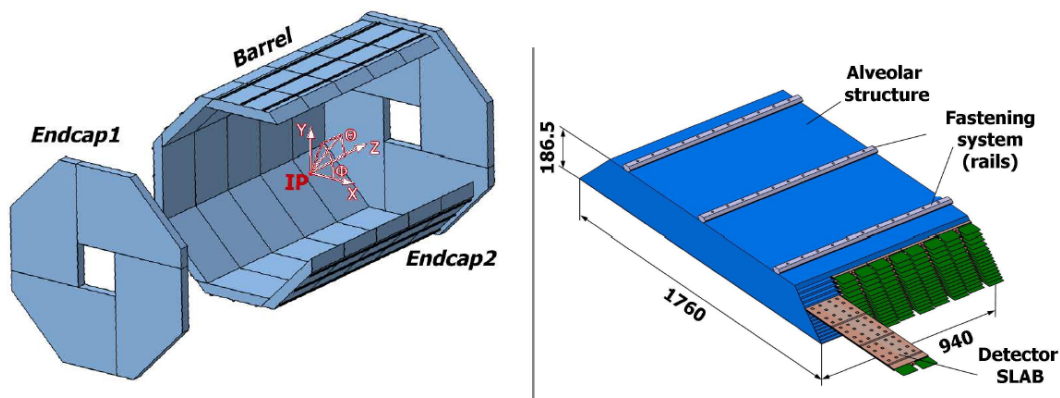


図 1.13: ECAL の全体図

ECAL の役割は光子と電子のエネルギーを測定することである。図 1.13 は ECAL の全体図と、ECAL を構成するモジュールである。ECAL に要求されるセル・サイズ、小型化、粒子分解能の観点から、吸収剤には放射長とモリエール半径の小さいタングステン (放射長: $X_0 = 3.5 \text{ mm}$ 、モリエール半径: $R_M = 19 \text{ mm}$) が使われる。放射長は粒子が物質中を進む際にエネルギーが $1/e$ (ここでの e はネピア数) に減少する長さのことである。モリエール半径はシャワーの横方向の広がりを表わし、シャワーの全エネルギーの 90% が収まる範囲の半径を表わす。吸収剤にタングステンをを用いることにより、厚み 20 cm で約 $24X_0$ と小型ながら十分な放射長を得られ、鉛の場合に比べ複数発生する電磁シャワーをよく分離できる。

次に ECAL のセンサー部分について説明する。図 1.14 は、左図がシリコンセンサーを用いた読み出しレイヤー (SiECAL) を使用するオプション、右図がシンチレータを用いた読み出しレイヤー (ScECAL) を使用するオプションにおける、Detector Slab (図 1.13 参照) の断面図を表している。SiECAL の 2 つの読み出しレイヤーはタングステン・スラブの両側に設置される。ScECAL の場合、タングステン・スラブの両面にシンチレータ・ストリップを設置する。この時、一方の面は x 方向にストリップが並べられており、もう一方の面は y 方向にストリップが並べられている。SiECAL オプションでは、 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ と小さなピクセルサイズを持つシリコンセンサーを使用するためシャワーの分離能力が高い。一方 ScECAL オプションでは、幅 5 mm、長さ 45 mm の

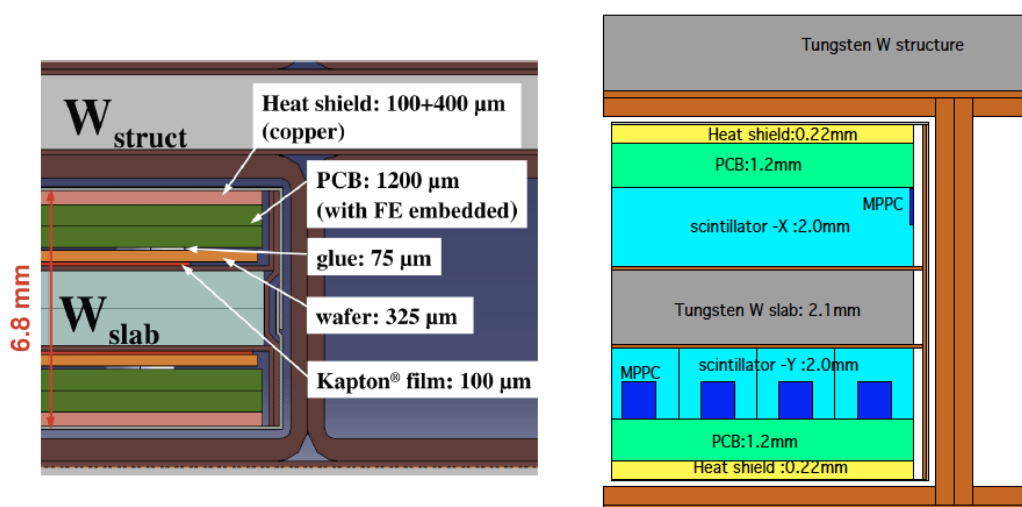


図 1.14: SiECAL(左) と ScECAL(右) の Detector Slab の断面図

シンチレータ・ストリップを使用するため SiECAL に比べ分離能力は低いと費用を抑えることができる。シャワー分離能力とコストの最適化のため、SiECAL、ScECAL を両方使用するオプション (Hybrid ECAL) も検討されている。

1.4.6.2 ハドロンカロリメータ (HCAL)

HCAL の役割は中性ハドロンエネルギーを正確に測定することである。図 1.15 は HCAL の全体図である。具体的にはハドロンシャワーのエネルギーの損失とシャワーの形のプロファイリングを行う。PFA の性能を十分に発揮するためには高いエネルギー分解能と高密度読み出しが要求される。HCAL はコイルの内側に置かれるため、吸収剤は磁性を帯びないスチールにすることが検討されている。またスチールのハドロン相互作用長、放射長はそれぞれ 17 cm、1.8 cm と放射長がハドロン相互作用長に比べ短いため、シャワーの進行方向に対するサンプリング精度を高くすることができる。HCAL の検出機構には 2 つのオプションがあり、シンチレータ・タイルを用いたサンプリング・カロリメータ (analogue HCAL; AHCAL)、活性ガスを使用したガス検出器 (semi-digital HCAL; SDHCAL) がある。

図 1.16 は AHCAL オプションにおける、モジュール内の構成を表している。1 つのレイヤーは、厚み 0.5 mm のスチールによるサポートプレート、3 mm のシンチレータ・タイル、2 mm のプリント回路基板で構成される。プリント回路基板には読み出し用 ASIC、キャリブレーションに使う LED 等が搭載されている。

SDHCAL の基本ユニットはガス検出器を内包する”カセット”であり、モジュール内に複数のカセットが敷き詰められる。カセットの外壁は厚みが 2.5 mm のスチールでできており、サポートに挿入する。サポート自身も 1.5 cm のスチール・プレートでできている。カセット内のガス検出器の構造は図 1.17 の通りである。2 枚のガラス平板をアノード、カソードとし、高電圧を掛けることで一様な高電場を掛け、ガラス平板

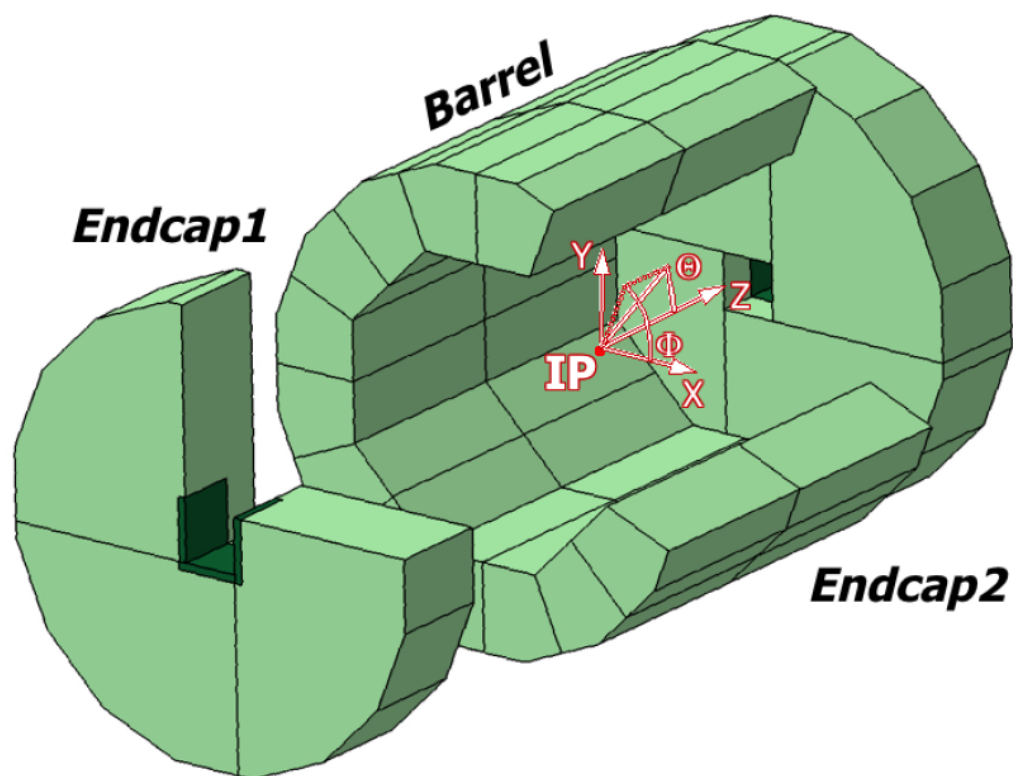


図 1.15: HCAL の全体図

間に TFE(93%)、CO₂(5%)、SF₆(2%) の混成ガスを封入する。TFE を用いることにより、荷電粒子が通過するとイオン化によって電子が生じる (8 電子/mm)。また電子が生じた後の電子雪崩のサイズを制限するため CO₂ と SF₆ を使用する。ガラス平板のような高抵抗物質を使用するのは、電子雪崩生成後のアノード、カソードにおける放電によるデッドタイムを短くするためである。このため電子雪崩により誘起される電場を読み出しパッドで検出する。

1.4.7 ミューオン検出器

ミューオン検出器は最も外側に位置する検出器であり、ミューオンの識別を行う。またカロリメータに収まりきらなかったシャワーを同定することで、カロリメータのエネルギー分解能を向上させる役割もある。ILD でかかる磁場 3.5 T を考慮すると、約 3 GeV/c 以上の運動量を持つミューオンはミューオン検出器に到達する。センサーにはシンチレータ・ストリップか、Registive Plate Chamber (RPC) を使用することが検討されている。

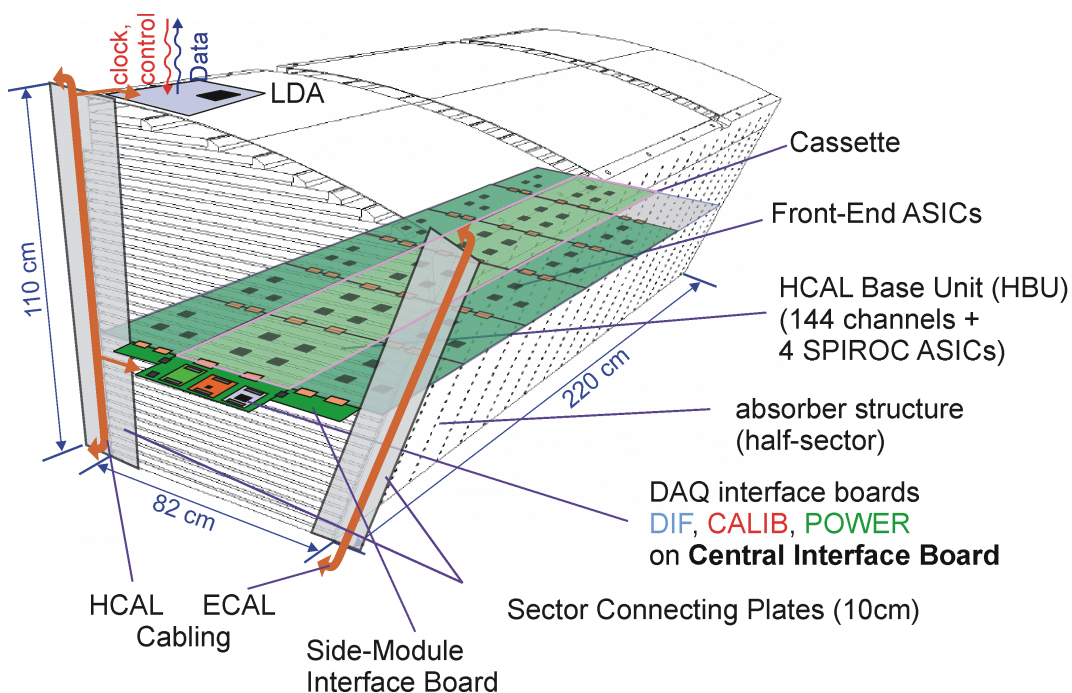


図 1.16: AHCAL オプションにおけるモジュール内の構成

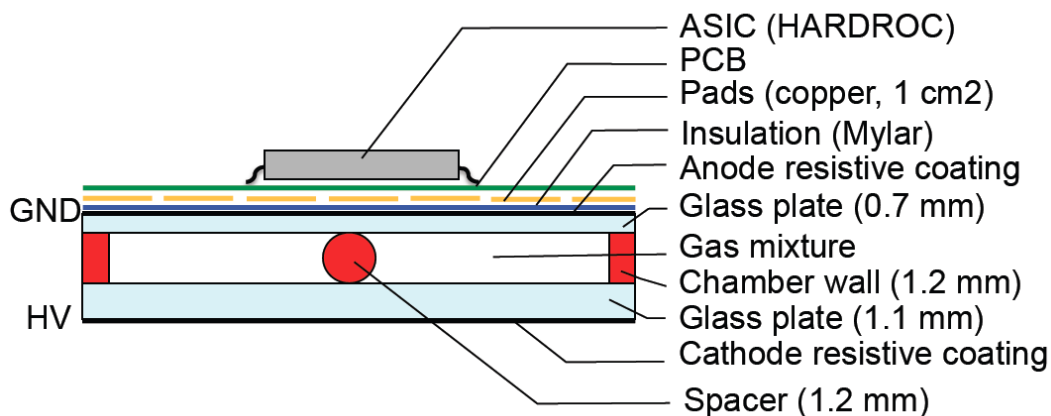


図 1.17: SDHCAL オプションにおけるガス検出器の構造

1.4.8 前方検出器

ビーム軸近傍に設置される検出器はまとめて前方検出器と呼ぶ。図 1.18 は前方検出器の全体図である。前方検出器は測定器全体の検出可能立体角の向上、ルミノシティ測定、ビームサイズの測定の役割を果たす。以下では主な前方検出器とその役割について説明する。

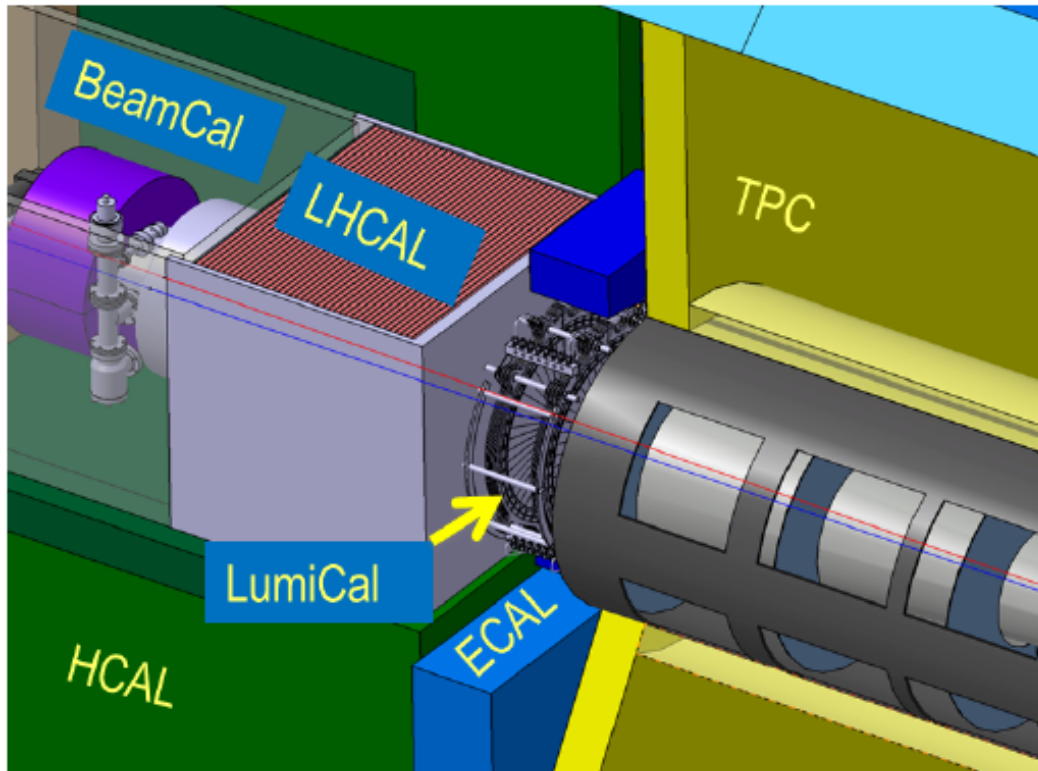


図 1.18: 前方検出器の全体図

1.4.8.1 LumiCal

LumiCal はルミノシティの測定をするための電磁カロリメータである。Bhabha 散乱過程 ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-$) の全反応断面積 σ_B は理論から正確に計算可能で、ルミノシティと σ_B の関係式

$$\mathcal{L} = \frac{N_B}{\sigma_B} \quad (1.3)$$

からルミノシティ \mathcal{L} を測定する。ここで N_B は LumiCal によって検出される Bhabha 散乱過程の数である。吸収剤のタングステンはプレート状にし、シリコンセンサーを使用する。LumiCal のレイヤーの構成は図 1.19 の通りであり、計 30 層使用する。

1.4.8.2 BeamCal

BeamCal は超前方の Bhabha イベントを測定することにより、バンチ毎のルミノシティの見積もりを行う。また BeamCal 直前に設置されるペアモニタとともにビーム衝突時に生じる低エネルギー電子・陽電子を測定し、ビームパラメータを測定することにも使用される。図 1.20 は BeamCal に落とす電子・陽電子ペアのエネルギー分布である。中心部はビームを通過させるために穴が空けられている。BeamCal のレイヤー

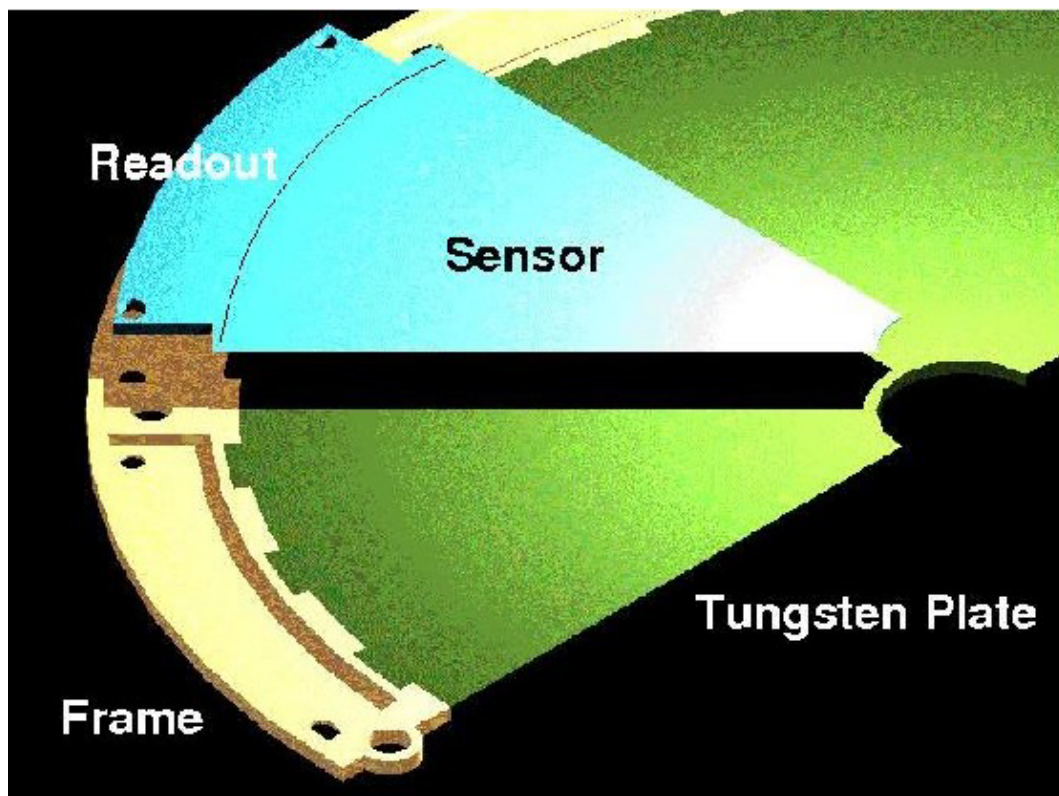


図 1.19: LumiCal と BeamCal のレイヤーの構成

の構成は LumiCal と似ており、図 1.19 のようになっている。センサーには GaAs を用いる。

1.4.8.3 ペアモニタ

ペアモニタは加速器システムに対して高速なフィードバックを行う。ペアモニタは電子・陽電子ペアの数分布を測定するため、優秀な位置分解能を持つシリコンピクセルセンサーから構成される。

1.5 Particle Flow Algorithm (PFA)

ILD 測定器はここで紹介する PFA のパフォーマンスが最大になるように最適化されている。PFA は高密度読み出しのカロリメータでのシャワークラスターを高精度で再構成しジェットエネルギーの高分解能測定を行うものである。ILC が目指す物理のほとんどが終状態に複数のジェットを含むものであり、それらのジェットの不変質量を高い精度で求める必要がある。そのため、カロリメータのエネルギー分解能を改善することは重要だが、カロリメータだけでは精度に限界がある。そこで VXD、飛跡

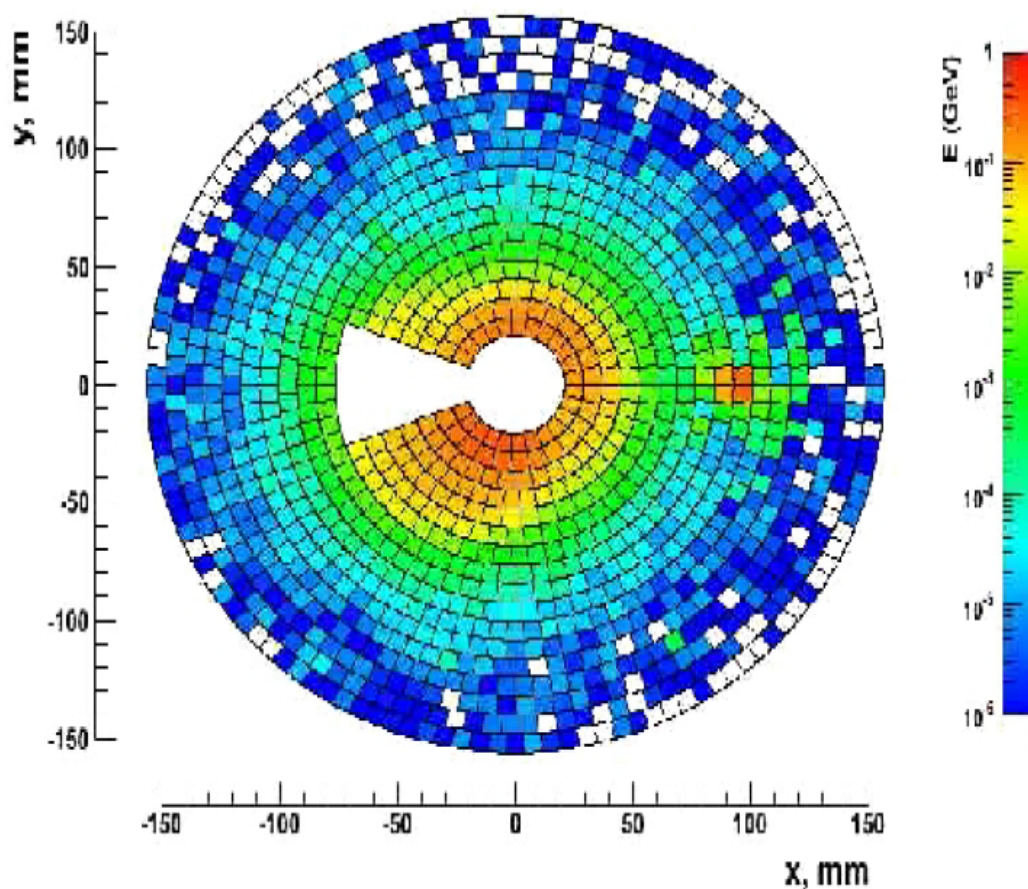


図 1.20: BeamCal に落とす電子・陽電子ペアのエネルギー分布

検出器の情報をジェット再構成の補助として用いることで精度を改善させる。PFA では次のような手順で事象の再構成を行う。

1. VXD、飛跡検出器で荷電粒子を測定
2. ECAL で光子を測定
3. HCAL で中性ハドロンを測定

荷電粒子は VXD、飛跡検出器で非常に高い精度で運動量を測定でき、この情報を用いてエネルギーを算出する。測定された飛跡は ECAL、HCAL 内のジェットと結び付けられる。飛跡検出器で対応する粒子の軌跡が見つからない場合、それは ECAL 内のジェットは光子、HCAL 内のジェットは中性ハドロンと識別し、それぞれエネルギーを測定する。図 1.21 に PFA により再構成された事象の例を示す。

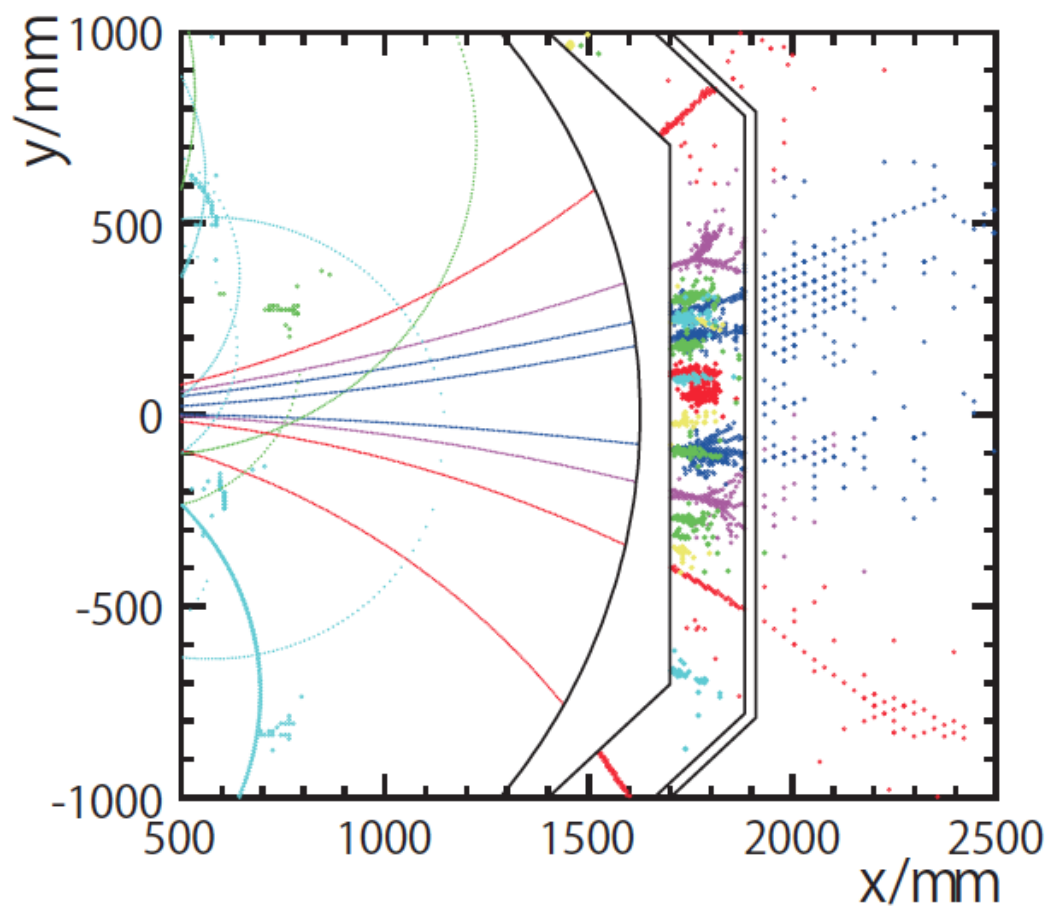


図 1.21: 100 GeV ジェットの PFA による再構成

第2章 ILCで期待される物理と崩壊点検出器

ILCで解明が期待される物理は多岐に渡る。本章ではその中でも崩壊点検出器と関わりが深いものを紹介する。崩壊点検出器の役割は粒子の崩壊点を精密に測定することである。崩壊点の情報は、ジェットの前となるクォークを同定する手法(フレーバータグ)を行う上で不可欠である。すなわち崩壊点検出器と関わりが深い物理とは、その事象の解析の精度がフレーバータグの性能に大きく依存する物理を意味する。フレーバータグが特に大切となるのはヒッグスの物理である。ヒッグスの物理測定に用いられる主な事象を挙げると、 ZH (崩壊分岐比の測定)、 ZHH (自己結合定数の測定)、 $t\bar{t}H$ (ヒッグスとトップクォークの湯川結合の測定)がある。本章ではこれらの物理の重要性とフレーバータグとの関係を説明していく。

2.1 フレーバータグ

ILCで起こる事象の多くは終状態に複数のジェットを持ち、その解析にはフレーバータグは不可欠となる。フレーバータグとは検出器からの情報を用いてジェットの前となるクォークのフレーバーを識別する技術である。特にILCにおけるフレーバータグでは、 b クォークのジェットを他の軽いクォークのジェットから識別する「 b -タグ」と、 c クォークを他のクォークジェットから識別する「 c -タグ」が非常に重要である。フレーバータグの処理はLCFIPlusと呼ばれるソフトウェアパッケージを用いて行われる[7]。LCFIPlusにおけるフレーバータグでは、トラックのインパクトパラメータ、ジェットの起源となる崩壊点の質量、ビーム衝突点からの距離、数、ジェットの方向、エネルギー等の変数をBoosted Decision Trees (BDTs) [8]に入力しトレーニングを行う手法をとる。入力される変数の内、崩壊点の位置は b -タグ、 c -タグの判定に特に重要である。 b クォークを含むハドロンの典型的な固有崩壊長は $400 \sim 500 \mu\text{m}$ 、 c クォークの場合は $100 \sim 300 \mu\text{m}$ であるため、この飛程距離の違いを識別できればフレーバータグの精度は大きく改善することが期待される。飛程距離を精度良く測定するためには崩壊点を精度良く測定する必要があるため、優秀なフレーバータグを得るには優秀な崩壊点分解能を持つ崩壊点検出器が必要である。

2.2 ヒッグス機構

素粒子物理学の標準理論ではヒッグス粒子が素粒子に質量を与え、これをヒッグス機構と呼ぶ。ヒッグス粒子の性質を詳細に調べることは標準理論の検証には不可欠である。以下ではヒッグス機構を簡単に説明する [4] [9]。まず自発的対称性の破れを説明するために、電荷をもつスピン 0 の複素数場 $\phi(x) \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(\phi_1 + i\phi_2)$ (ϕ_1, ϕ_2 は実数) を考える。このとき $\phi(x)$ は $|\phi|^2$ にのみ依存するポテンシャル $V(|\phi|^2)$ を持つとする。するとラグランジアン密度は、

$$\mathcal{L} = \partial_\mu \phi^* \partial^\mu \phi - V(|\phi|^2) \quad (2.1)$$

と書け、 ϕ_1, ϕ_2 で書きなおすと、

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi_1 \partial^\mu \phi_1 + \partial_\mu \phi_2 \partial^\mu \phi_2) - V\left(\frac{\phi_1^2 + \phi_2^2}{2}\right) \quad (2.2)$$

となる。このラグランジアンは $\phi' = e^{i\theta}\phi$ の変換に対し不変である。したがって、大域的 $U(1)$ 対称性を持つ。ポテンシャル V は ϕ_1 - ϕ_2 平面において回転対称な形をしているので、

$$V \equiv V_0 + \mu^2(\phi_1^2 + \phi_2^2) + \lambda(\phi_1^2 + \phi_2^2)^2, \quad \mu^2 \propto (T - T_c), \quad \lambda > 0 \quad (2.3)$$

と定義する。ここで T_c は相転移の起こる臨界温度である。 λ が正である理由は、系の安定性 $|\phi| \rightarrow \infty$ で $V \rightarrow -\infty$ を要求するからである。高温 ($T > T_c$) では、 $\mu^2 > 0$ となり V は最小値を $\phi = 0$ に持つ (図 2.1a)。しかし、低温 ($T < T_c$) になり相転移を起こすと、 V は $\phi = 0$ 以外に最小値を持つようになり、ワインボトルの底のような形になる (図 2.1b)。簡単のため $V_0 = \mu^4/4$ と置いて以下のように書き直した。

$$V = \lambda(\phi_1^2 + \phi_2^2 - v^2)^2 \quad (v^2 = -\frac{\mu^2}{2\lambda}, \mu^2 < 0) \quad (2.4)$$

最小値は円を描き、

$$\phi_1^2 + \phi_2^2 = v^2 \quad (v > 0 : \text{実数}) \quad (2.5)$$

と書ける。この時エネルギーは、

$$H = \int d^3x \left(\sum_i \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi_i} \right) - \mathcal{L} \right) = \int d^3x \left(\frac{1}{2} \sum_i [\dot{\phi}_i^2 + (\vec{\nabla} \phi_i)^2 + V] \right) \quad (2.6)$$

となる。真空はエネルギーが最も小さい解と定義されるので、 $\phi_i(x)$ が空間にも時間にも依存せず V が最小になるところが真空であるといえる。つまり真空は V が最小となる円上の一点を指す。 V は大域的 $U(1)$ 対称性を持つので円上の点を任意に選び、真空を以下で定義する。

$$\begin{cases} \phi_{\text{vac}1}(x) = v \\ \phi_{\text{vac}2}(x) = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

エネルギーが $V|_{\phi=0}$ より十分小さくなると、場 ϕ は真空に留まり、その周りでは小さく振動し始め、大域的 $U(1)$ 対称性は破れる。これを自発的対称性の破れと呼び、 $\phi_{vac} = \frac{1}{\sqrt{2}}v$ を真空期待値と呼ぶ。真空の周りでの振動は以下の式で書ける。

$$\begin{cases} \phi_1(x) = v + \chi(x) \\ \phi_2(x) = \eta(x) \end{cases} \quad (2.8)$$

ただし、 χ と η は実数で十分小さいとする。この時、ラグランジアン密度は

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu\chi\partial^\mu\chi + \partial_\mu\eta\partial^\mu\eta) - \lambda[(v + \chi)^2 + \eta^2 - v^2]^2 \quad (2.9)$$

$$= \frac{1}{2}(\partial_\mu\chi\partial^\mu\chi + \partial_\mu\eta\partial^\mu\eta) - \lambda(2v\chi + \chi^2 + \eta^2)^2 \quad (2.10)$$

$$= \frac{1}{2}(\partial_\mu\chi\partial^\mu\chi + \partial_\mu\eta\partial^\mu\eta) - 4v^2\lambda\chi^2 + 4v\lambda\chi^3 + \lambda\chi^4 + 4v\lambda\chi\eta^2 + 2\lambda\chi^2\eta^2 + \lambda\eta^4 \quad (2.11)$$

$$= \left(\frac{1}{2}\partial_\mu\chi\partial^\mu\chi - \frac{4\mu^2}{2}\chi^2\right) + \frac{1}{2}\partial_\mu\eta\partial^\mu\eta + \mathcal{L}_{int} \quad (2.12)$$

となる。この時、場 χ はスピン 0 で質量 $\sqrt{-4\mu^2}$ の粒子を表し、場 η は質量 0 の粒子を表す。自発的対称性の破れにより出てきた質量 0 の粒子は南部ゴールドストーンボソンと呼ばれる。

次に、式 (2.1) にスピン 1 を持つ実数場 A_μ を導入してみる。ラグランジアン密度は以下のようになる。

$$\mathcal{L} = (D_\mu\phi)^*(D^\mu\phi) - V(|\phi|^2) - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \quad (2.13)$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu + ieA_\mu, \quad F_{\mu\nu} \equiv \partial_\nu A_\mu - \partial_\mu A_\nu \quad (2.14)$$

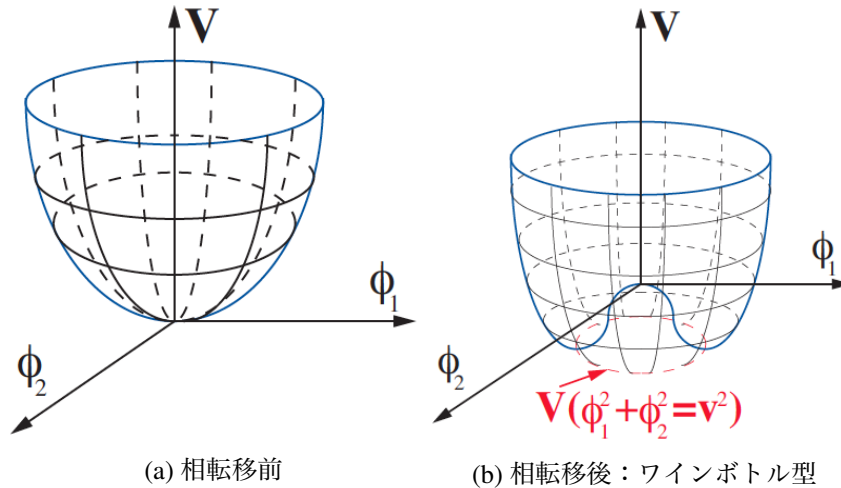


図 2.1: ポテンシャル V の形状

これは以下のゲージ変換に対して不変なので、局所的 $U(1)$ 対称性を持つ。

$$\phi' = e^{-ie\Lambda(x)}\phi, \quad A'_\mu(x) = A_\mu(x) + \partial_\mu\Lambda(x) \quad (2.15)$$

ここで $\Lambda(x)$ は x の任意の関数を表す。これは、もし $\phi(x)$ と $A_\mu(x)$ が運動方程式を満たすならば、変換後の $\phi'(x)$ と $A'_\mu(x)$ も運動方程式を満たすことを意味する。簡単のために $\phi(x)$ を以下の式で定義する。

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\phi_1 + i\phi_2) \equiv \rho(x)e^{i\theta(x)} \quad (\rho(x) > 0, \theta(x) : \text{実数}) \quad (2.16)$$

ゲージ変換で $\Lambda(x)$ は任意に選ぶことができるので、変換後の $\phi'(x)$ が全ての x に対して実数になるように選ぶことができる。つまり

$$\phi'(x) = e^{-i\theta(x)}\phi(x) \quad (2.17)$$

となるように選ぶことも可能なはずである。すると、 $\phi'(x)$ は実数場となり、実際の粒子を表す。このように変換で全ての場が実数になるように選ばれるゲージのことをユニタリーゲージと呼び、残った場が実際の粒子に対応するという利点がある。ユニタリーゲージを選ぶと、 $\phi(x)$ は実数にならないといけないので、 $\phi_2 = 0$ となる。ポテンシャルを式 (2.4) と仮定すると、

$$V = \lambda(\phi_1^2 - v^2)^2 \quad (2.18)$$

となり、 $\phi_1 = v$ が真空となる。先と同様に真空の周りで展開すると、

$$\phi_1 = v + \chi(x) \quad (v, \chi : \text{実数}) \quad (2.19)$$

これを式 (2.13) に代入すると、

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{1}{2}(\partial_\mu\chi\partial^\mu\chi + 4\mu^2\chi^2) - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{e^2v^2}{2}A_\mu A^\mu \\ & + \frac{e^2}{2}A_\mu A^\mu(2v\chi + \chi^2) + (\chi^3 \text{以上の項}) \end{aligned} \quad (2.20)$$

第 1 項は質量 $\sqrt{-4\mu^2}$ のスカラー粒子を表し、第 2 項と第 3 項は質量 ev を持つベクター粒子を表す。第 4 項はスカラー粒子とベクター粒子の相互作用を、第 5 項はスカラー粒子の自己結合を表す。したがって、ベクター粒子が質量を持ったことを意味する。このように、局所 $U(1)$ 対称性を破ることで、自由度の一つ(大局的 $U(1)$ 対称性を考えた時の南部ゴールドストーンボソンに当たる自由度)がベクター粒子のヘリシティーとして吸収され(ヘリシティー: $\pm 1 \rightarrow 0, \pm 1$) 質量を得る仕組みをヒッグス機構と言い、局所 $U(1)$ 対称性を破るために導入された場をヒッグス場と呼ぶ。標準理論ではヒッグス場はスピン 0 で電荷を持つ 2 重項として導入される。

$$\phi \equiv \begin{pmatrix} \phi_+ \\ \phi_0 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}(\phi_{+1} + i\phi_{+2}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(\phi_{01} + i\phi_{02}) \end{pmatrix} \quad (\phi_{+i}, \phi_{0i} (i = 1, 2) : \text{実数}) \quad (2.21)$$

エネルギーが下がり真空周りで振動すると ($\phi_+ \rightarrow 0$, $\phi_0 \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(v+\chi)$)、 $SU(2) \times U(1)$ の電弱対称性を自発的に破り、ベクターボソン (W、Z) に質量を与える。対称性を破ったときのラグランジアン密度 (付録 A の式 (A.1)) の中には、

$$-m_l \bar{l}l - m_\nu \bar{\nu}\nu - \frac{m_l}{v} \chi(\bar{l}l) - \frac{m_\nu}{v} \chi(\bar{\nu}\nu) \quad (2.22)$$

という項が出てくる。第 1、2 項はフェルミオンの質量 (m_l , m_ν) を表し、第 3、4 項はヒッグスとフェルミオンの 3 点結合を表す。注目すべきはヒッグスとの結合がフェルミオンの質量に比例している点である。3 点結合は見方を変えるとヒッグスのフェルミオンへの崩壊と見ることもできるので、ヒッグスの崩壊分岐比が崩壊した粒子の質量に比例していることを確かめることはヒッグス機構の検証に繋がる。これがヒッグス粒子の崩壊分岐比を測定する動機であり、標準理論の信憑性の確立に残された最大の検証である。また、式 (A.1) には、

$$+ \frac{2v\chi + \chi^2}{4} \left(\left(\frac{2m_W}{v} \right)^2 W_{+\mu}^* W_{+\mu} + \frac{1}{2} \left(\frac{2m_Z}{v} \right)^2 Z_\mu Z^\mu \right) - \frac{m_H^2}{2v} \chi^3 - \frac{m_H^2}{8v^2} \chi^4 \quad (2.23)$$

という項が存在する。第 1 項はヒッグスとベクターボソン (W、Z) との 3 点結合、4 点結合を表し、第 2 項はヒッグスの自己結合を表す。フェルミオンやベクターボソンとの結合、自己結合の強さを質量を横軸にとってプロットすると図 2.2 になる。この図の意味することは、全ての粒子とヒッグスとの結合は同じ真空期待値の逆数と質量に比例しているということである。したがって、ヒッグスとフェルミオンの結合だけでなく、これらについても調べることはヒッグス機構の検証の重要な手掛かりとなる [4]。

2.3 ヒッグスの物理とフレーバータグ

LHC により標準理論のヒッグス粒子と矛盾しない粒子が発見された。次のステップとして、その粒子が実際にヒッグス機構を持つことの検証は現代素粒子物理学にとって極めて重要である。以下に ILC で行うヒッグス機構の検証方法を示す。

1. 崩壊分岐比の測定
2. 自己結合定数の測定
3. トップクォークとの湯川結合の測定

これらの測定の詳細について説明していく [4] [10]。

2.3.1 ヒッグスの崩壊分岐比の測定

ヒッグスの崩壊分岐比の測定はヒッグス機構の検証において極めて重要である。崩壊分岐比を測定することにより、崩壊分岐比と質量の関係を調べることが可能となる。これは図 2.2 に示した関係の検証に相当する。大きな崩壊分岐比を持つのが $H \rightarrow b\bar{b}$ 、

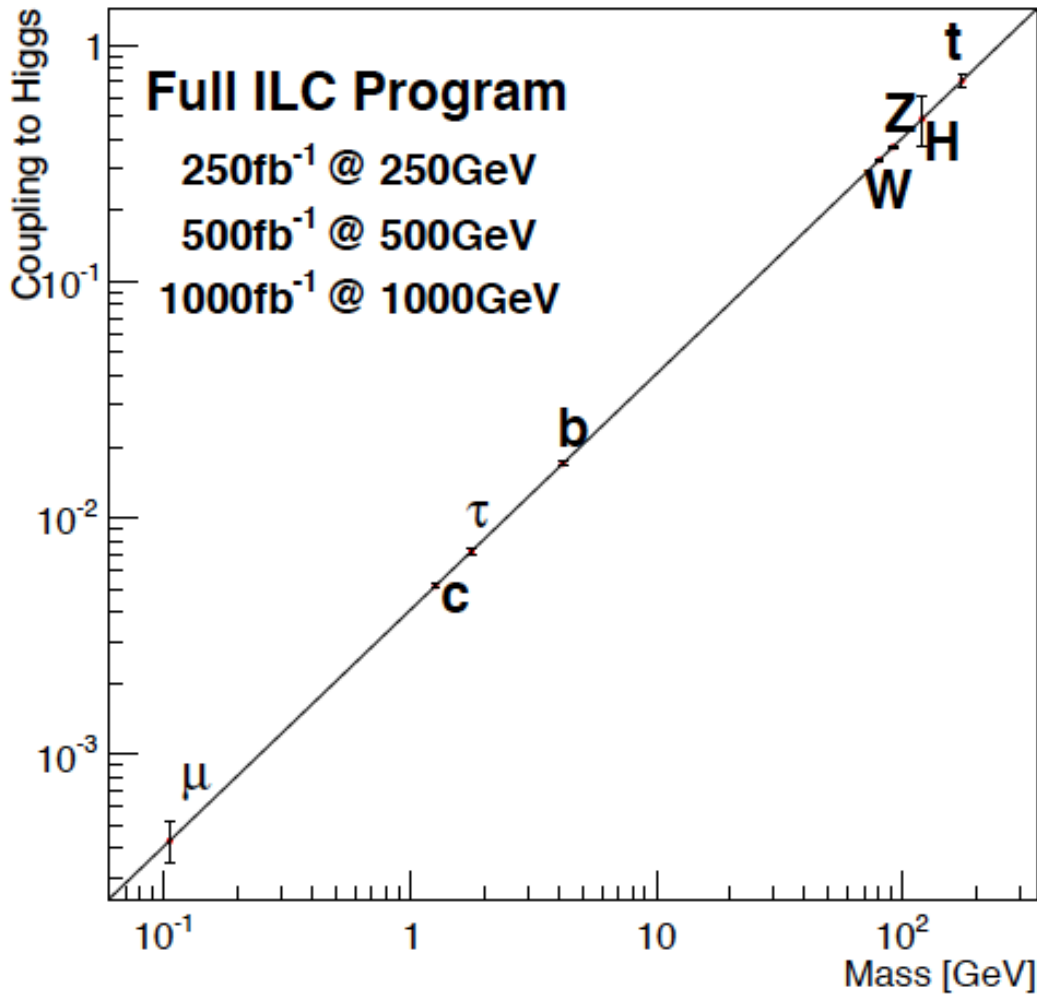


図 2.2: ヒッグス粒子との結合の強さ

$H \rightarrow c\bar{c}$ であり、これらの b 、 c クォークをどれだけ精度良く識別できるかが鍵となる。測定のために、主に $E_{CM} = 250$ GeV のビームランにおける図 2.3 の過程により生じるヒッグスを用いる。図 2.2 中のエラーバーは ILC で期待される各々の結合定数のエラーを表わしている。

現在、 $H \rightarrow b\bar{b}$ 、 $H \rightarrow c\bar{c}$ の崩壊分岐比の測定精度 $\frac{\Delta BR}{BR}$ はそれぞれ 2.7%、7.3% と見積もられている。この測定精度はフレーバータグの性能に大きく依存しているため、高性能のフレーバータグの実現が必要不可欠となる。

2.3.2 ヒッグスの自己結合定数の測定

HHH の自己結合定数の測定はヒッグスポテンシャルの構造を解明し、自発的対称性の破れ等を理解するために必要である。この測定は LHC では難しいため、ILC に大

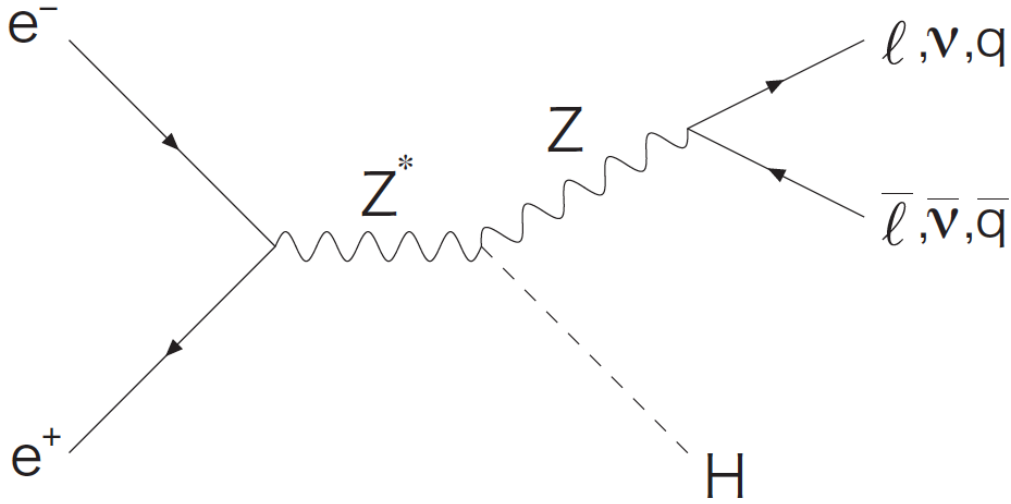


図 2.3: ヒッグスの崩壊分岐比測定のための生成過程 $e^+e^- \rightarrow HZ$

きな期待がかかっている。自己結合定数の測定には2つの方法がある。1つ目がZHH事象における直接測定である。これは式(2.23)中の自己結合定数、

$$\lambda_{HHH} = \frac{m_H^2}{2v} \quad (2.24)$$

を図2.4にある500 GeVのビームランにおける $e^+e^- \rightarrow ZHH$ 事象に含まれるヒッグスの3点結合を直接測ることで決定する方法である。

測定のためにZHH事象の $e^+e^- \rightarrow ZHH \rightarrow \bar{l}l$ (又は $b\bar{b}$) + $b\bar{b}b\bar{b}$ 崩壊を再構成する。終状態に4つ、あるいは6つの b ジェットを含んでいるため、全ての b ジェットを精度よく同定できなければ自己結合定数の直接測定はできないため、優秀なフレーバータグが必要不可欠である。

2つ目はヒッグスの質量測定から間接的に測定する方法である。自己結合定数の式(2.24)にはヒッグス質量 m_H が含まれており、これを測定し自己結合定数を逆算する。これはヒッグス機構を仮定した場合の自己結合定数になる。これら2つの測定で得られた自己結合定数 λ_{HHH} が一致するかを検証することにより、ヒッグス機構の検証を行う。

2.3.3 ヒッグスとトップクォークの湯川結合の測定

ILCでは $E_{CM} = 500$ GeVのビームランにおける $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$ 過程(図(2.5))で、トップクォークとヒッグスの湯川結合を測定することにより、ヒッグス機構の更なる検証が可能である。 t クォークはほとんど b クォークと W ボソンに崩壊するため、終状態はヒッグスからのものを含め複数の b ジェットを含む。加えて、主なバックグラウン

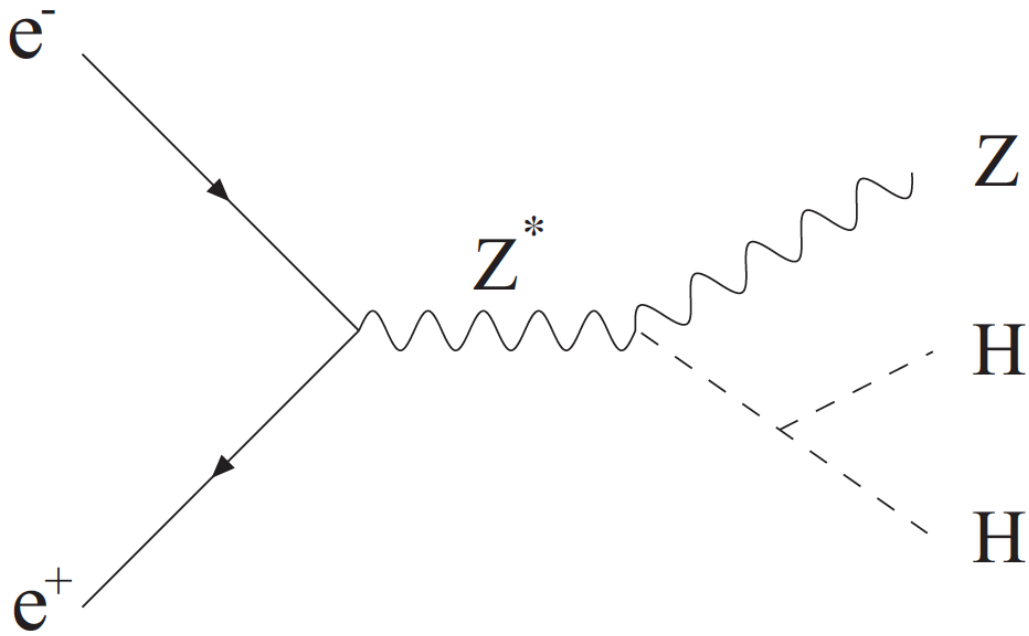


図 2.4: ヒッグス粒子の自己結合測定のための生成過程 $e^+e^- \rightarrow ZHH$

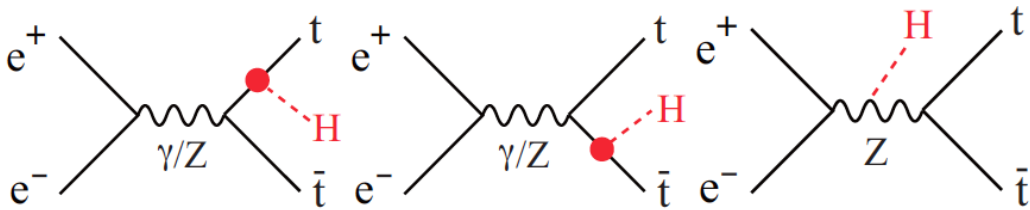


図 2.5: 湯川結合測定のための生成過程 $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H$

ドとなる $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}Z$ は $t\bar{t}H$ の反応断面積より 3 桁も大きい。しかしながら、高精度の b-タグが実現できればバックグラウンドは十分排除でき、結合定数 $g_{t\bar{t}H}$ の精度は 10% 程度と見積もられている。

第3章 高精細 CCD (FPCCD) を用いた崩壊点検出器

第1章 1.4.3 節で述べたように、ILC の崩壊点検出器にはピクセル占有率の問題があり、これを解決するための開発研究が世界中で進んでいる。我々日本グループはこの問題の解決のために、ピクセルサイズが $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ と $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ の高精細 CCD (Fine Pixel CCD; FPCCD) をセンサーに用いた崩壊点検出器の開発を進めている。現在、浜松フォトニクスにより開発されたピクセルサイズが $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ の FPCCD 試作機 (図 3.1) のビームテストの準備が進められている。本章では FPCCD 崩壊点検出器について述べる。

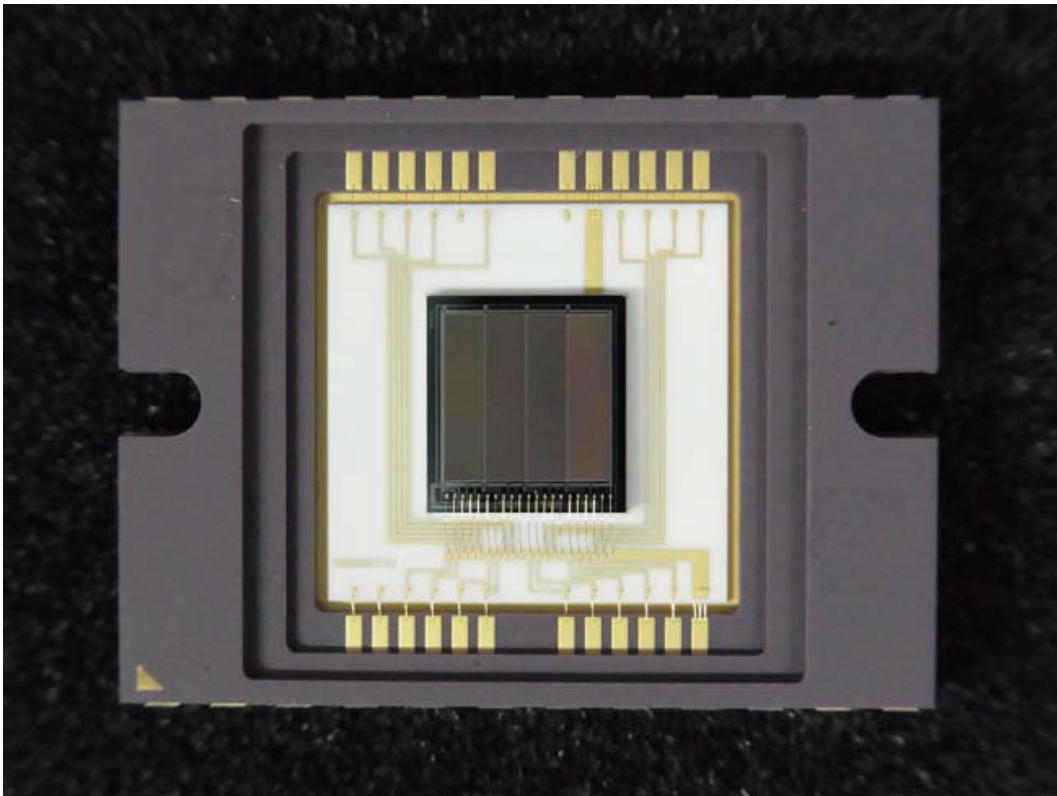


図 3.1: FPCCD 試作機

3.1 FPCCD 崩壊点検出器

3.1.1 FPCCD 崩壊点検出器の構造

FPCCD 崩壊点検出器は非常に小さなピクセル CCD をセンサーとして使用する。FPCCD のピクセルサイズはレイヤー 0, 1 で $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 、レイヤー 2, 3, 4, 5 で $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ と崩壊点検出器に搭載されるセンサーのピクセルサイズとしては史上最小である(レイヤーの番号は最内層から最外層に向かって 0, 1, ..., 5 とする)。これより、非常に優秀な崩壊点分解能が期待でき、フレーバータグの性能向上が期待される。また、全ピクセル数は約 4 億個と非常に多く、低いピクセル占有率を持つことが予測される。厚みは $50\mu\text{m}$ 、その内の $15\mu\text{m}$ が有感層と非常に薄い。またセンサーは完全空乏化されており、電荷の漏洩は非常に小さい。FPCCD の配置図は図 1.10 の通りである。

3.1.2 FPCCD 崩壊点検出器の特徴

FPCCD 崩壊点検出器の主な特徴は以下の 3 つが挙げられる。

- (1). ピクセルヒットのクラスターが生じる
 - (a) 位置分解能が非常に良い
 - (b) クラスターの形状と位置からペアバックグラウンドを除去できる
 - (c) クラスターの形状からトラッキング時の外挿ミスを少なくできる
- (2). 全空乏化により粒子のトラックの分離能力が高い
- (3). トレイン間でデータを読み出すのでビーム由来の高周波ノイズの影響を受けない

これらの内、(1) と (2) はピクセルを小さくしたことによる恩恵といえる。

(1) のピクセルヒットのクラスターとは、図 3.2 のように粒子の通過により生じる、隣接する複数のピクセルヒットを一塊とみなしたものを指す。

(a) の位置分解能とは、粒子がレイヤー上に残す通過点の測定精度のことである。ピクセル自体が非常に小さいことも優秀な位置分解能を引き出す大きな要因のひとつではあるが、クラスターの存在も以下の理由で位置分解能の向上に大きく貢献する。図 3.3 のオレンジ色の長方形はピクセルに落としたエネルギーの量 (energy deposit) を表す。この量はピクセル内の粒子の通過距離に比例するため、energy deposit の加重平均を取ることで粒子の通過点をより正確に推定することができる。図の黄色の点が加重平均を取ることで再構成された粒子の通過点である。また、レイヤーに対して垂直に入射する粒子の通過点測定はクラスターが生成されないため、図の右側のようにピクセルの端を通過する場合があります、クラスターが生成される場合に比べ位置分解能は落ちる。

(b) はペアバックグラウンドの P_T がシグナルに比べ低く、ビーム衝突点から離れた位置で発生する性質が、クラスターの形状と位置に反映されるからである。図 3.4

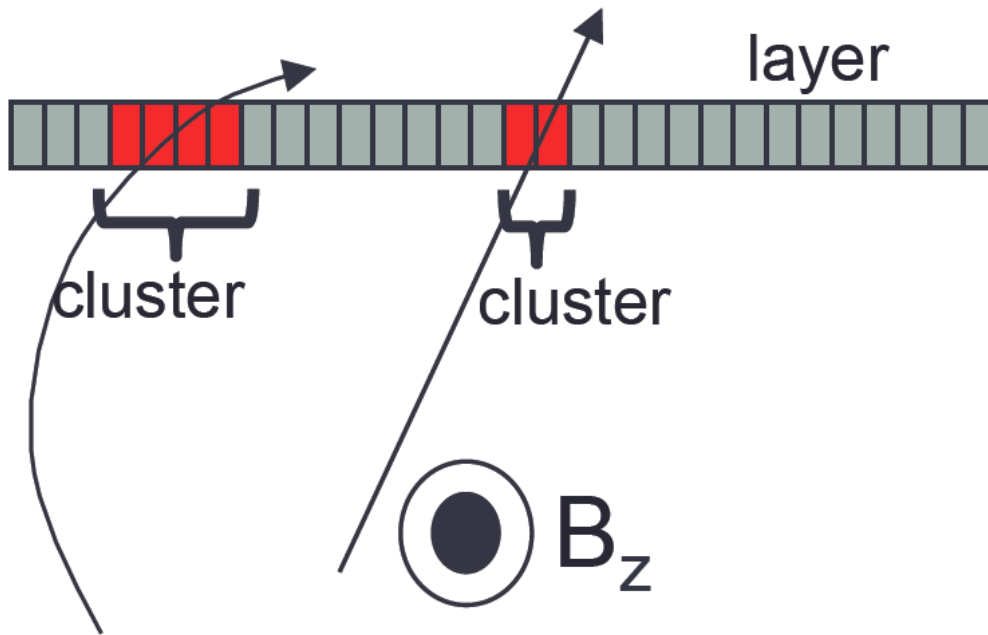


図 3.2: クラスターの説明

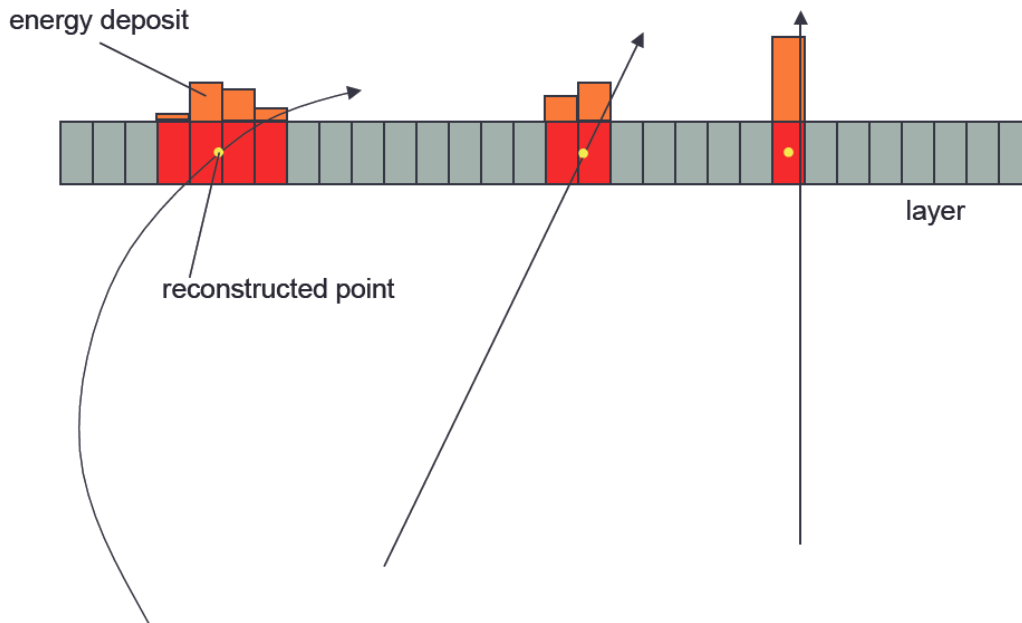


図 3.3: クラスターによる位置分解能の向上

は典型的なシグナル粒子とペアバックグラウンドの軌跡の違いを示したものである。ペアバックグラウンドは、シグナル粒子と比べ横運動量が非常に小さい(横運動量は

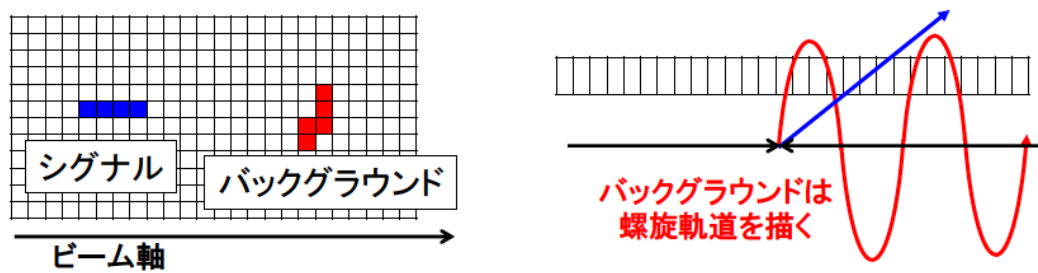


図 3.4: シグナル由来とペアバックグラウンド由来のクラスターの違い

$P_T \equiv \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$ で定義。(x-y 平面は磁場方向に垂直)。またシグナル粒子はほぼビーム衝突地点から飛来するのに対し、ペアバックグラウンドは衝突点から離れたところから生じるため、クラスターの位置と形状の相関が異なる。このため、あまりに長いクラスターや、衝突点から離れた位置にも関わらずビーム軸方向にクラスターが伸びておらず、横方向に伸びているものは基本的にペアバックグラウンド由来のクラスターと判定できる。

(c) のトラッキングとは、第 1 章で述べた VXD、シリコン飛跡検出器システム、TPC の中にあるヒット情報から粒子の飛跡 (以下トラックと呼ぶ) を再構成する処理のことである。ILD におけるトラッキングのおおまかな流れは、ある 3 つのヒットからトラックの「種」を作り、このトラックが持つべき他のヒットを追加していき、最終的なトラックを再構成する。このヒットの追加処理のことを、トラッキング時における「外挿」と呼ぶことにする。クラスターの形状により外挿ミスが少なくなるというのは、図 3.5 にあるように、クラスターの形状と飛跡の向き的一致、不一致を見ることにより妥当な外挿かどうかの判断がつくためである。

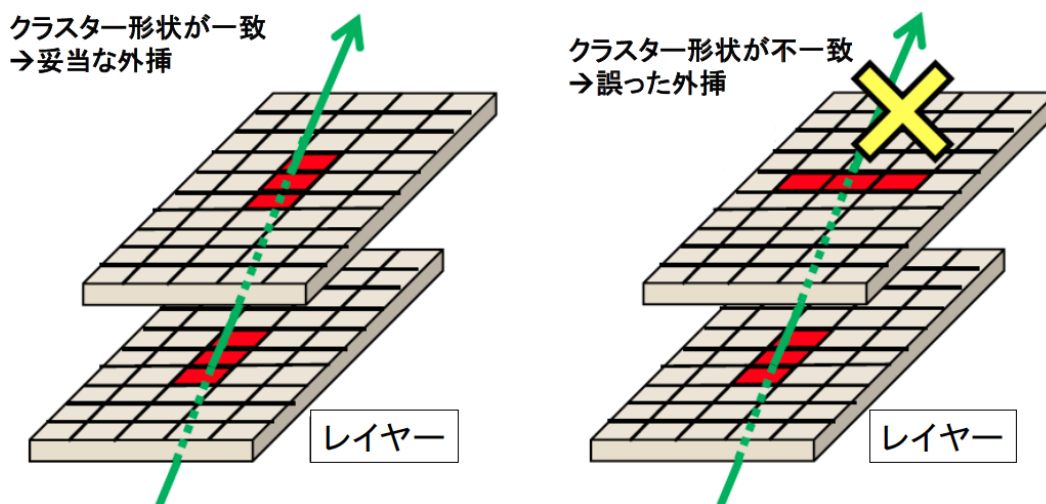


図 3.5: クラスター形状による外挿ミスの削減

(2)は全空乏化により、ピクセルに蓄積された電荷が、隣のピクセルに漏れ出さないことによる。仮に、全空乏化されていない場合は隣のピクセルに幾分の電荷が漏れてしまい、全空乏化されていない状態に比べクラスターが大きくなってしまう。このため、2つのトラックがレイヤー上で近い地点を通過する時、2つのクラスターが重なる可能性が高くなり、その場合2つのヒット点ではなく単一のヒット点とみなされてしまう。全空乏化されたピクセルの場合はその可能性が低くなり、複数のトラックの分離能力が高い。

第4章 ソフトウェアパッケージ ILCSoft

本研究では FPCCD 崩壊点検出器のシミュレーションを行うために ILCSoft [11] と呼ばれるソフトウェアパッケージを使用している。本章では最初に ILCSoft におけるシミュレーション研究の流れについて説明し、次に FPCCD 専用のソフトウェアについて述べ、最後に本研究に関わりの深い ILD におけるトラッキングアルゴリズムについて言及する。

4.1 シミュレーション研究の流れ

Mokka [12] は Geant4 [13] を用いて現実的な検出器の性質・配置に基づきイベントをシミュレーションする。Mokka に任意のイベントジェネレーターデータを入力することで ILD 内でそのイベントが時間発展し、全検出器のセンサーに粒子の通過点、通過時の運動量情報が与えられる。Mokka から出力されたこれらの位置、運動量情報は誤差無しの真の値なので、各検出器の分解能を考慮して情報を「ぼかす」処理を行う(本論文ではこれを「デジタル化する」と言う)。このデジタル化された情報が実際に我々が検出器から得られる情報を模しているのである。デジタル化の処理は各検出器毎に性能や構造が異なるので、それぞれ専用のソフトウェアが開発されている。FPCCD 崩壊点検出器も例に漏れず、より現実的なデジタル化のために FPCCDDigitizer [14]、FPCCDClustering [15] と呼ばれるデジタル化用ソフトウェアが開発された。詳細は次節で述べる。

各検出器のデジタル化処理を終えたら、次に実際の ILC 実験で使用する粒子再構成用のアルゴリズムをデジタル化処理された情報に適応する。

4.2 FPCCD 専用のソフトウェア

4.2.1 FPCCDDigitizer

FPCCDDigitizer [14] は上記のデジタル化処理の一部を担当し、以下の処理を行う。まず Mokka から得られたヒット情報、そのヒット位置における運動量の情報を使って FPCCD のセンサー内における粒子の飛程距離を計算する。センサーの平面を表す図 4.1 における緑の点が Mokka から得られたヒットの位置で、運動量の情報から粒子の方向が分かり、図の青い線のように通過経路が書ける(粒子はセンサー内では直線に伸びると近似している)。ここで横軸、縦軸はセンサー平面上の座標を表す(単位は mm)。この青い線に従って各ピクセル内での通過距離から各ピクセルに落とす電荷量

をランダウ分布に従って計算する。図の赤いピクセルがこの処理によって信号として認識されたものである。

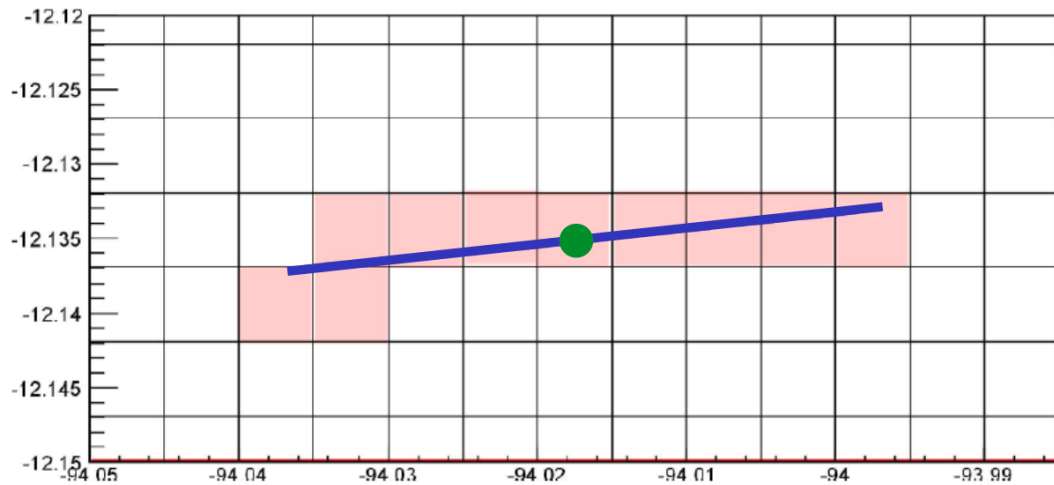


図 4.1: FPCCDDigitizer の処理

4.2.2 FPCCDClustering

FPCCDClustering [15] は FPCCDDigitizer で生成された複数の隣接するヒットピクセルを第 3 章 3.1 節で述べたクラスターにする処理を行う。energy deposit の加重平均を取ってヒット点を再構成する処理が行われているが、クラスターの形状と位置の相関を使った、ペアバックグラウンド・クラスターを除外するアルゴリズムは実装されていなかった。本研究では FPCCD の性能を引き出すため、このアルゴリズムを新たに実装した。詳細は第 5 章 5.2 節で述べる。

4.3 ILD におけるトラッキングアルゴリズム

各検出器のデジタル化が済むと、粒子の再構成処理の最初の段階としてトラッキング処理が始まる。本節では ILD における現行のトラッキングアルゴリズムの概要について述べ、その要素のひとつである SiliconTracking について説明する。

4.3.1 現行のトラッキングアルゴリズムの概要

ILD におけるトラッキングは、検出器の種類ごとに独立にトラックを再構成し、最後にそれらのトラックを繋げたものを最終トラックとする手法を取る。具体的には、図 4.2 のように、シリコン検出器の VXD, SIT, FTD のヒット情報からトラックを再構成する”SiliconTracking”、TPC のヒット情報からトラックを再構成する”CLUPATRA”

がある。本論文では各プロセスで再構成されたトラックを便宜的にシリコントラック、TPCトラックと呼んで区別することにする。第二段階でシリコントラックとTPCトラックを可能であれば結合し、一つのトラックにする処理を行う。結合処理後のトラックを便宜的にフルトラックと呼ぶことにする(結合を試みたが繋がらなかったトラックも含める)。フルトラックまで処理が進むとトラッキングの処理は終わり、フルトラックは崩壊点の再構成処理(vertexing)に使われる。



図 4.2: ILD におけるトラッキング処理

4.3.2 SiliconTracking のアルゴリズム

最後に FPCCD 崩壊点検出器のパフォーマンスを引き出すのに重要な SiliconTracking のアルゴリズムについて解説する。何故重要かと言えば、例え FPCCD 崩壊点検出器が高精度なヒット点を提供しても、それらの情報からトラックを上手く再構成できなければ本来存在している粒子数に比べ少ないトラックしか再構成されないため、崩壊点を再構成できずフレーバタグの精度が落ちるからである。よって、SiliconTracking はほぼ全てのトラックを再構成するようにアルゴリズムを構成する。SiliconTracking の処理の流れは

1. トラックシードの生成
2. 外挿処理
3. トラック同士の結合処理
4. 未処理のヒットのトラックへの付け足し
5. Kalman Filter による再フィット

である。大まかにいえば、トラックの種、“トラックシード”を最初に作成して、後の処理でその種を育てて最終的なトラックにまで成長させるという手法を取る。

以下では図を用いて各処理について説明するが、幾つか図の見方に関する注意点を挙げる。まず、SiliconTracking では VXD, SIT, FTD のヒット情報を用いてトラックを再構成するが、簡単のため図では VXD の全 6 層だけ表示することにする。また、VXD レイヤーは図 1.10 の左の断面図が示すように完全な円筒形ではないが、これも簡単な

ためレイヤーは円筒形で近似する。そして図は全て $R-\Phi$ 平面、言い換えれば $x-y$ 平面 (磁場方向 z に対し垂直な平面) での処理として示されているが、実際には $R-z$ 平面を考慮した 3次元での処理が行われている。 $R-\Phi$ 平面、 $R-z$ 平面で特筆すべき処理の違いがある場合はその時々にて言及する。

(1) 「トラックシードの生成」：まず図 4.3 のように、 Φ 方向に領域を 80 分割する (一区画 4.5°)。この分割は $R-z$ 平面でも行われ、 θ 方向に 80 分割 (一区画 2.25°) される。計 6400 区画でき、各区画内で以下の条件を全て満たすものがあればトラックシードを生成する。

- A. 区画内で、ある決められた 3 つのレイヤー上にそれぞれヒット点が存在する
- B. その 3 つのヒットに対してシンプル・ヘリックスフィットを行い、 χ^2/ndf が規定値以下である
- C. トラックパラメーター d_0 , z_0 と横運動量 P_T が規定値以下である (それぞれ $100 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $0.05 \text{ GeV}/c$)

A. の条件にある 3 つのレイヤーの組合せは図 4.3 の中ではレイヤー 5, 4, 3、レイヤー 3, 2, 1、レイヤー 2, 1, 0 の 3 種類である。ILD での標準の処理では

```

8 6 5 8 6 4 8 6 3 8 6 2 8 5 3 8 5 2
8 4 3 8 4 2 6 5 3 6 5 2 6 4 3 6 4 2
6 3 1 6 3 0 6 2 1 6 2 0 5 3 1 5 3 0
5 2 1 5 2 0 4 3 1 4 3 0 4 2 1 4 2 0

```

の計 24 種の組合せについて処理される。ここで 0~5 は VXD レイヤー 0~5 を表し、6, 8 は SIT の全 2 層中の内側、外側に相当する。

B. にあるシンプル・ヘリックスフィットとは、粒子のレイヤー通過時における多重クーロン散乱、エネルギー損失を考慮せず、ヒットの座標だけを使ってヘリックス (らせん) でフィットすることを指す。アルゴリズムはフィット関数を線形な式を用いることで高速なフィットを実現させる N.I. Chernov, G.A. Ososkov の "Effective Algorithms For Circle Fitting" [16] をベースにしており、C++で実装されている。フィット後に出力される 5 つのトラックパラメーター d_0 , z_0 , ω , ϕ_0 , $\tan \lambda$ によりトラックを表現できる。

C. の条件に含まれる d_0 , z_0 , ω は簡単にいえば、それぞれトラックのビーム衝突点までの距離を $R-\Phi$ 平面、 $R-z$ 平面に射影した値、トラックの曲率を表している。本研究で使用するトラックパラメーターの定義については付録 B で詳説する。

(2) 「外挿処理」：外挿処理では、生成されたトラックシードが持つヒットのレイヤー以外のレイヤーにあるヒットを付け足していく。この処理もトラックシード時に分割された区画内で行われる。図 4.4 の赤い点線は外挿対象になる範囲を示したもので、その範囲内にあるヒットに対して以下の処理を行う。

1. 赤い点線の中で、トラックの曲線に最も近い点を探す

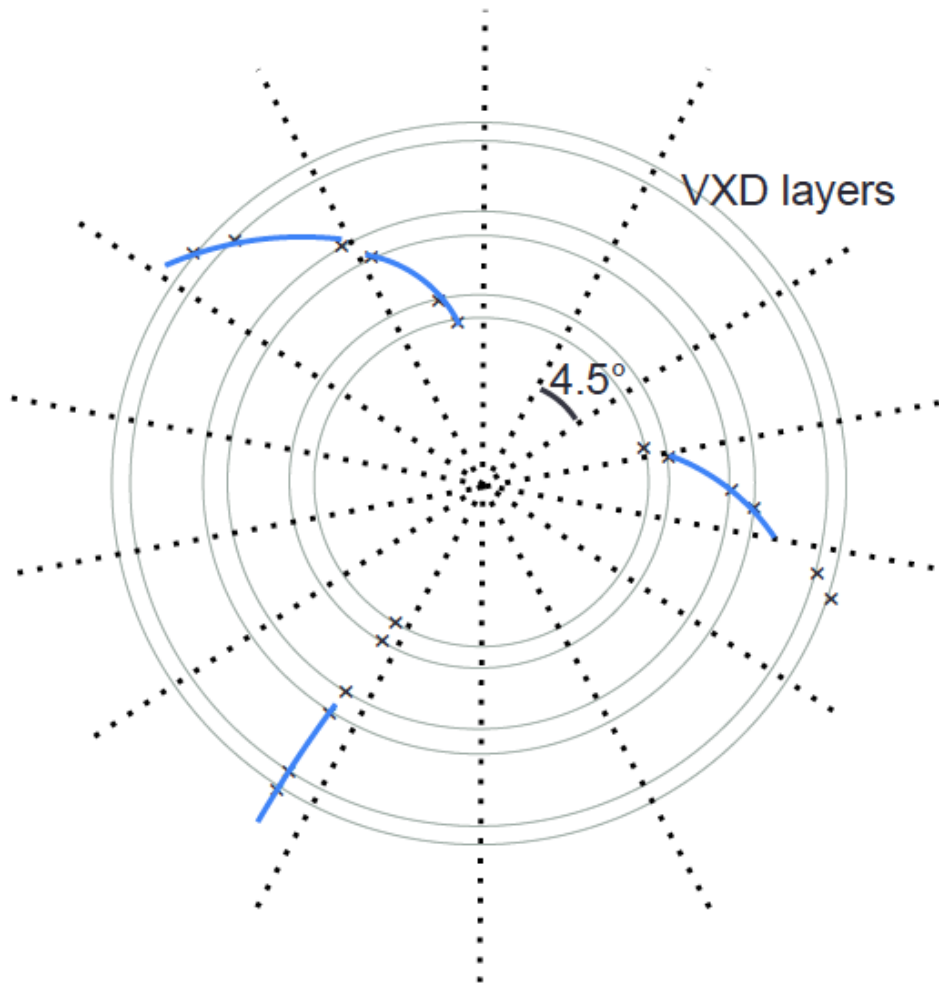


図 4.3: トラックシード生成

2. その点とトラックとの距離が規定値以下であれば、その点を一旦加えてシンプル・ヘリックスフィット
3. フィット後の χ^2/ndf が規定値以下ならその点をトラックに追加する
4. (1)に戻って、今度は他のレイヤーについて同じことをする。全てのレイヤーについて繰り返す。

こうして3つのヒットしか持たなかったトラックシードから、複数回行われる外挿により精度の高いトラックに成長する。また、外挿できなかつた回数に依らず全トラックは保存される。

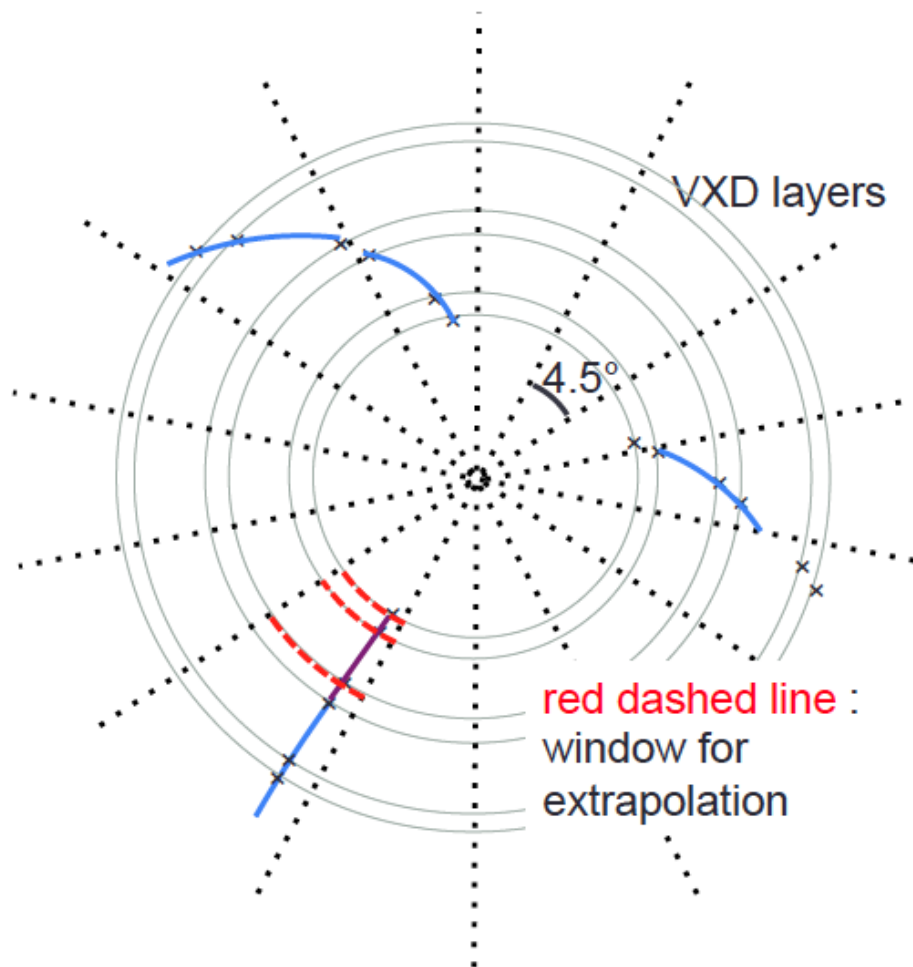


図 4.4: 外挿処理

(3) 「**トラック同士の結合処理**」：ここでは、(2) までの処理で完全なトラックにはなれなかったようなトラック同士を結合する。図 4.5 では、トラックシードのまま残されてしまったトラックが結合処理によって組み合わせられる様子を表している。結合処理では各トラックのトラックパラメータ ϕ_0 , $\tan \lambda$ を参照し、十分値に近いトラック同士をひとつのトラックと一旦みなしてシンプル・ヘリックスフィットを行う。これも同様に χ^2/ndf が規定値以下であればトラックを結合して保存する。

(4) 「**未処理のヒットのトラックへの付け足し**」：(3) の処理に至るまで、どのトラックにも追加されなかった未処理のヒットが存在する場合は、まず現段階で保存されているトラックの中で最も距離が近いトラックを探す。次にその距離が規定値以下であればシンプル・ヘリックスフィットを行い、 χ^2/ndf が閾値以下であれば追加する。図 4.6 では、未処理のヒットがトラックに追加されている様子を表している。

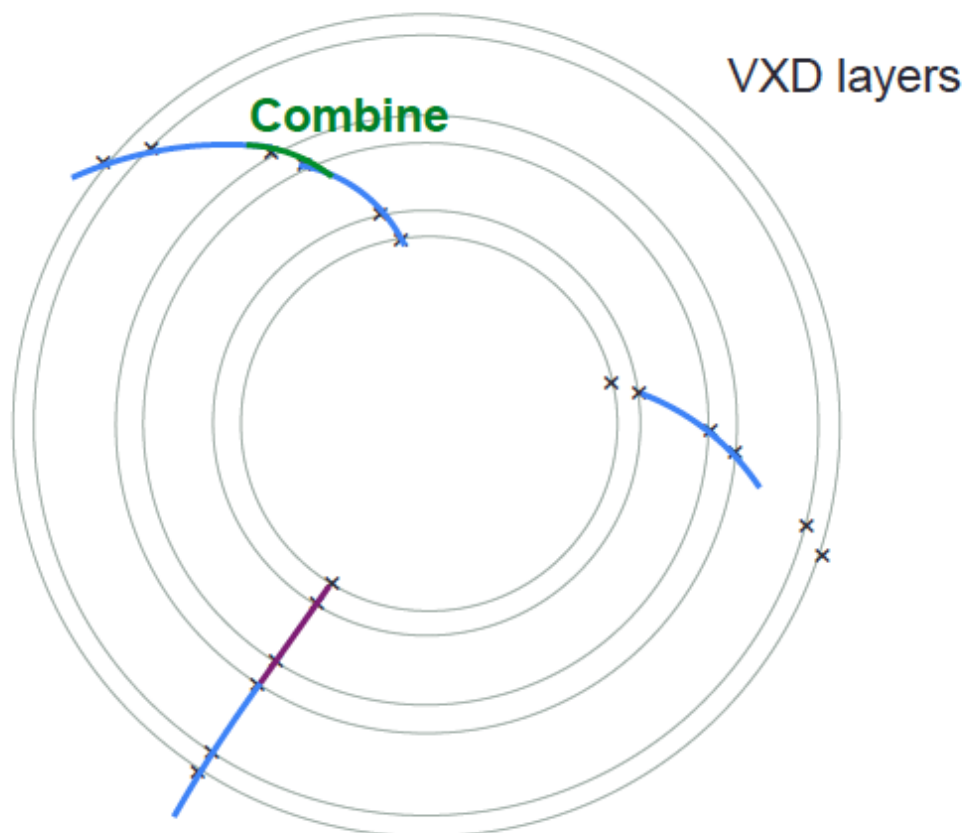


図 4.5: トラック同士の結合処理

(5) 「Kalman Filter による再フィット」:最後に、全ての保存されているトラックに対し Kalman Filter による再フィットを行い、より現実的なトラックパラメーターの値と誤差をトラックに保存させる。Kalman Filter のトラックフィッティングはヒットの座標に加え、粒子のレイヤー通過時における多重クーロン散乱、エネルギー損失を考慮する。Kalman Filter によるトラックフィッティングのアルゴリズムは KalTest [17] と呼ばれるパッケージを組み込むことで実現されている。Kalman Filter の詳細は Keisuke Fujii, The ACFA-Sim-J Group による”Extended Kalman Filter” [17] を参照して頂きたい。図 4.7 は Kalman Filter により全トラックがより正確に再構成された様子を表している。

以上で SiliconTracking の説明を終える。しかしながら、この SiliconTracking は第 7 章で述べるように、低横運動量のトラックに対するトラッキング効率が低いことが判明した。その結果を受け、低い横運動量のトラッキング効率を改善するためこの SiliconTracking をベースに新しいトラッキングアルゴリズムを開発・性能評価を行った。これについては第 7 章で詳説する。

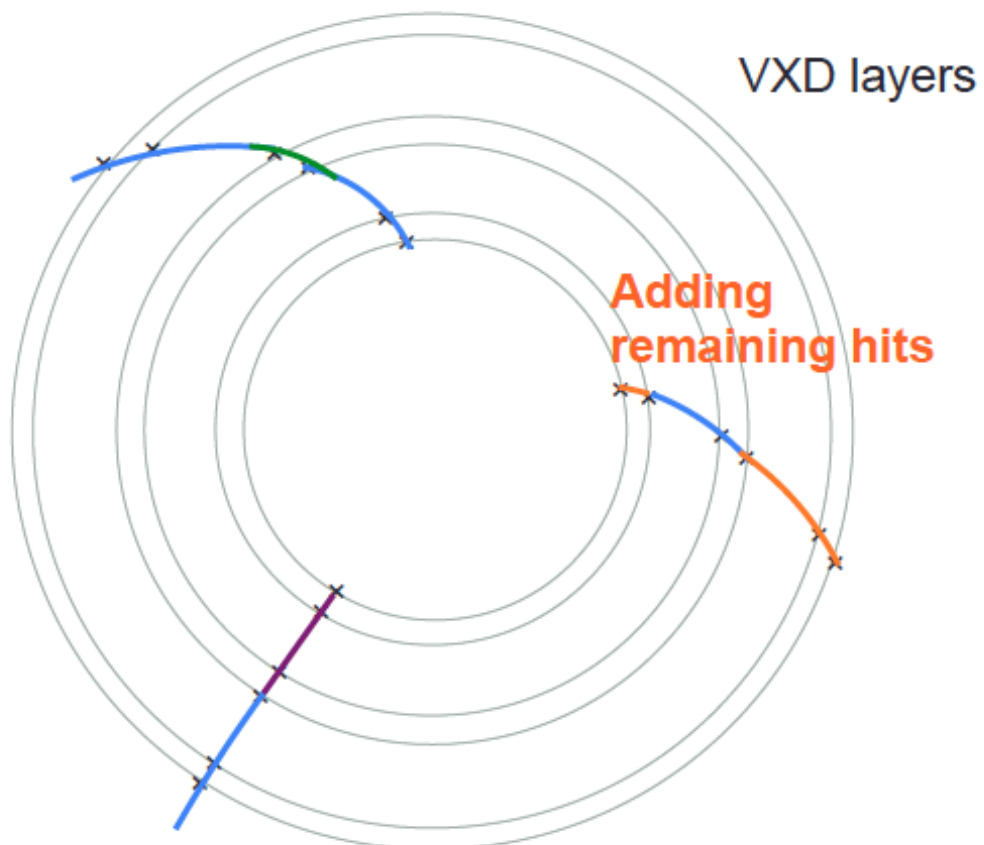


図 4.6: 未処理のヒットのトラックへの付け足し

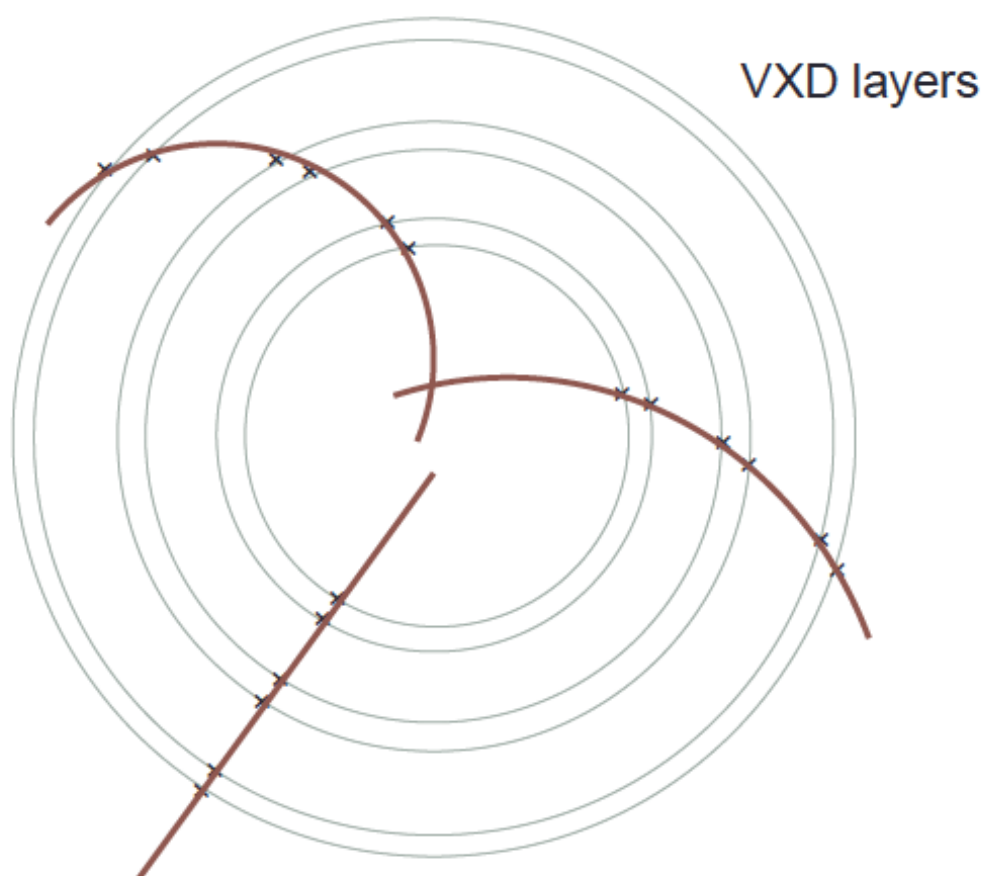


図 4.7: Kalman Filter による再フィット

第5章 占有率の評価とクラスターによるペアバックグラウンドの除去

5.1 占有率の評価

第1章 1.4.3 節で述べたように、ペアバックグラウンドによって VXD の占有率が 2~3% を越える場合、トラッキングは難しくなる。このため第3章で述べたように、FPCCD 崩壊点検出器は非常に小さなピクセル CCD を使用することで占有率を小さくする。この研究では、250, 350, 500, 1000 GeV のビームランにおける占有率をシミュレーションにより評価した。以下ではシミュレーションのセットアップと評価方法を述べ、評価結果について言及する。

5.1.1 セットアップと評価方法

ペアバックグラウンドのサンプルは Guinea Pig [18] と呼ばれるイベントジェネレーターを Mokka に入力することにより生成する。サンプル数は 250, 350, 500 GeV のビームランについては 1 トレイン分用意する。ただし、1 TeV のビームランでは 1 トレイン分のペアバックグラウンドを考慮するにはメモリの問題があるため 1000 バンチ衝突分のサンプルを用意し、占有率を 1 トレイン分に換算する。全サンプルを FPCCDDigitizer にインプットし、生成されたピクセルヒットの数と全ピクセル数からレイヤー毎の占有率を計算する。デジタル化において、ピクセルヒットと認識される energy deposit の閾値は 0.725 keV、1ADC カウントあたり 0.091 keV、ADC カウントは 7bit で表されるとする。

また、第1章 1.4.8.2 節で述べた BeamCal は電子・陽電子ペアを測定するが、BeamCal に入射して発生した電磁シャワーの 2 次粒子の内、後方散乱するものが VXD のレイヤーに進入してバックグラウンドになる。以下ではペアバックグラウンドをビーム衝突時に直接レイヤーに進入するもの、BeamCal に反射してレイヤーに進入するものに分け、それぞれ直接ペア、反跳ペアと呼ぶことにする。反跳ペアは直接ペアに比べ、VXD に進入するまでに時間がかかり、図 5.1 に示すように約 25 nsec 遅れて VXD に進入する。従ってヒットデータから時刻情報を読み込むことにより直接ペア、反跳ペアを区別できる。この方法で直接ペア、反跳ペアの占有率も評価した。

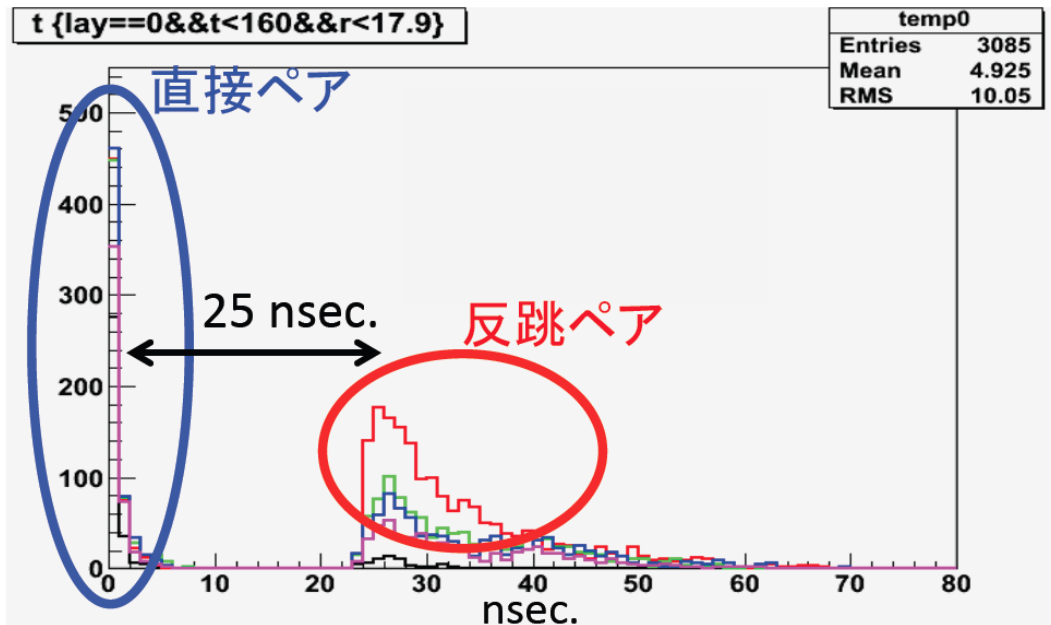


図 5.1: 直接ペアヒットと反跳ペアヒットの時刻分布

表 5.1: 各レイヤーの占有率 (250 GeV)

レイヤー	占有率 (%)	直接ペアの占有率 (%)	反跳ペアの占有率 (%)
0	0.561	0.506	0.055
1	0.353	0.319	0.034
2	0.056	0.053	0.003
3	0.045	0.043	0.002
4	0.010	0.010	0.001
5	0.009	0.008	0.001

表 5.2: 各レイヤーの占有率 (350 GeV)

レイヤー	占有率 (%)	直接ペアの占有率 (%)	反跳ペアの占有率 (%)
0	0.702	0.622	0.080
1	0.443	0.392	0.052
2	0.067	0.063	0.004
3	0.055	0.052	0.004
4	0.013	0.012	0.001
5	0.011	0.010	0.001

5.1.2 評価結果

各重心系エネルギーにおける占有率の評価結果は表 5.1 ~ 5.4 の通りである。1 バンチ衝突あたりの平均ヒット数密度は表 5.5 ~ 5.8 に示した。

表 5.3: 各レイヤーの占有率 (500 GeV)

レイヤー	占有率 (%)	直接ペアの占有率 (%)	反跳ペアの占有率 (%)
0	1.244	1.053	0.191
1	0.779	0.661	0.118
2	0.122	0.113	0.009
3	0.100	0.092	0.008
4	0.023	0.021	0.002
5	0.020	0.018	0.002

表 5.4: 各レイヤーの占有率 (1 TeV)

レイヤー	占有率 (%)	直接ペアの占有率 (%)	反跳ペアの占有率 (%)
0	12.752	3.386	9.367
1	7.010	2.099	4.911
2	0.458	0.345	0.113
3	0.379	0.281	0.098
4	0.099	0.065	0.034
5	0.089	0.057	0.032

表 5.5: 各レイヤーのヒット数密度 [hits/cm²/BX](250 GeV)

レイヤー	ヒット数密度	直接ペアのヒット数密度	反跳ペアのヒット数密度
0	17.110	15.439	1.671
1	10.771	9.735	1.036
2	0.424	0.404	0.020
3	0.345	0.326	0.018
4	0.080	0.076	0.004
5	0.068	0.064	0.004

表 5.6: 各レイヤーのヒット数密度 [hits/cm²/BX](350 GeV)

レイヤー	ヒット数密度	直接ペアのヒット数密度	反跳ペアのヒット数密度
0	21.392	18.952	2.440
1	13.520	11.936	1.583
2	0.514	0.484	0.031
3	0.422	0.395	0.028
4	0.099	0.092	0.008
5	0.086	0.080	0.006

表 5.1 ~ 5.4 の評価結果を見ると、500 GeV のビームランまではレイヤー 0 の占有率が 2 % を越えないため問題ないが、1 TeV のビームランではレイヤー 0 が 12.8% と非常に大きなものになってしまうことが判明した。このため、現状のデザインでは

表 5.7: 各レイヤーのヒット数密度 [hits/cm²/BX](500 GeV)

レイヤー	ヒット数密度	直接ペアのヒット数密度	反跳ペアのヒット数密度
0	38.307	32.426	5.881
1	23.995	20.367	3.628
2	0.940	0.868	0.072
3	0.773	0.710	0.063
4	0.177	0.161	0.016
5	0.154	0.139	0.014

表 5.8: 各レイヤーのヒット数密度 [(hits/cm²/BX)](1 TeV)

レイヤー	ヒット数密度	直接ペアのヒット数密度	反跳ペアのヒット数密度
0	208.203	55.274	152.928
1	114.455	34.275	80.180
2	1.869	1.408	0.461
3	1.546	1.148	0.398
4	0.403	0.265	0.139
5	0.364	0.233	0.131

FPCCD 崩壊点検出器を 1 TeV のビームランで使用することは非常に難しい。対策として以下のデザイン修正案が考えられる。

- (1). レイヤー 0, 1 をビーム衝突点から遠ざける
- (2). ピクセルサイズを更に小さくする
- (3). BeamCal の設計を最適化する
- (4). クラスターの形状からペアバックグラウンドヒットを除外する

(1) は大多数のペアバックグラウンドが低い横運動量を持つため、それらが届かなくなるような位置までレイヤーを離すということである。離すにつれ崩壊点分解能は落ちてしまうので、物理パフォーマンスの要求から適度な距離を検討する必要がある。

(2) はサイズが小さくなることで全体のピクセル数を増加させ占有率を低下させる。確証はないが、将来的には $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ まで小さくできるかもしれない。ただし、その場合ピクセル数は $5\ \mu\text{m}$ 角の時に比べ $25/16 = 1.56$ 倍しか増加しないため、他の修正案と併用する必要がある。

(3) 1 TeV の表を見ると、反跳ペアの占有率がレイヤー 0 で 10.1 % となっており、直接ペアの 3.7 % に比べ 3 倍近く存在する。このため、BeamCal がペアバックグラウンドを反射しないように最適化されれば占有率が下げられそうだが、BeamCal のビームパラメータ測定精度を下げないようにする必要がある。

(4) 第 3 章 3.1.2 節で述べたように、クラスター形状と位置の相関を利用してペアバックグラウンドを除去できると考えられているが、この占有率の評価をした時には、

そのアルゴリズムは FPCCDClustering には実装されていなかった。このため、クラスターを用いたペアバックグラウンドの除去のアルゴリズムを開発した。詳しくは 5.2 節で述べる。

また、ペアバックグラウンドヒットの ζ 分布、 ξ 分布を付録 C の図 C.1 ~ C.24 に示した。 $(\zeta, \xi$ の定義は付録 C か本章の 5.2.2 節を参照)

5.1.3 結論

FPCCD 崩壊点検出器の占有率は、500 GeV のビームランまでなら問題ないと見積もられた。しかし、1 TeV のビームランでは最内層で 12.8% と、現状のデザインではトラッキングが非常に難しくなることが予測される。このため、デザインの最適化案として、レイヤーをビーム衝突点から遠ざける、ピクセルサイズを小さくする、BeamCal のデザインを最適化する、次節で述べるクラスターの形状からペアバックグラウンドを除外すること等が考えられる。

5.2 クラスターによるペアバックグラウンドの除去

本節では私が開発したクラスターの形状と位置の相関を用いたペアバックグラウンド除外アルゴリズムについて説明する。アルゴリズムの決定のため、最初にペアバックグラウンドとシグナルイベントのクラスターの違いを定量的に分析した。シグナルイベントと言っても様々なものがあるが、本研究では $t\bar{t} \rightarrow 6jets$ ($E_{CM} = 350$ GeV) をシグナルイベントの代表とみなして解析した。理由は終状態が 6 個のジェットとなっているため多数の粒子が様々なパターンで VXD を通過するからである。本研究では汎用的なアルゴリズムを開発した。

5.2.1 セットアップ

以下ではシミュレーションのセットアップについて説明する。 $t\bar{t} \rightarrow 6jets$ ($E_{CM} = 350$ GeV) のイベントサンプルは、イベントジェネレーターの Pythia [19] を Mokka に入力して 1000 イベント生成する。ペアバックグラウンドのサンプルは占有率の評価のために生成したものと同一である。両サンプルを FPCCDDigitizer に入力し、そのアウトプットを FPCCDClustering に入力してクラスターを生成する。

5.2.2 第一種クラスターカットの説明

まず最内層にあるシグナルとペアバックグラウンドのクラスターについて以下を調べた。

1. クラスター内のピクセル数

2. クラスタの ξ 方向の長さ
3. クラスタの ζ 方向の長さ

ここでの、 ξ 、 ζ 方向の定義は、レイヤーを構成する板(ラダー)の平面を ξ - ζ 平面とし、 ζ 方向を磁場方向と平行に取り、 ξ 方向を ζ 方向と直交する方向に取る(つまり ζ 方向と z 方向は数学的には同値だが、 ζ はラダー平面上に取られた座標系を意識し、 z 方向は実験室系の座標系を意識している点で区別される)。図5.4の右上はFPCCD崩壊点検出器の外観イメージであるが、レイヤーを構成する、イメージ内の赤い四角の枠で囲まれた板がラダーである。イメージ図ではラダー上に ξ 軸、 ζ 軸を明記したので参照していただきたい。

(1) クラスタ内のピクセル数

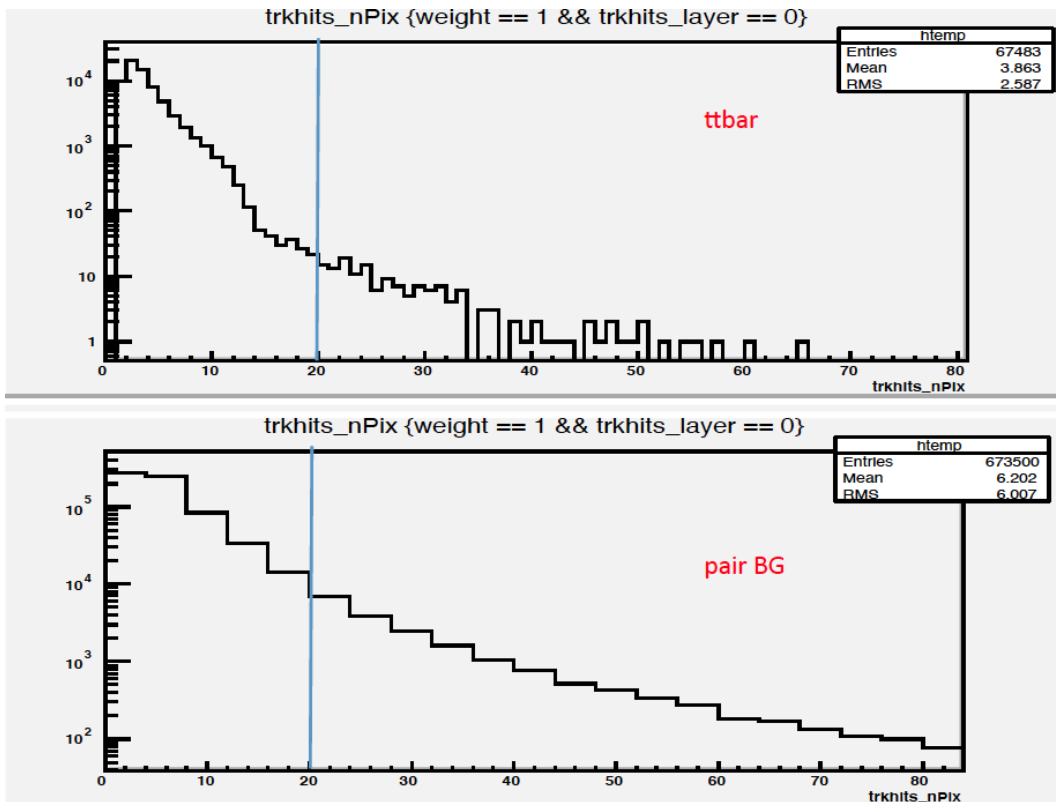


図 5.2: クラスタ内のピクセル数分布

図5.2はクラスタ内のピクセル数分布である。上側が $t\bar{t} \rightarrow 6jets$ イベントにより生成されたクラスタについて、下側がペアバックグラウンドにより生成されたクラスタについてである。図から判断して、ピクセル数が20個以下であることを要求すれば $t\bar{t}$ のクラスタを残しつつペアバックグラウンドのクラスタを除外することが分かる。

(2) クラスタの ξ 方向の長さ

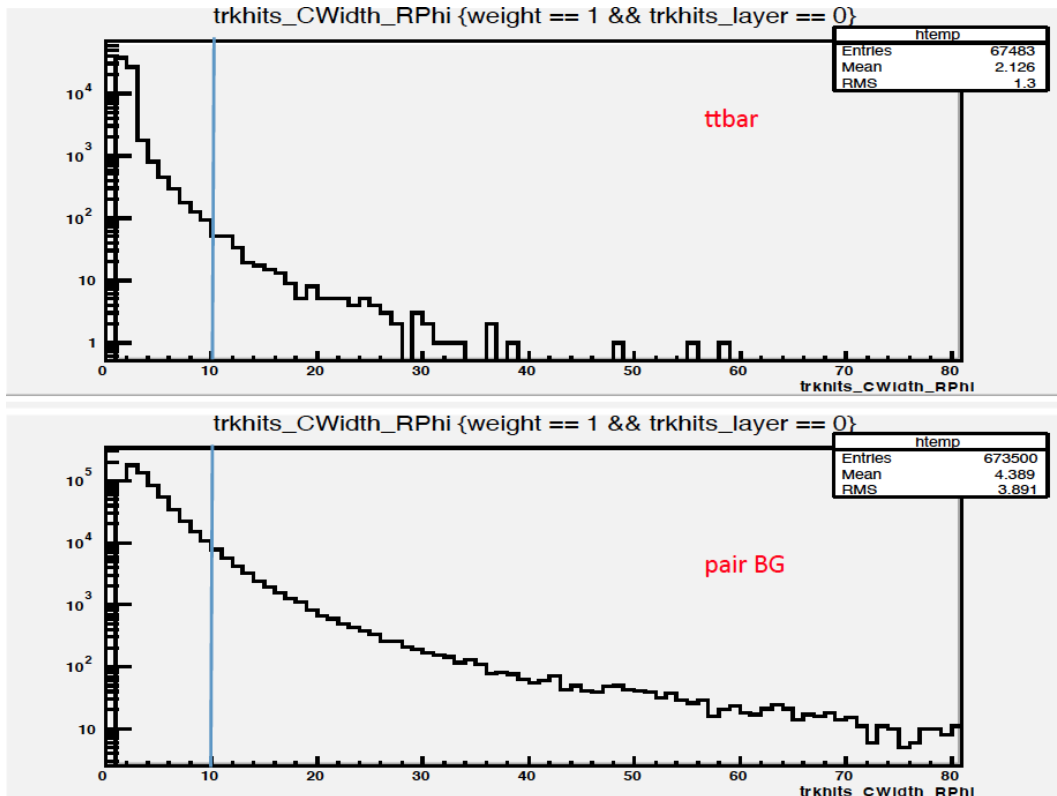


図 5.3: クラスターの ξ 方向の長さ分布

図 5.3 はクラスターの ξ 方向の長さ分布である (単位はピクセルあたりの長さで表記)。図から判断して、 ξ 方向の長さがピクセル 10 個分の長さ以下であることを要求すれば $t\bar{t}$ のクラスターを保持しつつ、ペアバックグラウンドのクラスターを落とせる。

(3) クラスターの ζ 方向の長さ

図 5.4 はクラスターの ζ 方向の長さ分布である (単位はピクセルあたりの長さで表記)。図から判断して、 ζ 方向の長さがピクセル 15 個分の長さ以下であることを要求すれば $t\bar{t}$ のクラスターを保持しつつ、ペアバックグラウンドのクラスターを落とせる。

(1)~(3) は、どれもペアバックグラウンドクラスターの方が、シグナルクラスターに比べ長いことを示している。これはペアバックグラウンドの方がシグナル粒子に比べ横運動量が低く、レイヤーに浅い角度で入射し、有感層内を長く飛行するためである。

レイヤー 2 も (1)~(3) のチェックを行った。以上の得られた情報から表 5.9 のカット条件を考えた。

このカットを以後、**第一種クラスターカット**と呼ぶことにする。表 5.9 のカットを実際に適用すると、クラスターの残存率、ピクセルヒットの残存率は表 5.10、5.11 のようになった。

クラスターの形状のみを条件に使う第一種クラスターカットでは、ペアバックグラウンドクラスターを大幅に除外することは難しいが、シグナルクラスターを 99% 以上保持できる。よって、第一種クラスターカットは有効にし、新たにクラスターの形

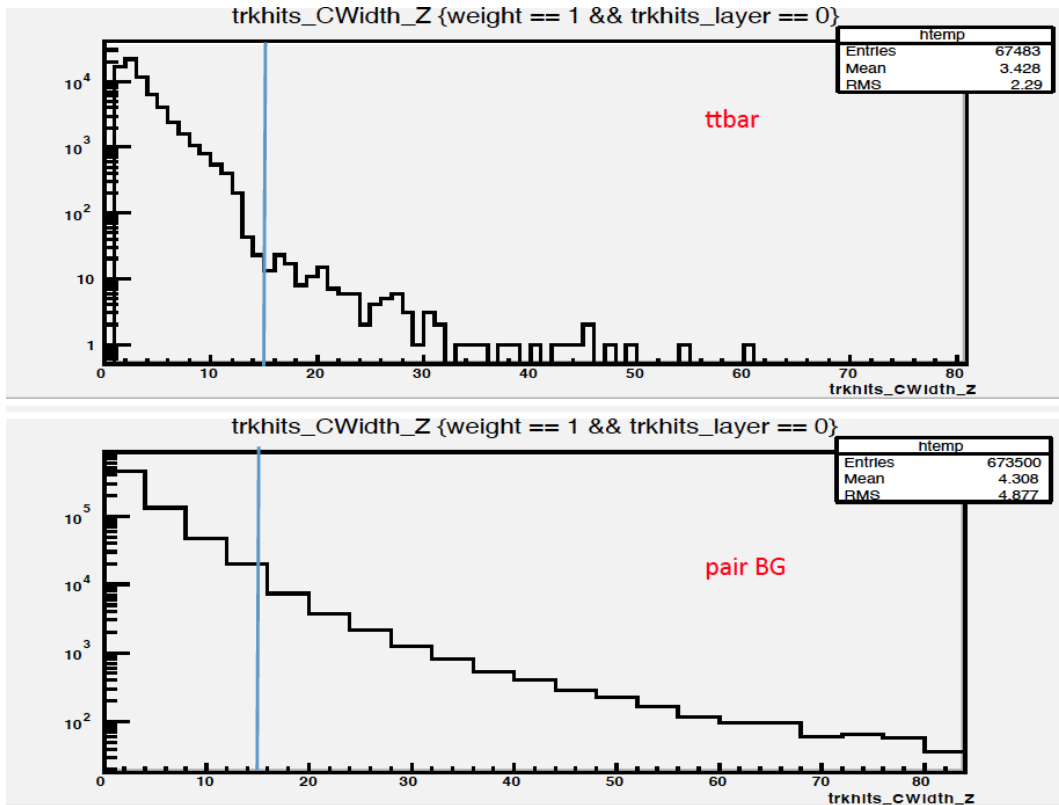
図 5.4: クラスターの ζ 方向の長さ分布

表 5.9: 第一種クラスターカット

レイヤー	ピクセル数	ξ 方向の長さ	ζ 方向の長さ
0(ピクセル:5 μm)	< 20	< 10	< 15
2(10 μm)	< 15	< 6	< 8

状と位置の相関を用いたカットを上乗せすることにする。

表 5.10: 第一種クラスターカットによるクラスター残存率

レイヤー	シグナルクラスター残存率 [%]	ペア BG クラスター残存率 [%]
0(ピクセル:5 μm)	99.28	92.85
2(10 μm)	99.21	91.81

表 5.11: 第一種クラスターカットによるピクセルヒット残存率

レイヤー	シグナルピクセルヒット残存 [%]	ペア BG ピクセルヒット残存率 [%]
0(ピクセル:5 μ m)	94.50	73.37
2(10 μ m)	95.15	73.11

5.2.3 第二種クラスターカットの説明

ここでは、クラスター形状と位置の相関を用いたカットについて述べる。第一種クラスターカットがクラスター形状のみによるカットだったので、区別してこれを第二種クラスターカットと呼ぶ。

第二種クラスターカットについては、次の二種類のカットを実装した。

1. クラスターの傾きと位置の相関を使ったカット (傾きカット)
2. クラスターの z 座標と ζ 方向の幅の相関を使ったカット (ζ 幅カット)

(1) 傾きカット

シグナル粒子はビーム衝突点近くで発生し、放射状に拡がる。このためほぼ全てのシグナルクラスターの方向は、ビーム衝突点から放射状に伸びる方向に向く。一方、ペアバックグラウンドはビーム衝突点から離れた様々な位置で発生するためほぼ無作為に検出器内を飛び回る。また、ペアバックグラウンドは横運動量が低いいため、何度も VXD に侵入してくる効果もあり、クラスターの形状と位置の相関関係は殆ど無い。

この考え方に従って以下で説明する傾きカットを実装した。まず、図 5.5 の右上は FPCCD 崩壊点検出器の外観イメージであるが、イメージ内の赤い四角の枠で囲まれたラダーについて考える。続いて、“右上がりクラスター”を定義する。ここで“右上がりクラスター”という時は、図 5.5 の右下にあるクラスターの絵のように $-\zeta$, $-\xi$ 方向から $+\zeta$, $+\xi$ 方向に、あるいはその逆の方向に粒子が通過したことが推定できるクラスターのことを指す。そのようなクラスターから得られるヒット位置 (構成されるピクセルの energy deposit の加重平均から計算される推定点) をラダー平面にプロットしたのが図 5.5 の左上の二次元ヒストグラムである。原点 O はビーム衝突点からラダー上に垂線を伸ばした時に直交する点である。図中の Minor Area と書いてある領域が左上、右下に存在し、それ以外の領域は多くの右上がりクラスターが存在することから、シグナルイベントはやはりビーム衝突点から放射状に広がっていることが確認できる。

同様にペアバックグラウンドについても右上がりクラスターの分布を見てみると、図 5.6 にあるように一様に右上がりクラスターが存在する事が分かる。つまり、図 5.5 の Minor Area にある右上がりクラスターをカットすれば、シグナルクラスターを残しつつペアバックグラウンドクラスターを大きく除外できる。しかし、Minor Area にある右上がりクラスターを全て消すとペアバックグラウンドクラスターを 37% ほど落とせるが、シグナルクラスターも約 4% ほど無くなってしまう。そこで

$$\xi \times \zeta < -Z_{par} : (Z_{par} > 0) \quad (5.1)$$

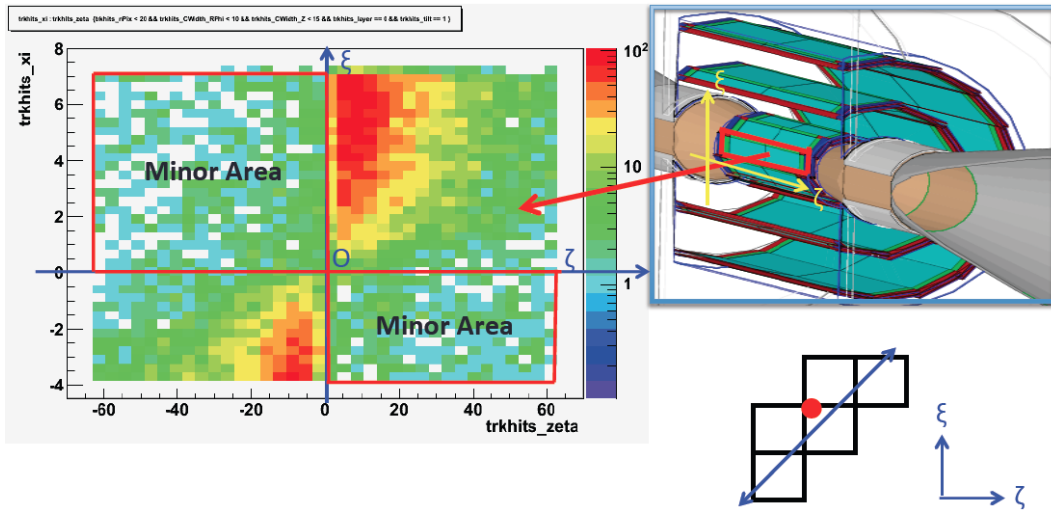


図 5.5: $t\bar{t} \rightarrow 6jets@ 350 \text{ GeV}$ により生成された右上がりクラスタのヒット位置分布

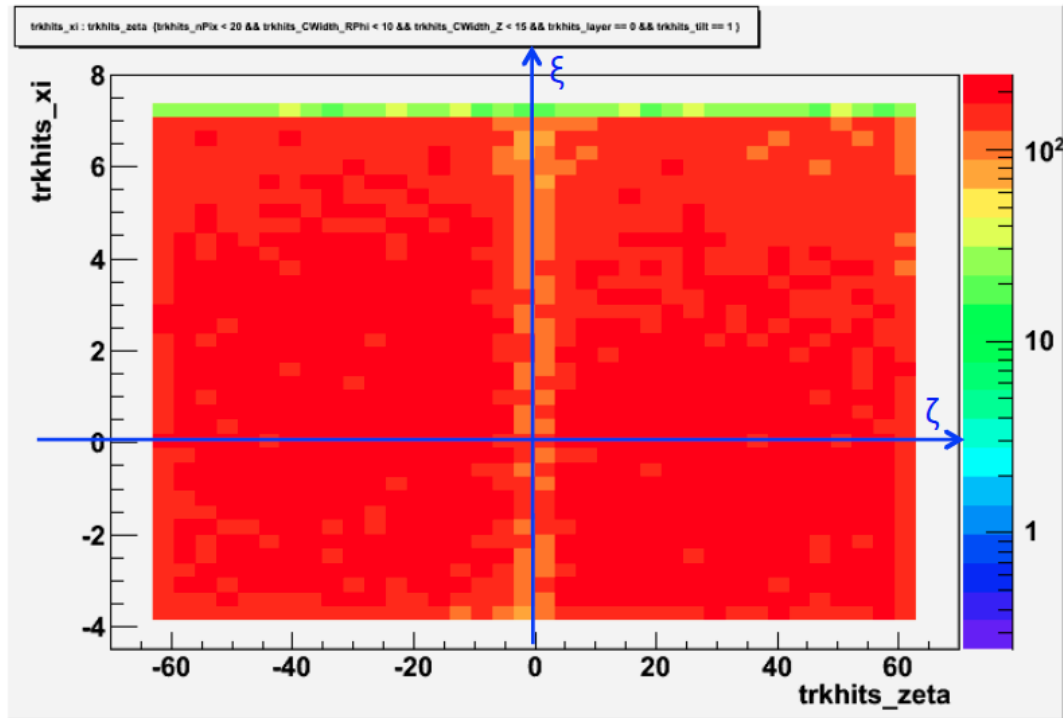


図 5.6: ペアバックグラウンドにより生成された右上がりクラスタの位置分布

という不等式を使って図 5.7 にあるように原点付近を避けるようにカットすることにした。 Z_{par} が 0 から離れるにつれ原点付近の右上がりクラスタを避けるようになる。これまでと同様の処理を”左上がりクラスタ”についても行い、幾つかの Z_{par} パラメータに分けてクラスタ残存率を確認した。表 5.12 は第一種クラスタカット後に傾きカットをしたときのクラスタ残存率である。表 5.12 から分かるように、 Z_{par} を

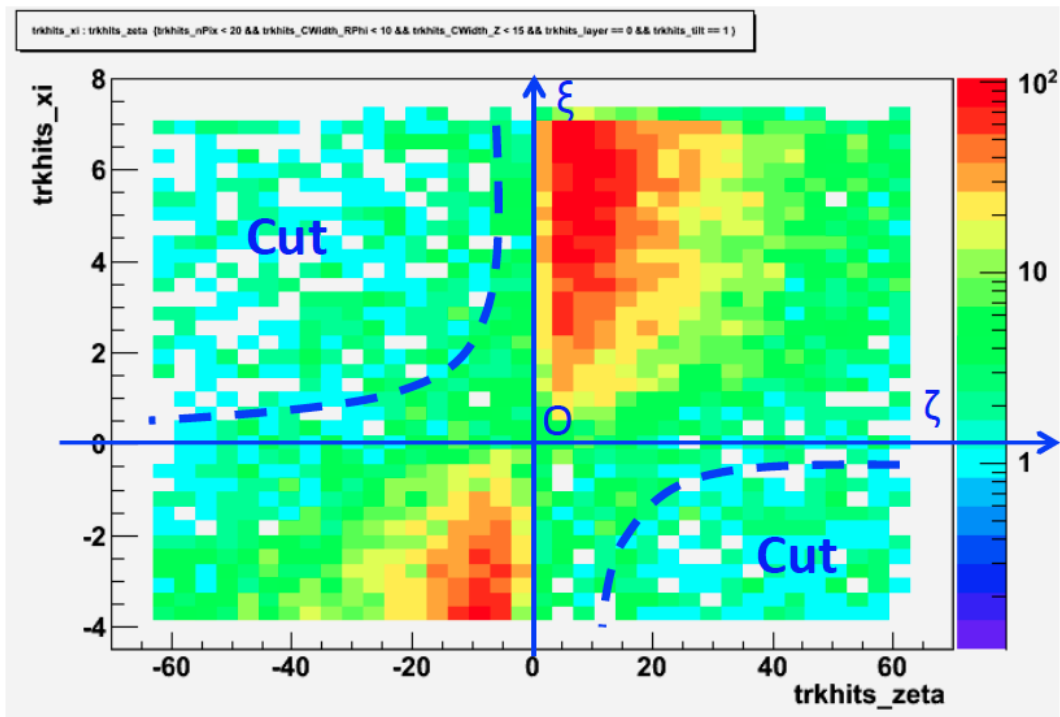


図 5.7: 右上がりクラスターカットの範囲

上げればシグナルクラスター残存率を保持できるが、その分ペアバックグラウンドも残ってしまう。シグナルクラスターをどこまで落としていいかは明確では無く、今後の研究課題となる。当面はシグナルクラスター残存率を 98% に保持することに比重を置いて、レイヤー 0, 1 では $Z_{par} = 90 \text{ mm}^2$ 、レイヤー 2, 3 では $Z_{par} = 280 \text{ mm}^2$ 、レイヤー 4, 5 では $Z_{par} = 600 \text{ mm}^2$ をデフォルト設定としている。デフォルト設定におけるピクセルヒット残存率は表 5.13 の通りである。

(2) ζ 幅カット

ζ 幅カットはクラスターの z 座標と ζ 方向の幅の相関を使ってペアバックグラウンド

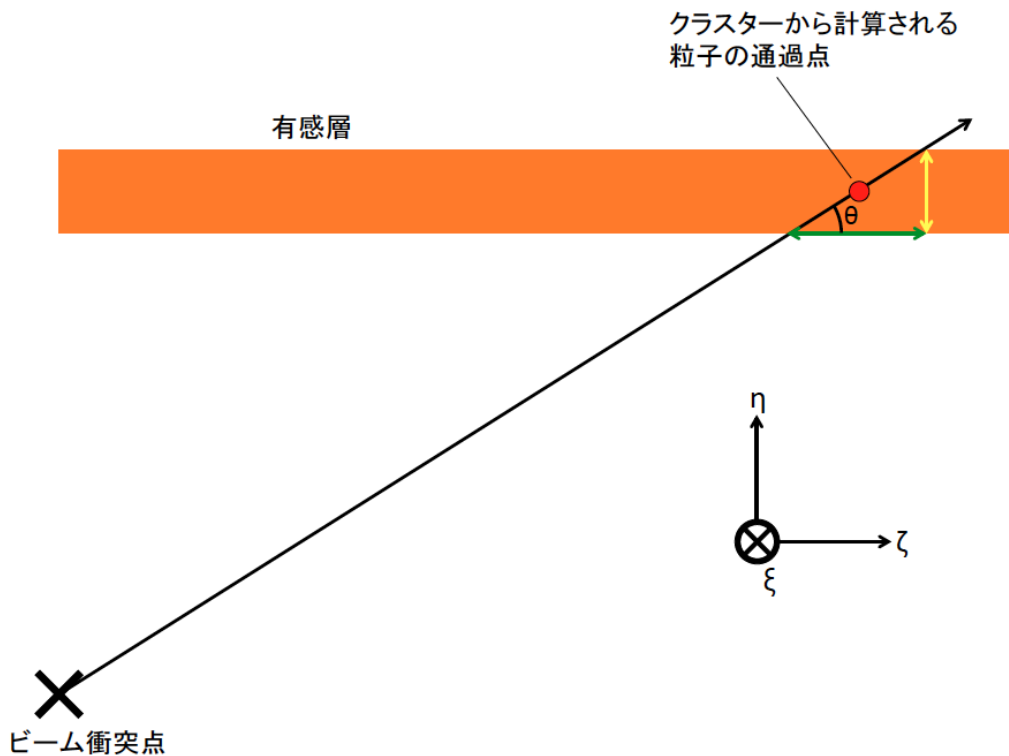
表 5.12: 第一種クラスターカット + 傾きカットによるクラスター残存率

レイヤー	$Z_{par} [\text{mm}^2]$	シグナルクラスター残存率 [%]	ペア BG クラスター残存率 [%]
0(ピクセル: $5\mu\text{m}$)	0	95.83	62.52
	30	97.35	71.64
	60	97.93	77.31
	90	98.33	81.41
2($10\mu\text{m}$)	0	96.54	71.13
	70	97.33	74.74
	140	97.72	77.58
	280	98.24	81.91

表 5.13: 第一種クラスターカット + 傾きカットによるピクセルヒット残存率

レイヤー	Z_{par} [mm^2]	シグナルピクセルヒット残存率 [%]	ペア BG ピクセルヒット残存率 [%]
0(ピクセル: $5\mu m$)	90	93.04	61.32
2($10\mu m$)	280	93.36	61.56

クラスターを除外する。傾きカットは、右上がりクラスター、左上がりクラスターに関する要求だったので、直線的なクラスターについては何もしなかった。 ζ 幅カットは直線的なクラスターも考慮するため、傾きカットの弱点を補う役割を果たす。 ζ 幅カットは基本的には傾きカットと同じで、シグナル粒子がビーム衝突点から放射状に拡がり、ペアバックグラウンドはビーム衝突点から離れた様々な場所から無作為に拡がる、という性質を利用する。仮にシグナル粒子が正確にビーム衝突点から発生するとし、あるレイヤーのラダーにクラスターを作ったとする。図 5.8 はその状況を η - ζ 平面に射影したものである。ここで、 η は ξ - ζ 平面 (あるいはラダー平面) に対し垂直

図 5.8: ζ 幅カットの説明

な方向を指す。図中の赤い点がクラスターを構成するピクセルの energy deposit の加重平均から計算された粒子の通過点だが、今はシグナル粒子が正確にビーム衝突点から発生すると仮定してるので、この点の座標から粒子がラダーに対しどの角度で入射

したのかが分かる。ただし、通過する粒子が図のように直線的に飛ぶ程度には横運動量があることを仮定している。このとき、通過点から図中の角度 θ を求め、有感層の厚み(図中の黄色の両矢印)から粒子の有感層内で進んだ z 方向に関する距離(図中の緑色の両矢印)を以下のように計算できる。

$$\text{有感層内で進んだ } z \text{ 方向に関する距離} = \frac{\text{有感層の厚み}}{\tan \theta} \quad (5.2)$$

この z 方向に関する距離は、幾何学的にはクラスターの z 方向の幅とピクセル幅分の誤差の範囲内で一致する。しかし、実際にはシグナル粒子は正確にビーム衝突点から発生しないので必ずしも一致しないが、ペアバックグラウンドに比べればビーム衝突点に近いところで発生しているため比較的相関があると考えられる。図5.9は $t\bar{t}$ イベント(左)とペアバックグラウンド(右)が生成するクラスターの z 座標(mm)とピクセル幅あたりの z 方向の幅を示している。

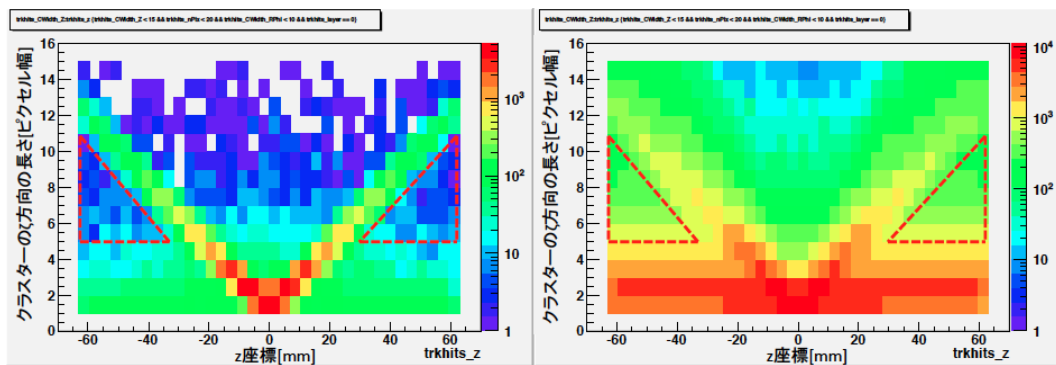


図 5.9: $t\bar{t}$ イベントとペア BG のクラスターの z 座標とピクセルあたりの z 方向の幅

$t\bar{t}$ イベントもペアバックグラウンドも“ z 座標” \propto “ z 方向の幅”の関係を大体満たしているが、やはり $t\bar{t}$ イベントの方がより相関が強いと言える。ここで、 z 座標が0から離れているにも関わらず z 方向の幅が短いものもあるが、これは以下の4つの内のどれかに起因すると考えられる。一つ目は、本来なら長いクラスターが生成されるべきだったものが、クラスターに含まれるべきピクセルの energy deposit が閾値より低くヒットと認識されず、独立した2つのクラスターとみなされてしまった場合である。二つ目は、粒子が同レイヤー上の隣接する2つのラダーの間を通過する場合、別々のラダー上にあるクラスターとみなされてしまう場合である。このケースの対策は今後のクラスタリングアルゴリズムの開発に盛り込まれる。三つ目は、ビーム衝突点からかなり離れた場所から発生する粒子だった場合である。そのような粒子の大半は、シグナル粒子がラダーに侵入した時にピクセルから弾き出された電子であり、 $B_{par} = 4$ 、 $C_{par} = 4$ の時に落とされるシグナルクラスターの58%がこのケースに該当することが確認された。これらの粒子も物理解析時に役立つため、除外してはいけない。四つ目は、横運動量が低く、 $\tan \lambda \sim 0$ の粒子が何度もVXDに戻ってきてラダーに進入する場合である(トラックパラメータ $\tan \lambda$ の定義は付録Bを参照)。いずれにせよ、現状は三つ目に触れた電子の存在もあって、上記のクラスターは落とさないことにして

いる。よって、カットする範囲は図 5.9 の赤い三角形の中とする。この三角形は

$$y_1 = \frac{\text{有感層の厚み}}{|\tan \theta| \cdot \text{そのレイヤーでのピクセル幅}} - B_{par} \quad (5.3)$$

$$y_2 = C_{par} \quad (5.4)$$

$$(5.5)$$

の 2 式で表現できる。 B_{par} と C_{par} によって三角形の大きさを調整できる。レイヤー 0 で $C_{par} = 4 \times \text{ピクセル幅}$ 、レイヤー 2 で $C_{par} = 2 \times \text{ピクセル幅}$ とし、幾つかの B_{par} についてシグナルクラスタ残存率とペアバックグラウンドクラスタ残存率を評価した。それが表 5.14 である (値は第一種クラスタカット + ζ 幅カット)。

表 5.14: 第一種クラスタカット + ζ 幅カットによるクラスタ残存率

レイヤー	B_{par} [ピクセル幅]	シグナルクラスタ残存率 [%]	ペア BG クラスタ残存率 [%]
0(ピクセル:5 μm)	0	96.35	86.97
	2	98.87	89.64
	4	99.10	91.38
	6	99.26	92.63
2(10 μm)	0	98.33	88.23
	1	99.05	90.31
	2	99.21	91.76
	3	99.21	91.81

当面はシグナルクラスタ残存率を 98% に保持することに比重を置いて、レイヤー 0, 1 では $B_{par} = 2 \times 5 \mu\text{m}$, $C_{par} = 4 \times 5 \mu\text{m}$ 、レイヤー 2~5 では $B_{par} = 1 \times 10 \mu\text{m}$, $C_{par} = 2 \times 10 \mu\text{m}$ をデフォルト設定としている。デフォルト設定におけるピクセルヒット残存率は表 5.15 の通りである。

5.2.4 第一種クラスタカット + 傾きカット + ζ 幅カット

これまでに述べた第一種クラスタカット、第二種クラスタカット 2 つを全て使うと、クラスタ残存率、ピクセルヒット残存率は表 5.16、5.17 のようになる (各カットのパラメータはデフォルト値を使用)。

上記 3 種のクラスタカットアルゴリズムは FPCCDClustering に新たに実装した。以降の章では上記のカットアルゴリズムを使用する場合は明記する。

表 5.15: 第一種クラスタカット + ζ 幅カットによるピクセルヒット残存率

レイヤー	B_{par} [ピクセル幅]	シグナルピクセルヒット残存率 [%]	ペア BG ピクセルヒット残存率 [%]
0(ピクセル:5 μm)	2	93.71	69.38
2(10 μm)	1	94.87	71.43

表 5.16: 全カット後のクラスター残存率

レイヤー	シグナルクラスター残存率 [%]	ペア BG クラスター残存率 [%]
0(ピクセル:5 μ m)	98.00	79.06
1(5 μ m)	98.18	79.79
2(10 μ m)	98.13	80.85
3(10 μ m)	98.13	81.16
4(10 μ m)	98.73	88.02
5(10 μ m)	98.63	87.56

表 5.17: 全カット後のピクセルヒット残存率

レイヤー	シグナルピクセルヒット残存率 [%]	ペア BG ピクセルヒット残存率 [%]
0(ピクセル:5 μ m)	92.42	58.43
1(5 μ m)	93.51	60.34
2(10 μ m)	93.16	60.41
3(10 μ m)	92.73	61.42
4(10 μ m)	94.08	69.18
5(10 μ m)	94.04	68.91

第6章 インパクトパラメータ分解能の評価

本章では FPCCD 崩壊点検出器のインパクトパラメータ分解能の性能評価について述べる。FPCCD 崩壊点検出器は非常に小さなピクセルサイズと、クラスター化による位置分解能の向上によって高いインパクトパラメータ分解能を持つことが期待される。このためシミュレーションによりインパクトパラメータ分解能を見積もり定量的に性能を示すことは、デザインの妥当性、将来性を確かめるために重要である。またフレーバタグは崩壊点分解能に大きく依存するため、フレーバタグの性能評価を行う上でインパクトパラメータ分解能の見積もりは必要不可欠である。

6.1 セットアップと評価方法

サンプルはインパクトパラメータ分解能や基本的なトラッキング性能の評価に良く使われる single μ^+ イベントを使用する。このイベントは名前の通りひとつの μ^+ がビーム衝突点から発生する過程だが、電磁シャワーや強い相互作用反応を起こさないのでインパクトパラメータ分解能を評価しやすい。

トラッキングアルゴリズムは第4章4.3節で述べた現行のトラッキングアルゴリズムを使用する。トラッキング後、再構成されたトラックのトラックパラメータ d_0 (トラックパラメータについては付録Bを参照)の分解能は、実は式(1.1)で表されるインパクトパラメータ分解能と全く同じ物理量である。よって d_0 の分解能を見積もれば良い。single μ^+ は正確にビーム衝突点から発生するため、真の d_0 の値は常に0となる。このため、得られたトラックの d_0 をガウシアンフィットすることで σ_{d_0} を求める (図6.1)。

また、比較対象として現在ILDのシミュレーション研究で標準的に使用されているVXDの設定でも評価した。このVXDを以下ではCMOS崩壊点検出器と呼ぶ。CMOS崩壊点検出器の各レイヤーの位置分解能、読み出し時間の設定は表6.1の通りである。CMOS崩壊点検出器のデジタルライザーは表6.1の位置分解能の設定に従ってヒットの位置をガウシアンでぼかすので、理想的な場合の分解能を仮定しており、FPCCDDigitizerに比べ現実的なデジタル化とは言えない。なお、インパクトパラメータ分解能の評価に限り、FPCCD崩壊点検出器も同様にFPCCDDigitizer、FPCCDClusteringによるデジタル化、クラスターリング処理は行わず、ヒットの位置をガウシアンでぼかすだけにする(理由は後述)。この時の位置分解能の設定は表6.2の通りである。また、読み出し時間は本章のインパクトパラメータ分解能の評価と直接関係しないが、第8章のペアバックグラウンドを考慮したフレーバタグの性能評価に関係する。

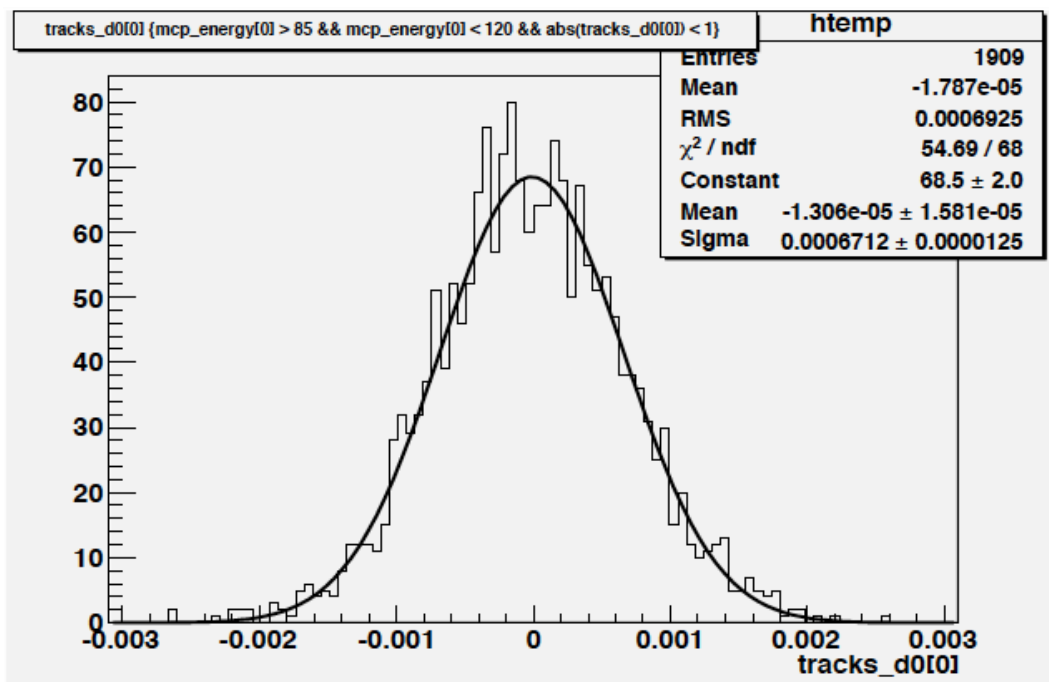


図 6.1: d_0 のガウシアンフィット ($p = 100 \text{ GeV}/c$, $\theta = 85^\circ$)

6.2 評価結果

図 6.2 には ILC におけるインパクトパラメータ分解能の要求性能 (式 (1.1)) と、FPCCD、CMOS を使用した時のインパクトパラメータ分解能を示した。黒い線と赤い線は μ^+ 発生時における進行方向と磁場方向との間の角度が 20° 、 85° であることを示す。これは式 (1.1) の θ のことである。横軸は運動量の大きさ [GeV/c]、縦軸はインパクトパラメータ分解能 [mm] である。まず図 6.2 を見て分かることは CMOS、FPCCD 共に要求性能を満たしていることがわかり、CMOS に比べ FPCCD の方が全運動量領域で優れている事がわかる。また、多重クーロン散乱の影響が少なくなる高い運動量領域では約 $1 \mu\text{m}$ という優れた分解能を持つことが分かる。なお低い運動量領域で FPCCD、CMOS にあまり差が無いのは、多重クーロン散乱の影響が大きくなり、位置

表 6.1: CMOS の性能設定

レイヤー	位置分解能 [μm]	読み出し時間 [$\mu\text{sec.}$]
0	2.8	50
1	6.0	10
2	4.0	100
3	4.0	100
4	4.0	100
5	4.0	100

表 6.2: FPCCD の性能設定

レイヤー	位置分解能 [μm]
0	1.44
1	1.44
2	2.88
3	2.88
4	2.88
5	2.88

分解能のインパクトパラメータ分解能への寄与が埋もれてしまうためである。

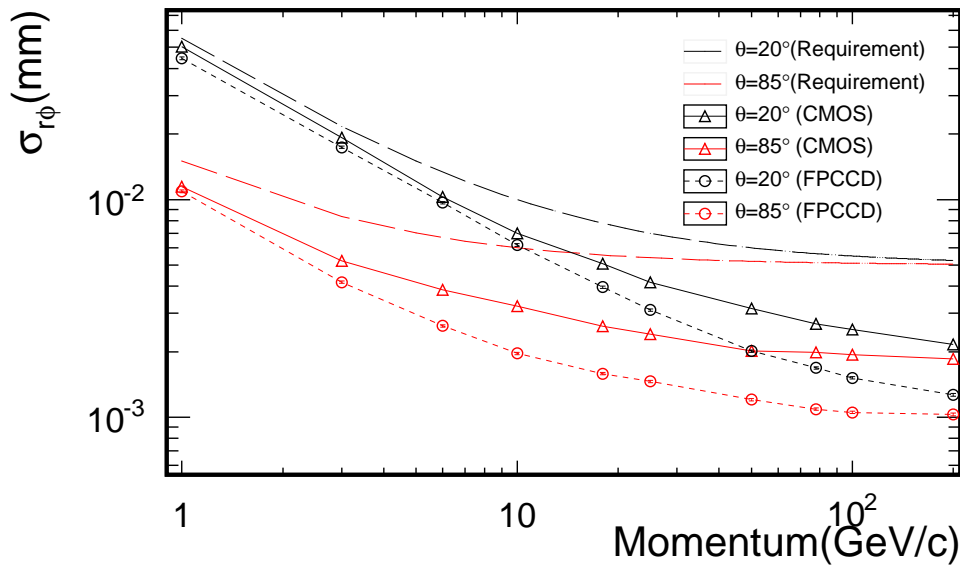


図 6.2: インパクトパラメータ分解能の評価結果

なお、インパクトパラメータ分解能を FPCCDDigitizer、FPCCDClustering を用いて評価したところ、図 6.2 の赤い線より優秀なインパクトパラメータ分解能が得られ、 $\theta = 85^\circ$ 、 $p = 100 \text{ GeV}/c$ では約 $0.6 \mu\text{m}$ となる。これは第 3 章 3.1.2 節で述べた、クラスターによる位置分解能の向上によるものだが、位置分解能があまりにも良すぎる可能性がある。現在までに FPCCD 試作機のビームテストによる位置分解能の検証は行われていないため、FPCCDDigitizer、FPCCDClustering のアルゴリズムは非常に理想的な FPCCD センサーを仮定している可能性がある。例えば、Mokka のシミュレーションにおいては計算量の削減のため、飛程が 0.1 mm を超えないデルタレイは無視されている。FPCCD センサーのデルタレイによる影響は確認されておらず、デルタレイの 0.1 mm の条件が適切かどうかの保証は無い。よって今後はビームテストを行い、その結果をシミュレーションに組み込んでインパクトパラメータ分解能を評価す

る必要がある。

一方で、上記の理由がありながら後続の第7、8章ではペアバックグラウンドを考慮したトラッキングを行う必要があるため FPCCDDigitizer、FPCCDClustering を用いてトラッキング効率、フレーバータグの性能評価を行った。ペアバックグラウンドを考慮したトラッキングのために CMOS 用のディジタイザーを FPCCD 用の読み出し速度の設定で使用することは、ペアバックグラウンドをより多く貯めるので(第8章表8.1参照)大容量のファイルを保存しなければならず、現状ではストレージの容量が足りないため不可能である。FPCCDDigitizer、FPCCDClustering を使用する場合はペアバックグラウンドの真の位置情報、真の運動量、真の energy deposit 等の Mokka から与えられる情報を FPCCDDigitizer の処理後に捨てることによりデータの容量を比較的小さくすることができる。また、FPCCDDigitizer、FPCCDClustering は2つの粒子が同一のピクセルを通過する場合、それは1つのピクセルヒットとみなされ、また energy deposit の量も2つ和になる。別々の粒子由来の2つのクラスターの一部が重なりあう場合も1つのクラスターとみなされ、再構成される通過点は1点だけになる。この点、CMOS 用のディジタイザーは単にヒットの位置をガウシアンでぼかすだけなので、このような重なりは考慮されていない。加えて、FPCCDDigitizer、FPCCDClustering を用いなければ第5章5.2節で述べたペアバックグラウンドの除去アルゴリズムを使用できないこともあり、実際に行われるであろう処理を再現できない。上記の理由からペアバックグラウンドを考慮したトラッキングを行う場合は FPCCDDigitizer、FPCCDClustering を使用する。

第7章 トラッキング効率の評価と新トラッキングアルゴリズムの開発

本章では最初に FPCCD 崩壊点検出器を用いた時のトラッキング効率の評価について述べる。7.1 節で詳しく説明するが、評価結果から現行のトラッキングアルゴリズムでは多くの低い横運動量のトラックが再構成されないことが分かった。また、FPCCD の 1 トレイン毎の読み出しにより貯まる大量のペアバックグラウンドクラスターを考慮したアルゴリズムではないため、ペアバックグラウンドを考慮したトラッキングを行うことは困難であった。そこで、FPCCD のために新たなトラッキングアルゴリズムを開発することでこの問題を解決することにした。これを 7.2 節で詳述する。

7.1 トラッキング効率の評価

7.1.1 正しく再構成されたトラックとトラッキング効率

トラッキング効率とは、**粒子の飛跡が正しく再構成される確率**のことである。ここで**正しく再構成されたトラック**とはどのようなものか。定性的には次のようなトラックが正しく再構成されたトラックと言える。

1. 別の粒子が生成したヒット点を一つも含まない
2. そのトラックに対応する粒子が作る全ヒット点を含んでいる

上記 2 点を満たすトラックは元となる粒子の飛跡を最も正確に再現し、優れたインパクトパラメータ分解能を持つと言って良いだろう。しかし現実問題として、例えば $t\bar{t} \rightarrow 6jets$ 過程のような大量の粒子が発生する状況下では、上記 2 点を満たすように全ての粒子の飛跡を再構成するのは非常に難しい。このため、本研究では”正しく再構成されたトラック”の基準を次のように定義する。

1. VXD のヒットを 5 つ以上持つ
2. track purity が 75% 以上である

ここで track purity は、

$$\text{track purity} \equiv \frac{\text{トラックが含む正しいヒットの数}}{\text{トラックが含むヒットの数}} \quad (7.1)$$

と定義される。正しいヒットとは、そのトラックに対応する粒子が作るヒットのことを指す。

(1) を満たすトラックは総じてインパクトパラメータ分解能が高い。まず VXD のヒットを5つ以上含むため少なくとも最も位置分解能の高いレイヤー0、1のヒットを持つことになる。また位置分解能の高い VXD ヒットを5つ以上含むトラックは以下の理由で誤ったヒットを含みにくい。第4章4.3.2節で述べた SiliconTracking では、基本的にはトラックに一つずつヒット点を加えて完成させるが、一つずつヒット点を加える時には必ずフィットして χ^2/ndf の値が規定値以下であることを要求している。VXD のヒット点は位置分解能が高いため誤ったヒット点を加えてフィットすると χ^2/ndf の値が大きく膨れ上がり、規定値を越えそのヒットは追加候補から除外される。仮に誤ったヒット点を加えてフィットした結果、規定値をギリギリ下回っても本来のトラックの形から歪んでしまい、後続のヒット追加処理で正しいヒットを加えてフィットしても χ^2/ndf の値が規定値を越えることが多くなる。結果として誤った VXD ヒットを含むトラックの多くは VXD ヒットの数4以下である。一方、VXD ヒットを5つ以上含むトラックの中にも誤ったヒットを複数含んでいるものも少なからず存在するため、更に(2)の条件を課すことで、そのようなトラックは正しく再構成されたトラックとみなさないようにしている。

本来であれば、フレーバータグの性能とトラックの精度との関係から定量的に定義した方が良いのだろうが、現在その関係性は定量的に定かでは無く、またはっきりとした相関を見出すことは困難である。よって、本研究では上記の基準を満たすトラックを”正しく再構成されたトラック”とし、以下では「**Good Track**」と呼ぶことにする。

さて、トラッキング効率とは「粒子の飛跡が正しく再構成される確率」のことである。本研究ではこの確率の分母となる粒子に以下の条件を課した。

1. VXD の各レイヤー (全6層) に1つ以上ヒットを残す
2. SIT の各レイヤー (全2層) に1つ以上ヒットを残す

以下では上記を満たす粒子を「**Good Particle**」と呼ぶ。Good Particle の飛跡は正しく再構成されやすく、その Good Track の存在はフレーバータグにおけるジェットの判定に大きく依存する。もしそのような粒子の飛跡を正しく再構成できないようであれば、トラッキングシステムには問題があると言える。よって、本研究におけるトラッキング効率は、フレーバータグに最低限必要とされるトラッキングシステムであることを確認するために以下のように定義される。

$$\text{トラッキング効率} \equiv \frac{\text{Good Particle に由来する Good Track の数}}{\text{Good Particle の数}} \quad (7.2)$$

7.1.2 セットアップと評価方法

第5章5.2節で扱った $t\bar{t} \rightarrow 6\text{jets}$ ($E_{CM} = 350 \text{ GeV}$) のイベントサンプルを使用する。このイベントはジェットが6個発生する非常に密度の高い多粒子事象のため高効率でのトラッキングは難しい。

FPCCD 崩壊点検出器をシミュレートするため FPCCDDigitizer、FPCCDClustering を使用し、第 5 章 5.2.4 節で述べた第一種クラスターカット + 傾きカット + z 幅カットをデフォルト設定で適用する。

比較のため CMOS 崩壊点検出器も評価する。CMOS 用のセットアップは第 6 章 6.1 節で述べた標準のディジタイザーを使用し、位置分解能の設定も表 6.1 の値と同じにする。

トラッキングアルゴリズムは第 6 章で使用した現行のトラッキングアルゴリズムを使用する。トラッキング後、再構成されたトラックの情報を見てトラッキング効率の式 (7.2) を計算する。この時、第 4 章 4.3.1 節で述べたシリコントラック、フルトラックに分けてトラッキング効率を評価する。

なお、最初はペアバックグラウンドを考慮しないで評価し、その状態で十分なパフォーマンスが認められたらペアバックグラウンドを考慮して再度評価することにする。

7.1.3 評価結果

次の図 7.1 はその評価結果を表している。横軸を横運動量 [GeV/c]、縦軸をトラッキング効率としている。黒いプロットが FPCCD、赤いプロットが CMOS を使用した時のトラッキング効率である。左図がシリコントラック、右図がフルトラックである。

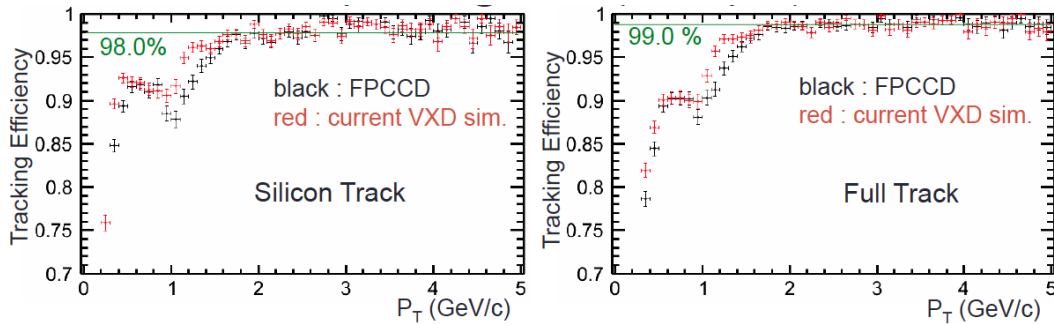


図 7.1: トラッキング効率の評価

まずはシリコントラックから見ていくと、 $P_T > 1.7\text{GeV}/c$ の範囲では、約 98% の確率で Good Particle から Good Track が再構成されることが分かる。一方、 $P_T = 1.7\text{GeV}/c$ を境にトラッキング効率は段々と下がって行き、 $P_T = 0.4\text{GeV}/c$ で一気に悪化することが分かる。つまり $P_T < 1.7\text{GeV}/c$ の領域では十分に Good Particle から Good Track を再構成できていないということが分かる。また、悪化の進行具合は CMOS を使用する場合に比べ FPCCD の方が速いことも分かる。これについては本章 7.2 節で議論する。

次にフルトラックを見ていくと、 $P_T > 1.7\text{GeV}/c$ の範囲ではトラッキング効率が約 99% に上昇することが分かる。これはフルトラックを再構成する処理において、シリコントラックと TPC トラックの結合処理後、”未処理の VXD ヒットを可能であれば

逐次追加する”というアルゴリズムのためシリコントラックに比べ改善されているのである。しかしながら、シリコントラックと同様に $P_T < 1.7\text{GeV}/c$ の領域では十分なトラッキング効率が得られていないことが分かる。これはシリコントラックの低いトラッキング効率に影響されているためである。シリコントラックと TPC トラックの結合処理において結合すべきシリコントラックが無い場合フルトラックの Good Track の再構成確率がシリコントラックとほぼ同じかそれ以下になる、という仕組みである。

上記の結果は CMOS、FPCCD 崩壊点検出器を用いてもトラッキング効率が低い横運動量領域で良くないことを示している。つまり、トラッキング効率を改善するには使用している現行のトラッキングアルゴリズムを修正する必要がある。トラッキング効率の改善のため、私は現行のトラッキングの問題点を調査し、その問題点を解決するような新しいトラッキングアルゴリズムを開発した。これについては次節で詳述する。

7.2 新トラッキングアルゴリズムの開発

前節でのトラッキング効率の評価結果は、現行のトラッキングに問題があることを示唆している。本節では最初に現行のアルゴリズムの問題点について述べ、続いて新しいトラッキングアルゴリズムである「FPCCDTrackFinder」の開発について詳述し、最後に FPCCDTrackFinder を用いたトラッキング効率の性能評価について言及する。FPCCDTrackFinder のソースコードについては

https://svnsrv.desy.de/viewvc/marlinreco/MarlinTrkProcessors/trunk/source/Refitting/FPCCDSiliconTracking_MarlinTrk.cc

https://svnsrv.desy.de/viewvc/marlinreco/MarlinTrkProcessors/trunk/source/Refitting/FPCCDFullLDCTracking_MarlinTrk.cc

に公開しており、現在はドキュメントの作成、コーディングの見直しを行っている。

7.2.1 現行のトラッキングの問題点と解決策

調査を進めるにつれ、第 4 章 4.3.2 節で述べた SiliconTracking が主要な原因であることが分かった。様々な検証を行った結果、以下の問題点が認められた。

- (1). トラックシードの生成処理、外挿処理が低い横運動量の粒子に対応していない
- (2). 低い横運動量トラックに対し、フィッターは高い χ^2 を算出する
- (3). トラック同士の結合処理のアルゴリズムに明確なバグがある

(1) について

まずトラックシードの生成処理の問題点から説明する。第 4 章 4.3.2 節で述べたように、SiliconTracking のトラックシードの生成処理では最初に Φ 方向に領域を 80 分割 (一区画 4.5°)、 θ 方向に 80 分割 (一区画 2.25°) される。そして分割された各区画内でトラックシードを生成するのだが、この区画が横運動量の小さいトラックにとって

は狭すぎる。例えば、図 4.3 の右側にあるトラックに注目すると、このトラックは 3 つの区画を横断しているためレイヤー 5, 4, 3 ではなく、レイヤー 1, 2, 3 にあるヒットからトラックシードを生成している。一見すると、トラックシードが生成されない訳ではないので問題が無いように見えるが、以下で説明するようにこのトラックシードは後続の処理で”育ちにくい”。

外挿処理もトラックシード生成処理時と同様に区画の中にあるヒットだけを扱うので図 4.3 の右側にあるトラックは外挿処理に失敗する (図 4.4)。続く”トラック同士の結合処理”(図 4.5) においても、図中左上のトラックのようにトラックシードが 2 つ生成されていればいいが、図中右側のトラックはそうになっていないため相変わらずトラックシードから成長しない。最後のヒット追加処理となる、”未処理のヒットのトラックへの付け足し”(図 4.6) でようやく全てのヒットを含むトラックに成長するのだが、以下の理由でどのトラックも完全にリカバーされる訳ではない。未処理のヒットは、この付け足し処理の段階で保存されている全てのトラックに対し行われ、それらのトラックパラメータから未処理のヒットへの距離を計算し、最小となるトラックに対し、追加処理のためのフィットによるチェックが行われる。そのフィットが失敗に終わると、その未処理のヒットは以降の処理で扱われることは二度と無くなる。ヒット点の少ないトラックは基本的にトラックパラメータの誤差が大きい。このため未処理のヒットとの距離の計算時に大きめの値が出力され、誤って別のトラックが追加処理される、又はどのトラックにも追加処理されない (どのトラックもヒットとの距離の規定値を超えている) ということが起こる。規定値を上げるという解決策は、多粒子事象、特にペアバックグラウンドを考慮した場合に誤った追加処理の回数が増すため現実的ではない。以上のように、トラックシード生成処理の段階でできるだけ外側のレイヤーのヒットからトラックシードを生成しないと、後続の処理でトラックが成長しにくくなってしまふのである。

では区画を広くして低い横運動量の粒子の飛跡が収まるようにするのはどうか。この方法は確かに横運動量の低い粒子のトラックが区画内に収まる確率が高くなるが、やはり区画と区画の境目付近を通るような粒子は必ず存在し、上手くトラックシードが生成されない。また、広くする場合は非常に多くのゴースト・トラックシードが生成され、処理時間も非常に大きくなってしまふ。特にペアバックグラウンドを考慮した場合、内側のレイヤー程ペアバックグラウンドの占有率が高いためこの傾向は非常に強くなる。

そこで私は、図 7.2 のように、**(A) 区画の分割をやめ、外側のレイヤーにあるヒットを基準に処理する幅を決める**方法を取れば解決するのではないかと考えた。これなら運悪く区画と区画の境目付近を通ったがために外側のレイヤーのヒットでトラックシードができなかったということは 0% になる。この幅は新トラッキングアルゴリズムにおいて横運動量が 0.18 GeV/c (デフォルト値) までのトラックが収まるように決定した。

次に、ゴースト・トラックシードと処理時間のことを考慮して、**(B) トラックシード生成に使われるレイヤーの組合せを大幅に減らす**ことを考えた。現在は第 4 章 4.3.2 節で述べたように、

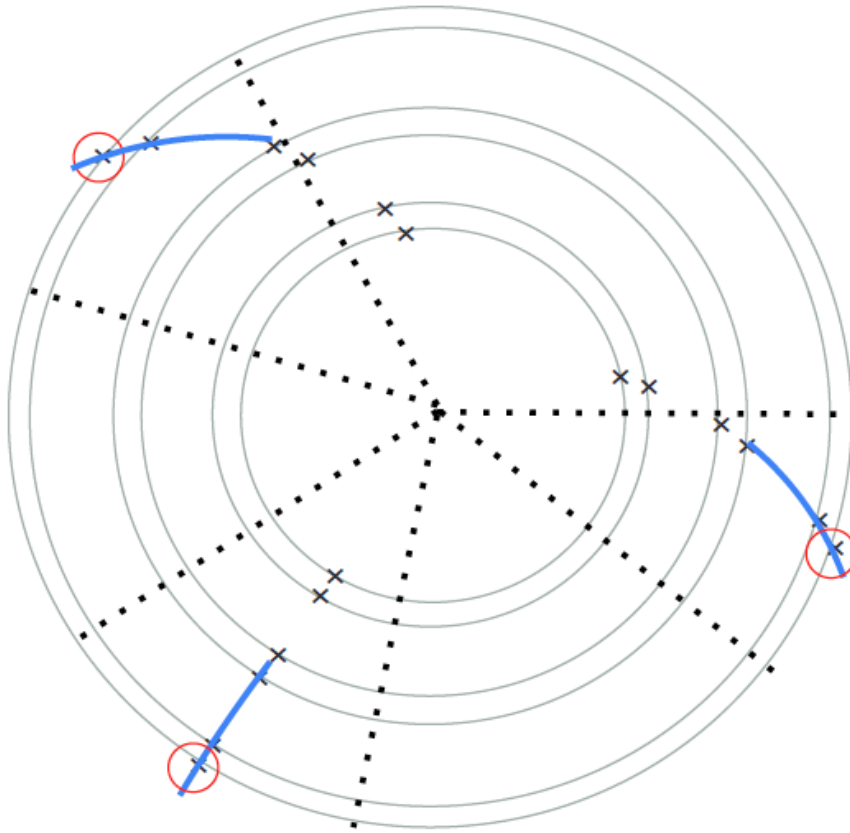


図 7.2: (A) 外側のレイヤーのヒットを基準に処理幅を決定

865 864 863 862 853 852
 843 842 653 652 643 642
 631 630 621 620 531 530
 521 520 431 430 421 420

の計 24 種について行われているのであった。今は (A) の状況を考えているので、内側のレイヤーで構成されるトラックシードによってリカバーを取る、という方法はもはや必要ない。よって、

865 864 854 654 543

の外側寄りのレイヤーで構成される 5 種類の組合せについて処理することにすればよい。この変更は、特に FPCCD 崩壊点検出器を使う場合に相性が良い。何故ならペアバックグラウンドを 1 トレイン分貯める FPCCD 崩壊点検出器は内側の層ほどペアバックグラウンドのクラスター数は多いので、内側のレイヤーを使う必要がなければ処理時間とゴースト・トラックシードを減らせるからである。そういう意味では、理想的

には865の組合せだけで行われるべきだが、VXD、SITの各レイヤーにおけるヒット点の検出効率は100%ではないため幾らか余裕を持たせている。なお、543の組合せだけ全レイヤーがVXDのものとなっているが、これについては(2)に関係してくるので後述する。

次に外挿処理の問題点について述べる。トラックシード生成処理について説明した際に少し触れたが、外挿処理においても区画を使ったヒットの外挿は低い横運動量のトラックについては失敗しやすい。そこで外挿処理において、**(C) 区画の分割をやめ、トラックパラメータから外挿処理の範囲を決める**方法を考えた。成長させるトラックシード、トラックのトラックパラメータを使用すれば、どの辺りに次のヒットが存在するかを予測することができるので、トラックパラメータの誤差を考慮して外挿範囲を決めればよい(図7.3)。区画を使った処理に比べ外挿範囲は小さくなるので誤ったヒットの外挿の確率も低くすることができる。また、トラックシード生成処理の時と違い、外挿処理においては少なくとも4ヒットでフィットされるため、多重クーロン散乱、エネルギー損失を考慮したKalman Filterをフィッターとして使うことができる。これにより計算量はシンプル・ヘリックスフィットに比べ大きくなるが、その代わりトラックパラメータの誤差を使用した外挿範囲の決定がより正確になるためヒットの取りこぼし、誤外挿の確率を低くすることができる。特にFPCCD崩壊点検出器を使用する場合は、FPCCDの位置分解能が高いためトラックパラメータの誤差は小さくなり外挿範囲も小さくなるため親和性が高い。上記の理由で**(D) 外挿処理においてはフィッターをKalman Filterに変更**することは(C)の方法の有効性を高める。

(2) について

SiliconTrackingでは、トラックにヒットを追加する際には必ず一度フィットして、算出される χ^2 の値を見てヒット追加の成否を決める。このため、多重クーロン散乱によって粒子の軌道が大きく変わった、という状況でもない限り、track purityが100%のトラックに正しいヒットが追加された場合の χ^2/ndf は約1になるのが正常なフィッティングである。しかしながら、single μ^+ サンプルを使ってフィット結果を調べてみると、横運動量が低いトラックほど χ^2/ndf の値が大きくなることがわかった。特に $P_T = 1\text{ GeV}/c$ 辺りから急激に増加し始める。この傾向はトラックが含むSITとVXDのヒット数の比率において、SITの割合が大きくなるにつれ特に顕著になる。例えば、トラックシードを生成する際にもフィッティングにより生成の可否を決めるが、今、レイヤー865にあるヒットに対してフィットされたとする。つまりSITヒットが2個、VXDヒットが1個と、トラッキング処理において最もSITの割合が高くなるパターンだが、このトラックシードの横運動量の真の値が $P_T = 1\text{ GeV}/c$ の時は大体 $100 \leq \chi^2/\text{ndf} \leq 100000$ の値を出力する(勿論、フィットされた3つのヒットは単一の粒子に由来するものである)。 χ^2/ndf の値が大きくなる傾向は、CMOSに比べFPCCDの場合の方が早く、図7.1においてCMOSよりFPCCDを使用したほうが効率が低くなる理由はこの点にある。FPCCDの方が位置分解能がいいため、SITの不当に小さいと予想される位置分解能設定にフィットが引きずられて χ^2/ndf の値がCMOSの場合に比べ高くなる、と私は考えているが未だに決定的証拠となるものが見つかっていない。別の可能性として、低い横運動量の粒子は多重クーロン散乱、エネルギー損失の

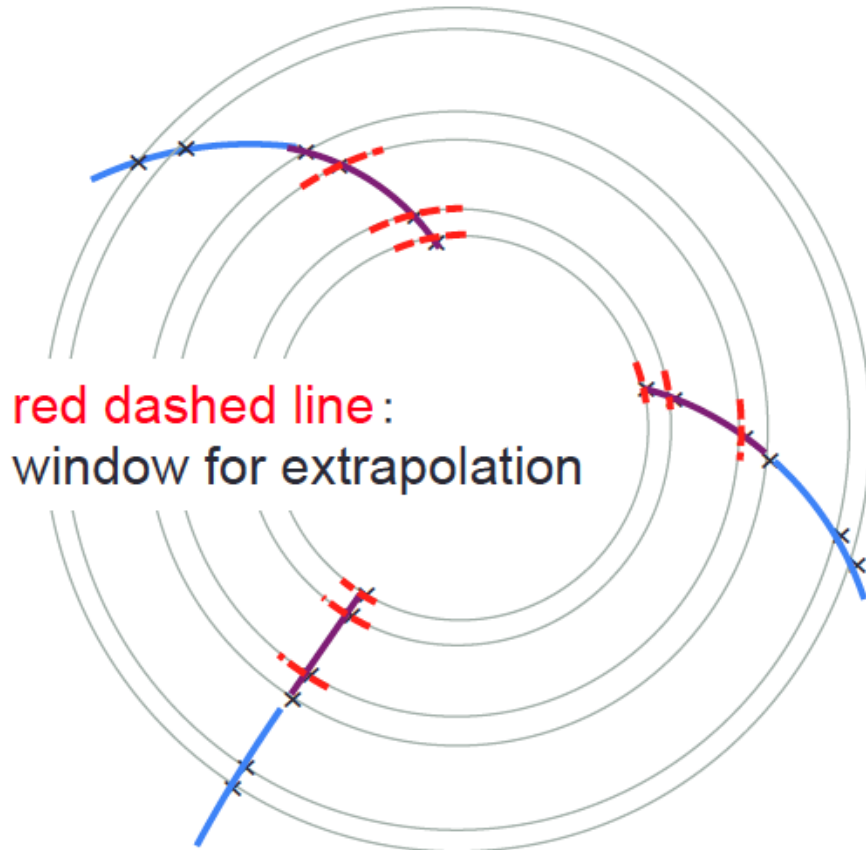


図 7.3: (C) トラックパラメータからの外挿範囲の決定

影響を受けやすいのでシミュレーション時にこれらの効果を無くして再度確かめてみたが、この増加傾向は無くならなかった。フィッター、SIT の位置分解能の設定の妥当性を確かめることは根本的解決のために必要であるが、本研究では応急処置として (1)-(B) のトラックシード生成処理に用いるレイヤーの組合せに 543 を入れている。この組合せは VXD レイヤーだけで構成されるため、3つのヒットが単一の粒子に由来していれば χ^2/ndf は比較的妥当な値になる (それでもより低い横運動量になるにつれ χ^2/ndf の値が大きくなる)。

(3) について

トラック同士の結合処理は第 4 章 4.3.2 節で述べたように、各トラックのトラックパラメータ ϕ_0 , $\tan \lambda$ を参照し、十分値に近いトラック同士をひとつのトラックと一旦みなしてシンプル・ヘリックスフィットを行うのであった。 $\bar{t}\bar{t}$ イベントを使用して結合処理を調べてみると、同じ粒子の由来でないトラック同士が結合される確率が、低い横運動量のトラックの場合に大きいことが分かった。確かに ϕ_0 , $\tan \lambda$ は近い値だ

が、残りの d_0 , z_0 , ω を見るとかけ離れているものばかりが目立った。しかし本来なら、そのような組合せは後続のシンプル・ヘリックスフィットによる χ^2/ndf のテストにより受理されないはずである。そう考え、誤ったトラック同士の組合せに対するシンプル・ヘリックスフィットの χ^2/ndf を見ると殆どが丁度0になることが分かった。これはフィットされる点の集まりがトラックの形状とあまりに似つかわない場合に起こる。0 は必ず規定値以下になるためフィットのテストに合格してしまう、ということだった。よって **(E) シンプル・ヘリックスフィットが丁度0を返す時はフィットの失敗とみなす** ことによりバグを回避する。新トラッキングアルゴリズムでは、このバグ回避の方法はシンプル・ヘリックスフィットが使われるトラックシード生成処理、未処理のヒットの付け足し処理においても適用してある。

7.2.2 FPCCD のクラスターの形状を用いた外挿処理

上記で挙げた問題点とその解決方法は、FPCCD にとって非常に相性が良いが、CMOS を使用した場合でもトラッキングの改善が期待できる。これに対し、本節では現行のトラッキングアルゴリズムに搭載されていない、FPCCD 特有のクラスター情報を利用したトラッキング処理の実装について説明する。本研究では外挿処理でクラスター形状を利用することを考える。

図 7.4 は FPCCD を使用した時の外挿処理のイメージである。上側のレイヤー上のクラスターから下側のクラスターに外挿するところだが、下側のレイヤーには多数のクラスターが存在している。しかし、図中のバツのついているクラスターは上側のクラスターの向きから考えるに外挿候補から外しても良さそうである。クラスターから予測される粒子の通過する方向が上側、下側で一致しないからである。このような処理を定量的、自動的に行うため、**(F) 上側、下側のクラスターから予測される、粒子通過時の方向ベクトルの内積を取る** ことを考える。新トラッキングアルゴリズムでは、外挿するヒット候補をフィッターを用いてテストする前の段階で、内積の値が規定値より小さい時はそのヒットを候補から外す、ということを行う。しかし、この処理はペアバックグラウンドが余程多く、ゴースト・トラックが大量に発生する状況でない限り費用対効果が良くない。後述の $\sqrt{s}=350$ GeV イベントにペアバックグラウンドを考慮した時のトラッキング効率を評価すると、このアルゴリズムを使用した時の方が使用しない時に比べ効率が全体的に 0.5 ~ 1% 程低下することが分かった(この時、内積の規定値は 0.4)。これは間違ったヒットの外挿回数は減るものの、正しいヒットの外挿回数も減ってしまうという状況を表している。そのような状況は、その2つのクラスターが同一のダブレットレイヤー上に存在しない場合と、ピクセルサイズが $10\ \mu\text{m}$ であるレイヤー 2, 3, 4, 5 上のクラスターを使う場合に多い。つまり、クラスターの距離が離れていると、曲率の大きいトラックのクラスターの場合2つのクラスターの方向ベクトルの交差角が大きくなり、またピクセルサイズが $10\ \mu\text{m}$ のレイヤー上のクラスターの場合、そのクラスターから予測される方向ベクトルが荒くなるため内積の値が小さくなる。

またゴースト・トラックが比較的少なければ、FPCCD の位置分解能が優秀なため

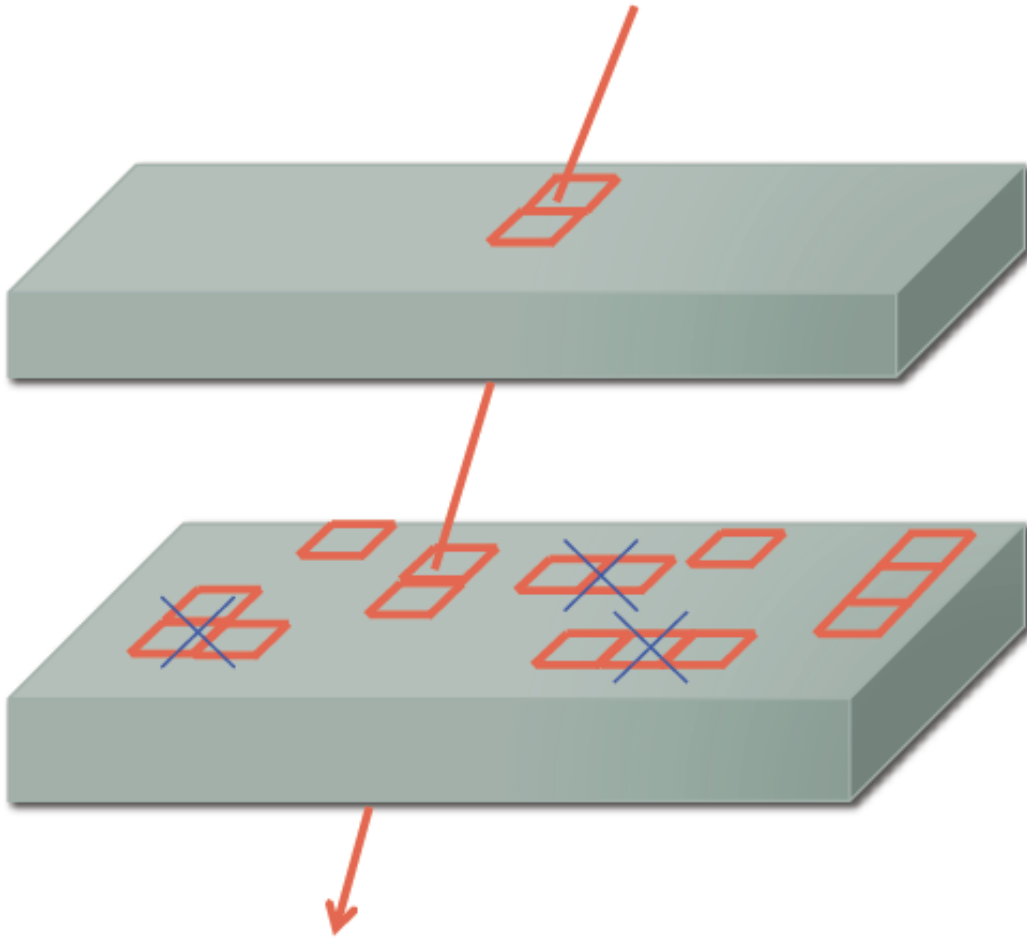


図 7.4: 外挿処理とクラスター形状

χ^2/ndf の値が充分 1 に近ければほぼクラスターの内積も 1 に近く、 χ^2/ndf の値が 1 から大きく離れている場合はクラスターの内積も 0 に近くなる。従って χ^2/ndf の値を信用すればクラスターの内積を見なくてもほぼ外挿ミスは無くなる。

上記の理由により、本研究では”クラスターの内積を用いた外挿処理”を新しいトラッキングアルゴリズムに実装したが、本論文では比較的ペアバックグラウンドの少ない 350 GeV 以下のイベントのみに対して新しいトラッキングアルゴリズムを適用しているため常に OFF にしてある。今後の研究で、500GeV、1TeV のイベントのトラッキング評価によりアルゴリズムの有用性、妥当性を検討する必要がある。

7.2.3 FPCCDTrackFinder の開発

以上で述べた現行のトラッキングの問題点を回避する方法、FPCCD のクラスター形状を用いた外挿処理の方法は新しいトラッキングソフトウェア、FPCCDTrackFinder

に実装された。名前の由来は FPCCD の使用を考慮して開発したことによるが、他の崩壊点検出器に使用しても現行のトラッキングアルゴリズム以上のパフォーマンスを発揮することが期待できる。何故なら、FPCCDTrackFinder は現行のトラッキングアルゴリズムをベースにし、幾つかの問題点を改善するように開発されたからである。これまで述べてきた (A) ~ (F) の FPCCDTrackFinder の主な特徴をまとめると以下のようになる。

- (A) トラックシード生成時、外側のレイヤーにあるヒットをもとにシードヒット対の探索領域を決める
- (B) トラックシード生成に使われる 5 種類のレイヤーの組合せは外側寄りのレイヤーのみで構成される
- (C) 外挿処理の範囲はトラックパラメータから決定される
- (D) 外挿処理においてはフィッターは Kalman Filter を使用する
- (F) 外挿処理においては外挿候補のクラスターの形状がトラックと矛盾するかを確認する (ただし、この機能は 350 GeV イベントの解析では使用しなかった。)

次節ではこの FPCCDTrackFinder のトラッキング効率を評価する。

7.3 トラッキング効率の評価 (FPCCDTrackFinder の場合)

7.3.1 ペアバックグラウンドを考慮しない評価

セットアップはトラッキングアルゴリズムが FPCCDTrackFinder に変更されたことを除いて 7.1.2 節と全く同じである。FPCCD 崩壊点検出器を FPCCDTrackFinder のトラッキング効率を評価し、現行のトラッキングアルゴリズムと比較したものが図 7.5 である。左図がシリコントラックの効率、右図がフルトラックの効率を示している。図

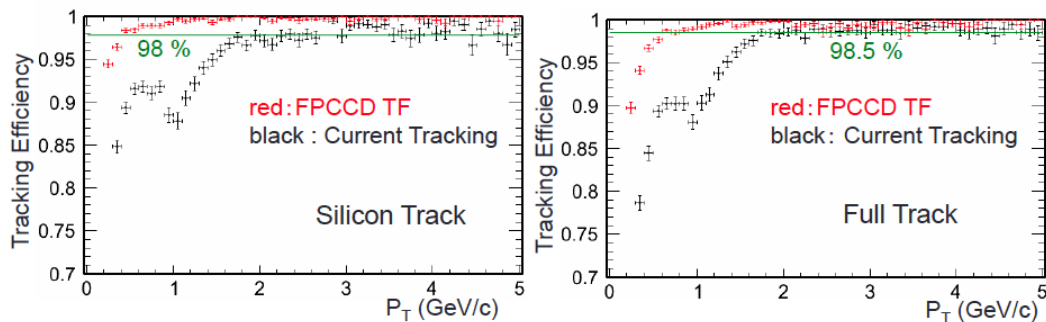


図 7.5: 「FPCCD + FPCCDTrackFinder」対「FPCCD + 現行のトラッキング」(横運動量、ペア BG 無し)

から分かるように、FPCCDTrackFinder を適用した場合はトラッキング効率が全横運動量領域で改善されることが分かる。高い横運動量領域でシリコントラック、フルトラックの効率は98% から99.5%、98.5% から99% に改善されている。特に、シリコントラックの場合は $P_T = 0.4 \text{ GeV}/c$ の低い横運動量領域に至るまでの効率が98% まで改善されており、フルトラックの場合は $P_T = 0.6 \text{ GeV}/c$ に至るまでに効率が98.5% まで改善されることが分かる。

また、図7.6は横軸を $\cos \theta$ にして比較したものである。ただし運動量の大きさ $|P|$ は $1 \text{ GeV}/c$ より大きいとする。 θ は粒子発生時における進行方向と磁場方向との間の角度を表す。図から分かるように、シリコントラック、フルトラックの効率は $|\cos \theta| < 0.9$ の領

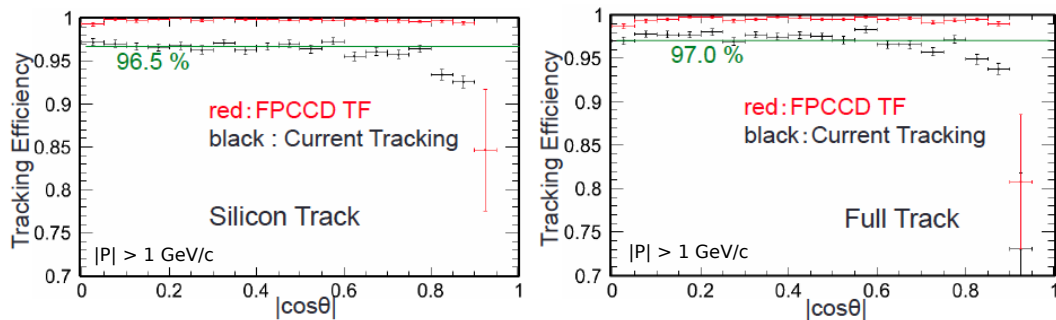


図 7.6: 「FPCCD + FPCCDTrackFinder」 対 「FPCCD + 現行のトラッキング」 ($\cos \theta$ 、ペアBG 無し)

域においてそれぞれ96.5% から99.8%、97% から99.5% まで改善される。 $|\cos \theta| > 0.9$ の領域で低くなるのはSITのアクセプタンスが $|\cos \theta| < 0.9$ だからで、本評価においては $|\cos \theta| > 0.9$ の領域のトラッキング効率は重要ではない。

7.3.2 ペアバックグラウンドを考慮した評価

次に 350 GeV のペアバックグラウンドが与えるトラッキング効率への影響を評価した。図7.7はペアBGを考慮した時とそうでない時のトラッキング効率の比較である。図に示されるように、ペアバックグラウンドを考慮した時としない時とでは $P_T = 0.6 \text{ GeV}/c$ の領域までは殆ど変わらないことが分かった。続いて図7.8は横軸を $\cos \theta$ にしたものである。ただし運動量の大きさ $|P|$ は $1 \text{ GeV}/c$ より大きいとする。図に示すように、 $|\cos \theta| < 0.9$ の領域においてもトラッキング効率はペアバックグラウンドにより殆ど低下しないことが分かる。

7.3.3 FPCCDTrackFinder と CPU 時間

これまで、ペアバックグラウンドを考慮したトラッキングはFPCCD崩壊点検出器を使って行う事はできなかった。それは現行のトラッキングではあまりに長大なCPU時間を必要としたためである。主な原因はトラックシード生成処理のために使われる

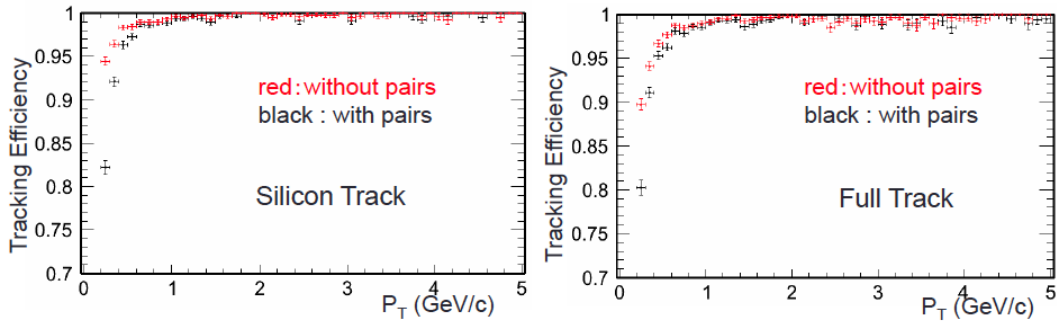


図 7.7: FPCCD + FPCCDTrackFinder とペアバックグラウンドの影響 (横運動量)

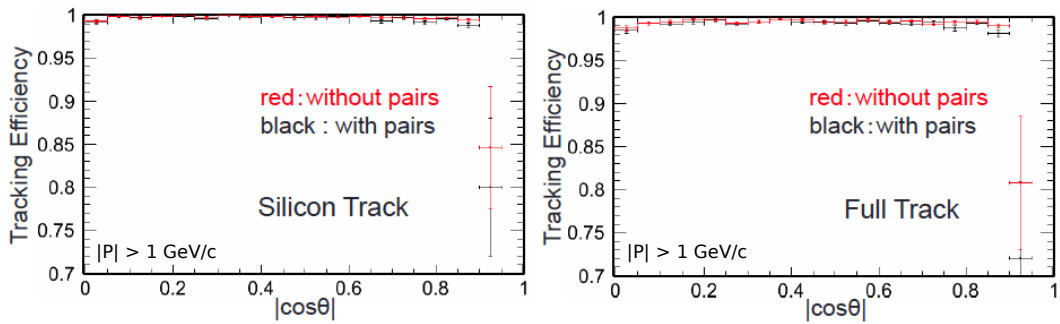


図 7.8: FPCCD + FPCCDTrackFinder とペアバックグラウンドの影響 ($\cos \theta$)

レイヤーの組合せが 24 種類もあり、その内半分はペアバックグラウンドヒットの貯まりやすい内側のレイヤーを使用していたためである。ただし CMOS 崩壊点検出器を使用する場合は FPCCD 崩壊点検出器とほぼ同じヒット占有率を高速読み出しと大きいピクセルサイズで実現しているが、ヒット点の総数は少ないのでペアバックグラウンドを考慮したトラッキングが可能であった。

この点、FPCCDTrackFinder はペアバックグラウンドを考慮した時、トラッキングにまだまだ多くの CPU 時間を要求するが、現行のトラッキングに比べ大分少なくなったためにペアバックグラウンドを考慮したトラッキング効率の評価が本研究で初めて可能となった。 $t\bar{t} \rightarrow 6jets @ 350 \text{ GeV}$ イベントを、ペアバックグラウンドを考慮して FPCCD 崩壊点検出器、FPCCDTrackFinder を使用してトラッキングする場合、CPU 時間は 1 イベント辺り約 3 時間、最大メモリ使用量は約 3.5 GB かかる。CPU 時間の大きな内訳はトラックシード生成処理：外挿処理 = 5 : 1 なので、今後の FPCCDTrackFinder の開発ではトラックシード生成処理における CPU 時間を削減することが一つの目標となる。他の検出器、現行のトラッキングの CPU 時間、最大メモリ量の比較は次章で述べる。

第8章 フレーバータグ性能評価

本章では FPCCD 崩壊点検出器を用いた時のフレーバータグの性能評価を行った。まず基本的なフレーバータグの性能を見るため $Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 91.2 GeV (Z-pole) イベントを使った評価について述べる。続いて本研究で初となるペアバックグラウンドを考慮した、 $Z^* \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 250 GeV イベントを用いたフレーバータグの性能評価について述べる。

8.1 Z-pole イベントを用いたフレーバータグ性能評価

最初に $Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 91.2 GeV (Z-pole) イベントを用いて FPCCDTrackFinder、FPCCD 崩壊点検出器を用いた時のフレーバータグの性能評価を行う。ここではペアバックグラウンドは考慮しない。

8.1.1 セットアップと評価方法

$Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 91.2 GeV のイベントサンプルを使用する (各崩壊モード毎に 25000 イベント用意する)。このイベントはジェットが背中合わせに 2 個発生するため比較的トラッキング、ジェットのクラスタリングが簡単である。トラッキングの基本性能を調べるために single μ^+ イベントを使ったように、フレーバータグの基本性能を調べるために Z-pole イベントが使われる。FPCCD 崩壊点検出器をシミュレートするため FPCCDDigitizer、FPCCDClustering を使用し、第 5 章 5.2.4 節で述べた第一種クラスターカット + 傾きカット + ζ 幅カットをデフォルト設定で適用する。比較のため CMOS 崩壊点検出器も評価する。セットアップは第 6 章 6.1 節で述べた標準のディジタイザーを使用し、位置分解能の設定も表 6.1 の値と同じにする。トラッキングアルゴリズムは比較のため第 6 章で使用した現行のトラッキングアルゴリズムと、第 7 章 7.2 節で説明した FPCCDTrackFinder の両方を使う。トラッキング後に、第 1 章 1.5 節で述べた Particle Flow Algorithm の処理を ILD グループで使用される標準の設定で行う。PFA の後のフレーバータグの処理は第 2 章 2.1 節で述べた LCFIPlus [7] により行う。LCFIPlus によるフレーバータグの処理では Boosted Decision Trees [8] によるトレーニングを行うため、 $Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 91.2 GeV のサンプルを各崩壊モード毎に 25000 イベントずつトレーニングに用いる。

LCFIPlus のフレーバータグの処理によって再構成されたジェットに添付される情報は、各ジェットの b-jet らしさ、c-jet らしさ、q-jet らしさ (q は軽いクォークの u, d, s

クォーク)を表す数値である。我々はこの値を使って、例えば b-jet らしさがある一定の値より大きい場合にそのジェットを b-jet とみなす。この b-jet とみなす閾値が高いほど、b-タグされたジェットが実は b-jet では無く別のクォーク由来のジェットだった、ということは少なくなる (b-tag purity の増加)。その代わり、実は b-jet だったけれども閾値を越えられず b-tag されない、ということが増える (b-tag efficiency の低下)。ここで、b-tag efficiency、b-tag purity は以下のように定義される。

$$\text{b-tag efficiency} \equiv \frac{\text{b-tag された b-jet の数}}{\text{全ての b-jet の数}} \quad (8.1)$$

$$\text{b-tag purity} \equiv \frac{\text{b-tag された b-jet の数}}{\text{全ての b-tag されたジェットの数}} \quad (8.2)$$

b-tag に関して例を挙げたが、無論 c-tag、q-tag についても同様の定義である。また、purity の定義は $Z \rightarrow b\bar{b}$, $c\bar{c}$, $q\bar{q}$ の各崩壊分岐比を考慮したものになっている。本研究では各崩壊分岐比の値を、Particle Data Group の Z ボソンの項 [20] を参考にして

$$BR(Z \rightarrow b\bar{b}) = 0.1512 \quad (8.3)$$

$$BR(Z \rightarrow c\bar{c}) = 0.1203 \quad (8.4)$$

$$BR(Z \rightarrow q\bar{q}) = 0.428 \quad (8.5)$$

とする。閾値を少しずつずらすことで、様々な efficiency における purity の関係性を評価する。なお、この評価ではペアバックグラウンドは考慮しない。

8.1.2 評価結果

図 8.1 はフレーバータグの評価結果である。図中の赤い線は b-tag、青い線は c-tag の性能を示す。実線は「CMOS 崩壊点検出器 + 現行のトラッキング」を使用した場合、点線は「CMOS 崩壊点検出器 + FPCCDTrackFiner」を使用した場合、破線は「FPCCD 崩壊点検出器 + FPCCDTrackFiner」を使用した場合のパフォーマンスを示している。まず現行のトラッキングと FPCCDTrackFinder の性能を比較するために実線と点線を見比べると、FPCCDTrackFinder は c-tag の性能を向上させている事がわかる (例えば purity 70% の c-tag に関しては efficiency が 2.5% 改善する)。b-tag の性能については特に変化は見られない。続いて CMOS 崩壊点検出器と FPCCD 崩壊点検出器の比較をするために点線と破線を見比べると、FPCCD 崩壊点検出器を使用することにより b-tag、c-tag のパフォーマンスが改善されることが分かる (例えば purity 90% の b-tag については efficiency が 2%、purity 70% の c-tag については efficiency が 4% 改善する)。

以上の結果により、ペアバックグラウンドを考慮しなければ FPCCDTrackFinder、FPCCD 崩壊点検出器はフレーバータグのパフォーマンスを向上させることが分かった。

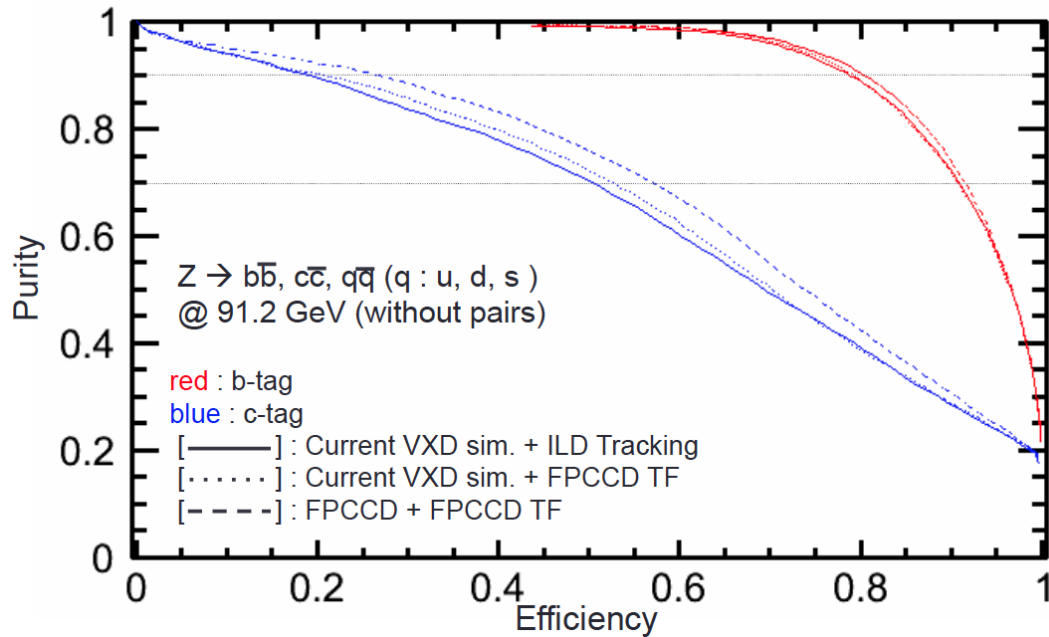


図 8.1: フレーバータグの評価結果 (Z-pole イベント)

8.2 $Z^* \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 250 GeV イベントを用いたフレーバータグ性能評価

次に $Z^* \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 250 GeV イベントを用いて FPCCDTrackFinder、FPCCD 崩壊点検出器を用いた時のフレーバータグの性能評価を行う。本節ではペアバックグラウンドを考慮し、これによるパフォーマンスの影響を見る。ILD におけるペアバックグラウンドを考慮したフレーバータグの性能評価は本研究が初となる。

8.2.1 セットアップと評価方法

基本的にセットアップは 8.1.1 節の Z-pole を用いた性能評価と同じなので、以下ではそれと異なる点、新たに追加された点について述べる。

$Z^* \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 250 GeV のイベントサンプルを各崩壊モード毎に 2000 イベント用意する。Z-pole を用いた評価に比べ 2000 イベントしか用意しないのは、現状ではペアバックグラウンドを考慮したトラッキングが考慮しない場合に比べ多くの時間がかかるからである (後述するように、FPCCDTrackFinder は現行のトラッキングに比べトラッキング処理に必要とする CPU 時間は少なく済むが、それでも多数のイベント処理には不十分であるので、今後の開発では処理時間の改善を考慮する必要がある)。このイベントも Z-pole と同様にジェットが背中合わせに 2 個発生するため比較的トラッキング、ジェットのクラスタリングが簡単だが、ILC の 250 GeV のビームランにおけるペアバックグラウンドの影響を見ることができるところで Z-pole での評価と異なる。

表 8.1: レイヤー毎の読み出しに寄与するバンチ衝突の数

レイヤー	FPCCD	CMOS
0	1312	90
1	1312	18
2	1312	180
3	1312	180
4	1312	180
5	1312	180

フレーバータグの処理のために必要なトレーニングサンプルは各崩壊モード毎に 48000 イベント使用する。なおトレーニングサンプルではペアバックグラウンドを考慮しない。本来はトレーニングサンプルにペアバックグラウンドを考慮した場合についても評価すべきだったが、上記で述べたようにトラッキング処理に多くの時間が必要なことや、ペアバックグラウンドのサンプルのデータサイズが非常に大きいこともあり断念した。

FPCCD 崩壊点検出器との比較のために CMOS 崩壊点検出器を使用するが、ここでは CMOS 崩壊点検出器にペアバックグラウンドの効果を加味する。FPCCD 崩壊点検出器が 1 トレイン毎に読み出しを行うのに対し、CMOS 崩壊点検出器の読み出しは数バンチ衝突毎に読み出す。レイヤー毎に読み出し時間が異なり、現在は表 6.1 のように設定されている。本評価でもこの値を使用し、ペアバックグラウンドの効果を加味する。シミュレーションにおいて、表 6.1 の読み出し時間を CMOS が持つと考えた時、各レイヤー毎の読み出しに寄与するバンチ衝突の数は表 8.1 のようになる。

評価方法は Z-pole イベントと同様に、b-tag、c-tag についての efficiency、purity を算出することによりフレーバータグを評価する。

8.2.2 評価結果

図 8.2、8.3 はペアバックグラウンドを考慮しない場合、考慮した場合のフレーバータグの評価結果である。図中の赤い線は b-tag、青い線は c-tag の性能を示す。実線は CMOS 崩壊点検出器 + 現行のトラッキングを使用した場合、点線は CMOS 崩壊点検出器 + FPCCDTrackFiner を使用した場合、破線は FPCCD 崩壊点検出器 + FPCCDTrackFiner を使用した場合のパフォーマンスを示している。

ペアバックグラウンドを考慮しない場合、図 8.2 の実線と点線を見比べることにより $Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 250 GeV のイベントにおいても FPCCDTrackFinder は c-tag のパフォーマンスを向上させることが分かる。また、点線と破線の比較から CMOS 崩壊点検出器より FPCCD 崩壊点検出器を用いた方が b-tag、c-tag のパフォーマンスを向上させる事がわかる (例えば purity 70% の c-tag に関しては efficiency が 2.5% 改善する)。b-tag の性能については特に変化は見られない。続いて CMOS 崩壊点検出器と FPCCD 崩壊点検出器の比較をするために点線と破線を見比べると、FPCCD 崩壊点検出器を

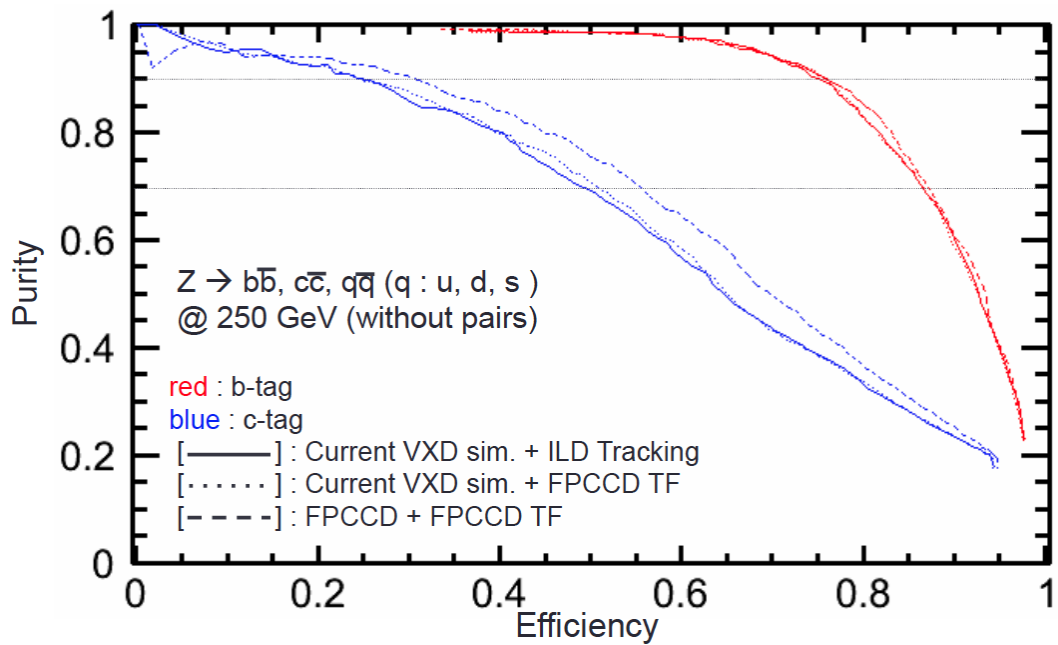


図 8.2: フレーバータグの評価結果 ($Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 250 GeV、ペア BG 無し)

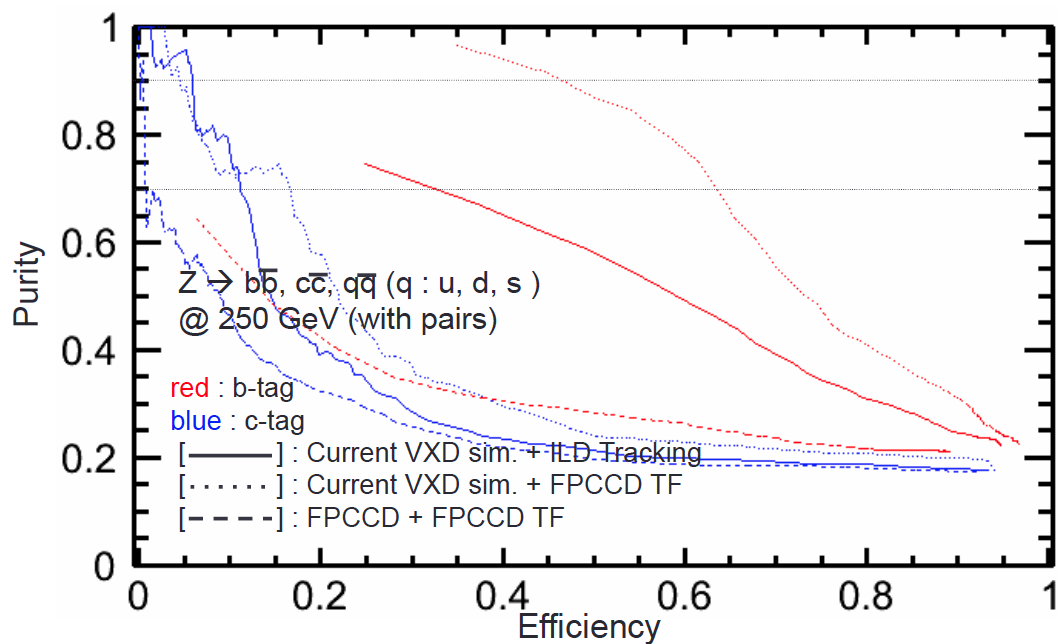


図 8.3: フレーバータグの評価結果 ($Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 250 GeV、ペア BG 有り)

使用することにより b-tag、特に c-tag のパフォーマンスが改善されることが分かる。
次にペアバックグラウンドを考慮した場合、図 8.3 から分かるように、どれもパフォーマンスがペアバックグラウンドを考慮しない場合に比べ落ちることが分かった。

特に FPCCD 崩壊点検出器を使用した場合のパフォーマンスの低下は著しい。これは以下で述べるように、ペアバックグラウンド・トラックは FPCCD の方が多いため (表 8.1)、ジェットの再構成におけるペアバックグラウンド・トラックの影響が大きいためである。また、CMOS 崩壊点検出器を使用する場合、現行のトラッキングに比べ FPCCDTrackFinder を用いた方がパフォーマンス低下を抑えられることが分かる (勿論、それでもパフォーマンスが充分とは言えない)。

図 8.4 の左図は FPCCD 崩壊点検出器 + FPCCDTrackFinder を使用した時に再構成された b-jet が含むトラックの横運動量分布を示しており、赤が全トラック、青が track purity > 0.75 のトラック、黒が track purity < 0.75 のトラック (以下ゴースト・トラック) を表す。図 8.5 の左図も同様だが、こちらはペアバックグラウンドを考慮した時の結果であり、紫がペアバックグラウンドのトラックを表す。これらを見比べると、ペア

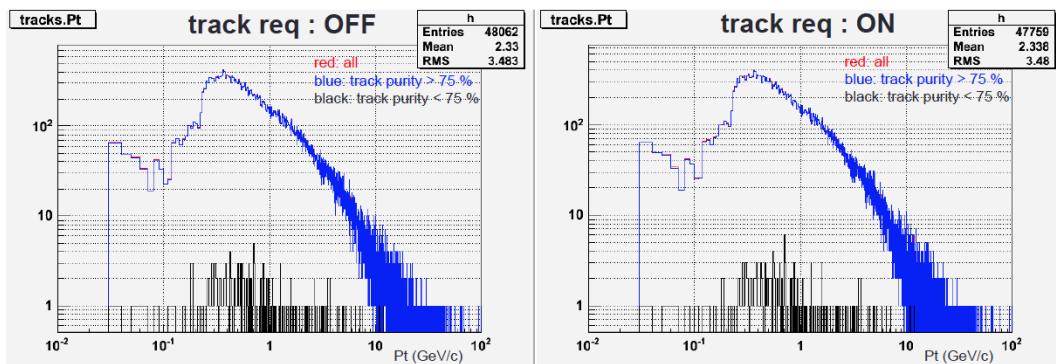


図 8.4: 再構成された b-jet が含むトラック (FPCCD、ペア BG 無し)

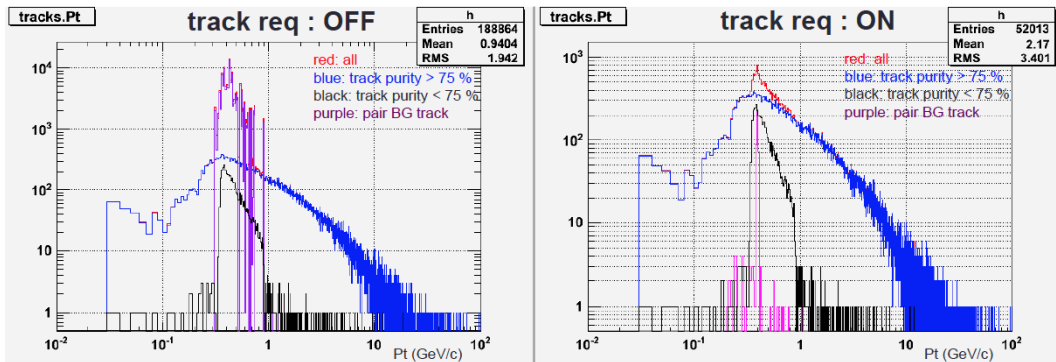


図 8.5: 再構成された b-jet が含むトラック (FPCCD、ペア BG 有り)

バックグラウンドを考慮した場合、ペアバックグラウンド・トラックが大量に b-jet の再構成に使われる事がわかり、またゴースト・トラックの数も増加することが分かる。ペアバックグラウンドを考慮しないトレーニングサンプルの状況に近づけるためには、まずは大量のゴースト・トラックを削る必要がある。そこで、FPCCDTrackFinder で

生成されるトラックに次の条件

$$\text{track requirement : SIT ヒット数が 1 つ以上} \parallel \text{TPC ヒット数が 10 つ以上} \parallel |\cos \theta| > 0.9 \quad (8.6)$$

を課すことを考える。SIT ヒットを要求するのは、SIT の優秀な時間分解能からペアバックグラウンド・トラックを除外できるからである。SIT は 1 バンチ衝突毎に読み出しを行うため、シグナルイベントが発生したバンチ衝突を同定することができ、その他のバンチ衝突由来のペアバックグラウンドのトラックの寄与は無視できる。また、TPC で発生するシグナル粒子のトラックは TPC ヒットしか持たないので、TPC ヒットが 10 つ以上あれば SIT ヒットが無くても落とさないことにしている。また、SIT のアクセプタンスが $|\cos \theta| < 0.9$ なので、SIT をそもそも通過しないシグナル粒子のトラックを捨てないように $|\cos \theta| > 0.9$ の条件を加える。さて、式 (8.6) の条件を実際に課して b-jet を再構成したものが図 8.4、図 8.5 の右図である。図 8.4 の左図、右図を比較すると、ペアバックグラウンドを考慮しない場合は式 (8.6) の条件から落ちるトラックの数は 1% 以下である。続いて図 8.5 の左図、右図を比較すると、ペアバックグラウンド・トラックがかなり少なくなることが分かる。

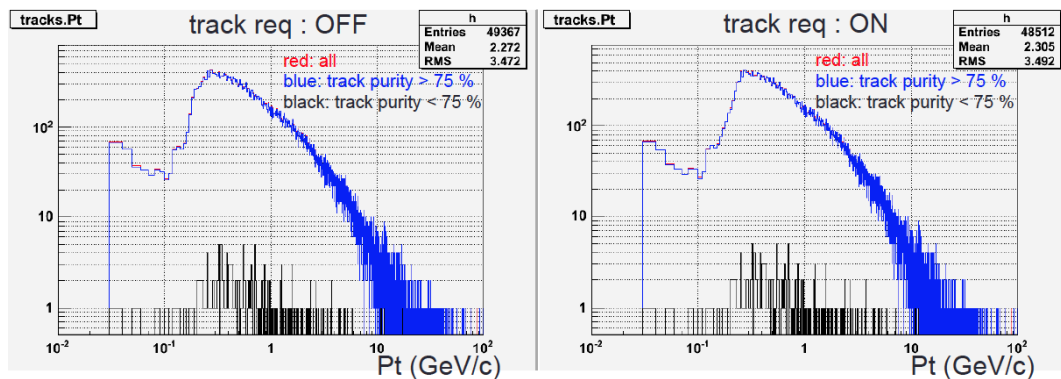


図 8.6: 再構成された b-jet が含むトラック (CMOS、ペア BG 無し)

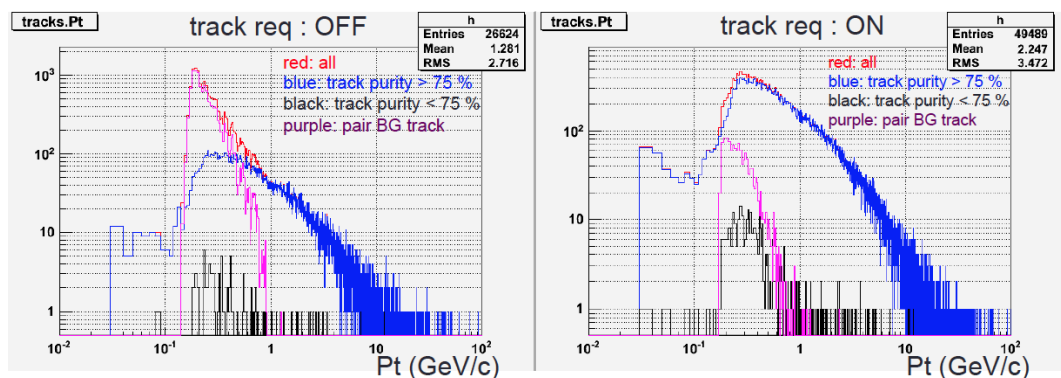


図 8.7: 再構成された b-jet が含むトラック (CMOS、ペア BG 有り)

また、CMOS 崩壊点検出器 + FPCCDTrackFinder を使用した時に再構成された b-jet

が含むトラックの横運動量分布を図 8.6(ペアバックグラウンドを考慮しない)、図 8.7(ペアバックグラウンドを考慮する)に示した。各図の右側の分布は同様の track requirement が付いている。図 8.6、図 8.7 の左側の分布を見ると、ペアバックグラウンドを考慮した場合にペアバックグラウンド・トラックが多数 b-jet に含まれるが、ゴースト・トラックの数は FPCCD 崩壊点検出器のケースに比べて少ないことが分かる。これは CMOS の読み出しに寄与するバンチ衝突の数が FPCCD に比べ少ないことに起因する。図 8.7 の左右の分布を見比べると、track requirement によりペアバックグラウンド・トラックが減少することが分かる。

track requirement(式 (8.6)) をつけて、ペアバックグラウンドを考慮しないで再度フレーバータグを評価した結果が図 8.8 である。ペアバックグラウンドを考慮しない場合、

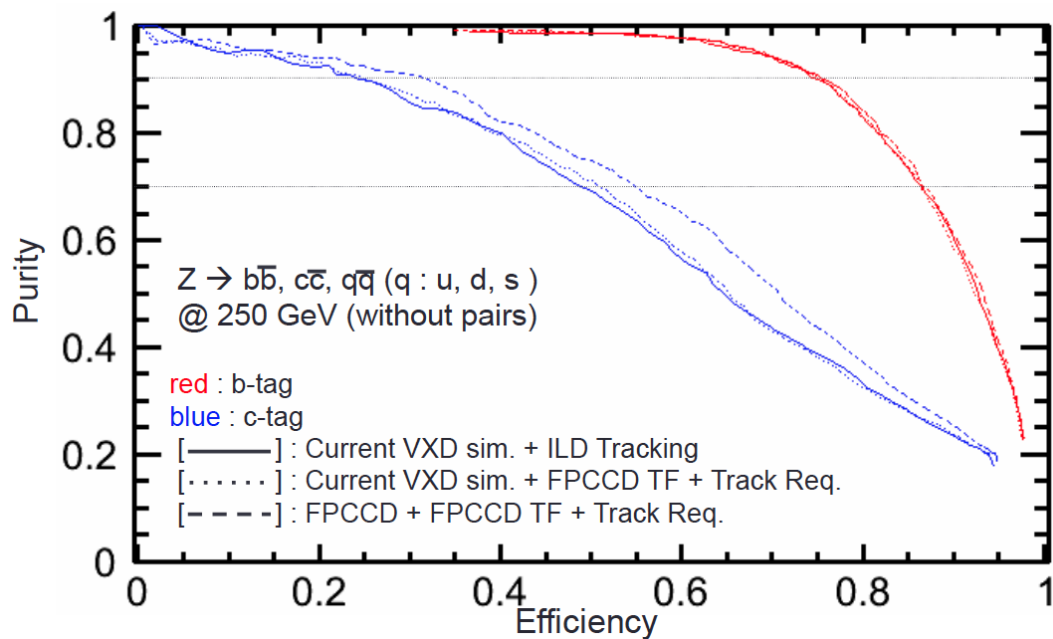


図 8.8: フレーバータグの評価結果 ($Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 250 GeV、ペア BG 無し)(式 (8.6) の条件込み)

図 8.8 から分かるように、式 (8.6) の条件によるパフォーマンスの変化は CMOS 崩壊点検出器 + FPCCDTrackFinder を使用する場合 purity 80 % の b-tag において efficiency が 83.0 \rightarrow 82.9%、purity 60 % の c-tag においては efficiency が 58.1 \rightarrow 57.4 % となる。FPCCD 崩壊点検出器 + FPCCDTrackFinder を使用する場合 purity 80 % の b-tag において efficiency が 85.5 \rightarrow 84.1%、purity 60 % の c-tag においては efficiency が 63.9 \rightarrow 65.5 % となる。

track requirement をつけ、ペアバックグラウンドを考慮して評価した結果が図 8.9 である。問題のペアバックグラウンドを考慮した場合だが、図 8.9 から分かるようにパフォーマンスは大きく改善しているが、ペアバックグラウンドを考慮しない場合のパフォーマンスには及ばない。また、FPCCD より CMOS を使用した場合の方がパー

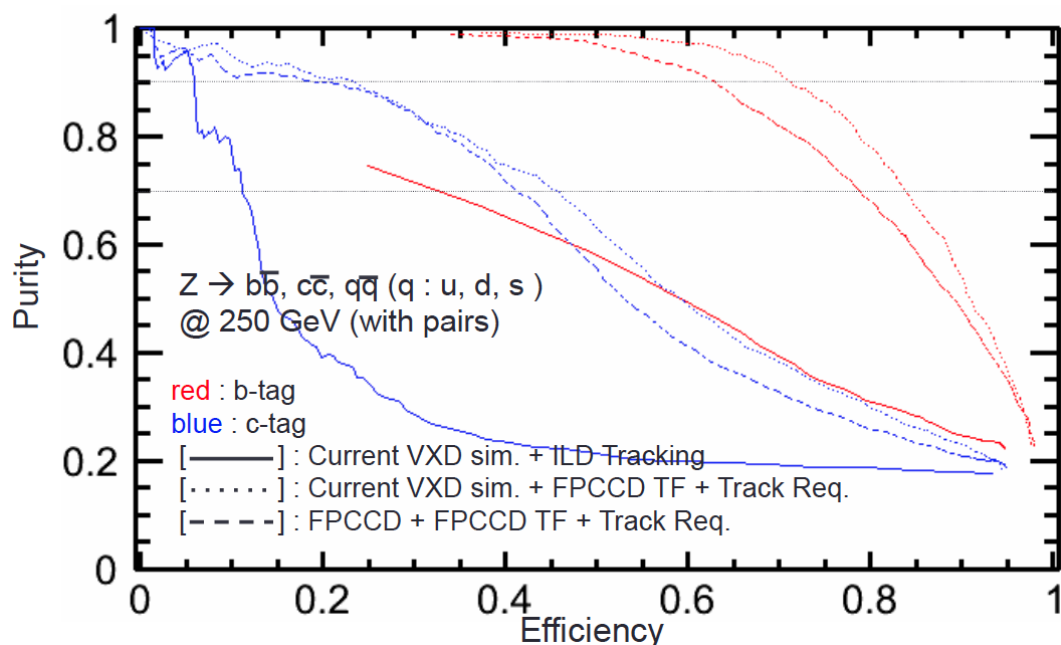


図 8.9: フレーバータグの評価結果 ($Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 250 GeV、ペア BG 有り)(式 (8.6) の条件込み)

表 8.2: 各セットアップ毎の CPU 時間と最大メモリ使用量

VXD	トラッキング	ペア BG	CPU 時間 [sec/event]		最大メモリ使用量 [MB/evt]
			SiliconTracking	フルトラッキング	
CMOS	現行版	×	0.2	1.1	408.7
CMOS	現行版	○	342.0	6.8	561.5
CMOS	FPCCDTrackFinder	×	7.2	1.0	619.5
CMOS	FPCCDTrackFinder	○	34.0	3.0	709.6
FPCCD	FPCCDTrackFinder	×	5.6	1.0	623.0
FPCCD	FPCCDTrackFinder	○	407.6	27.7	2276.0

マンスは良い。これはペアバックグラウンドの影響により発生するゴースト・トラックの数が FPCCD の方が多いためと考えられる。図 8.5 の左図、右図を見る限り、式 (8.6) の条件ではゴースト・トラックが除外されないため、別の手法でゴースト・トラックを少なくする必要がある。

8.2.3 CPU 時間とメモリ使用量の比較

ここでは $Z \rightarrow b\bar{b}$ @ 250 GeV のサンプルをトラッキングした時の CPU 時間、最大メモリ使用量を各セットアップ毎に比較する。表 8.2 は各セットアップのリソース消費量を表しており、それらの数値はフレーバータグの評価に使われた 2000 イベント分の平均値である。表 8.2 の CPU 時間 (SiliconTracking) を見ると、CMOS 崩壊点検出器を使う時、ペアバックグラウンドを考慮しない場合は現行のトラッキングアルゴリ

ズムを使用したほうが CPU 時間が少なくて済むが、ペアバックグラウンドを考慮した場合は FPCCDTrackFinder の方が $\frac{1}{10}$ の CPU 時間で済む事がわかる。一方、FPCCD 崩壊点検出器を使用する場合は FPCCDTrackFinder を使用していても、CMOS 崩壊点検出器の 12 倍の時間を必要とする。これは表 8.1 で示したように、CMOS 崩壊点検出器の実質的なペアバックグラウンドの蓄積量が FPCCD 崩壊点検出器より少ないため、大量のペアバックグラウンドトラックを再構成しなくて済むからである。また、FPCCD 崩壊点検出器のペアバックグラウンドを考慮した時の最大メモリ使用量をみると他に比べ桁大きい。これは大量のペアバックグラウンドヒットをメモリ上に記録するためである。第 7 章 7.3.3 節で触れたように、 $Z \rightarrow b\bar{b}$ @ 250 GeV より多粒子事象の $t\bar{t} \rightarrow 6jets$ @ 350 GeV イベントにペアバックグラウンドを考慮してトラッキングをすると約 3.5 GB 必要になることから、よりエネルギーの高いビームランでは更に多くのメモリを必要とすることが予想される。

結論としては、CMOS 崩壊点検出器を使用する場合は現行のトラッキングアルゴリズムを使用するより、FPCCDTrackFinder を使用した方がペアバックグラウンドを考慮した物理解析において CPU 時間、トラッキング効率、フレーバータグの性能において優秀であるということが言える。また、FPCCD 崩壊点検出器を使用する場合も同様に FPCCDTrackFinder を使用することにより解析のパフォーマンスを向上させることができるが、それでも SiliconTracking の必要とする CPU 時間が大きい。今後の FPCCDTrackFinder の開発においては CPU 時間と最大メモリ使用量の削減が必要である。現段階で考えられる具体的な解決策は、ペアバックグラウンドと思われるトラックを可能な限りトラッキング処理の最初の段階で除外することである。

第9章 まとめ

本研究では ILC の物理パフォーマンスの向上のため、FPCCD 崩壊点検出器のシミュレーションによる性能評価とイベント再構成プログラムの改良を行った。

占有率の評価とクラスターによるペアバックグラウンドの除去

FPCCD 崩壊点検出器はその非常に小さなピクセル CCD によってペアバックグラウンド占有率を低くすると考えられている。そこでシミュレーションにより FPCCD 崩壊点検出器のペアバックグラウンド占有率を評価した結果、500 GeV までのビームランなら占有率の点では問題無いが、1 TeV のビームランでは現行のデザインを修正する必要があることが分かった。

そこで占有率を小さくする手段として、FPCCD 崩壊点検出器に特有のクラスターを用いたペアバックグラウンドの除去アルゴリズムを実装することを考えた。クラスターの形状、位置の相関からシグナルクラスターを残しつつ、ペアバックグラウンド・クラスターを除外する。本研究では汎用的なカットアルゴリズムとして第一種クラスターカット、傾きカット、 ζ 幅カットを FPCCDClustering に実装した。このカットにより、シグナルクラスターを 2% 犠牲にすればペアバックグラウンド・クラスターを約 20% 減らすことができることが分かった。

インパクトパラメータ分解能の評価

FPCCD 崩壊点検出器は非常に小さなピクセル CCD を持つため、非常に優れた崩壊点分解能を持つことが期待される。そこで崩壊点分解能に大きく寄与するインパクトパラメータ分解能をシミュレーションにより評価した結果、非常に高いインパクトパラメータ分解能を持つこと、特に、高い運動量を持つトラックのインパクトパラメータ分解能は約 $1\mu\text{m}$ と非常に優秀なインパクトパラメータ分解能を持つことが分かった。

トラッキング効率の評価と新トラッキングアルゴリズムの開発

ILD グループでは、崩壊点検出器のヒットを考慮したトラッキング効率の評価は今まで行われなかった。フレーバータグの性能を評価、最適化するため、FPCCD 崩壊点検出器を用いた時の崩壊点検出器のヒットを考慮したトラッキング効率について評価した。その結果、現行のトラッキングアルゴリズムでは、どの崩壊点検出器を用いるにしても、特に低い横運動量領域 ($P_T < 1.7 \text{ GeV}/c$) のトラックを充分再構成できていないことがわかった。

そこで、FPCCD 崩壊点検出器に最適な新トラックファインダー、FPCCDTrackFinder を開発した。FPCCDTrackFinder は現行のトラッキングアルゴリズムをベースにしており、低い横運動量のトラックを充分再構成できるようにすること、大量のペアバックグラウンドによる外挿ミス、膨大な必要 CPU 時間の削減を目標にアルゴリズムを組み立てた。また、汎用性のあるトラッキングアルゴリズムを使用しているため他の

検出器にも使用可能である。その結果、FPCCDTrackFinder は $P_T > 0.6$ GeV/c の領域でもトラッキング効率を約 99 % に保つことを示し、またペアバックグラウンド環境下でも $P_T > 0.6$ GeV/c の領域ではトラッキング効率は悪化しないことを示した。また FPCCD 崩壊点検出器を用いた、ペアバックグラウンドを考慮したトラッキングは FPCCDTrackFinder により初めて可能となった。

また、FPCCDTrackFinder のソースコードについては

https://svnsrv.desy.de/viewvc/marlinreco/MarlinTrkProcessors/trunk/source/Refitting/FPCCDSiliconTracking_MarlinTrk.cc

https://svnsrv.desy.de/viewvc/marlinreco/MarlinTrkProcessors/trunk/source/Refitting/FPCCDFullLDCTracking_MarlinTrk.cc

に公開予定であり、現在はその準備としてドキュメントの作成、コーディングの見直しを行っている。

フレーバータグ性能評価

フレーバータグは ILC の物理、特に Higgs の物理解析に非常に重要である。フレーバータグに大きく寄与するのが崩壊点分解能のため、FPCCD 崩壊点検出器はフレーバータグの性能改善に大きく貢献することが期待される。FPCCDTrackFinder を使用すれば低運動量のトラックのトラッキング効率が向上するが分かったため、FPCCD 崩壊点検出器を用いた時のフレーバータグの性能評価を行った。ペアバックグラウンドを考慮しない Z-pole イベントを用いて評価した結果、開発した FPCCDTrackFinder は、c-tag のパフォーマンスを向上させ (purity 70% の c-tag では efficiency が 2.5%)、FPCCD 崩壊点検出器は b-tag、特に c-tag のパフォーマンスを向上させることが分かった (purity 90% の b-tag では efficiency が 2%、purity 70% の c-tag では efficiency が 4% 改善)。

次に、ペアバックグラウンドを考慮し、 $Z \rightarrow b\bar{b}, c\bar{c}, q\bar{q}$ @ 250 GeV を用いて評価した結果、ペアバックグラウンドの影響によりフレーバータグのパフォーマンスが著しく低下することがわかった。また、CMOS 崩壊点検出器を使用した場合、現行のトラッキングより FPCCDTrackFinder を使用した方がパフォーマンスの低下を抑えることができる。原因となった大量のペアバックグラウンド・トラックは、トラックに SIT ヒットを要求することにより大きく除外することができた。これによりフレーバータグのパフォーマンスを回復させたが、それでもペアバックグラウンドを考慮しない場合に比べ性能は落ちる。今後はもう 1 つの原因であるゴースト・トラックの削減を行うことが必要である。。

また、フレーバータグの性能評価に用いた $Z \rightarrow b\bar{b}$ @ 250 GeV イベントをトラッキングするために必要となった CPU 時間と最大使用メモリを各セットアップ毎に比較した。CMOS 崩壊点検出器に FPCCDTrackFinder を適用すると、現行のトラッキングアルゴリズムに比べ、ペアバックグラウンドを考慮した場合は CPU 時間を約 1/10 (342.0 sec/event \rightarrow 34.0 sec/event) にできることが分かった。ただし、FPCCD 崩壊点検出器に FPCCDTrackFinder を適用した場合はペアバックグラウンドを考慮した場合 407.6 sec/event 必要であるため、今後の FPCCDTrackFinder の開発では CPU 時間の削減も必要である。

付録A 標準模型のラグランジアン

ヒッグス場が $\phi_+ \rightarrow 0, \phi_0 \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(v + \chi)$ で $SU(2) \times U(1)$ 対称性を破った後のラグランジアン密度は、

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \bar{\nu}(i\partial - m_\nu)\nu + \bar{l}(i\partial - m_l)l + \frac{1}{2}(\partial_\mu\chi\partial^\mu\chi - m_H^2\chi^2) \\
 & - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + m_W^2 W_{+\mu}^* W_+^\mu - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} + \frac{m_Z^2}{2}Z_\mu Z^\mu \\
 & + eA_\mu(\bar{l}\gamma^\mu l) - \frac{g}{\sqrt{2}}[W_{+\mu}(\bar{\nu}\gamma^\mu P_L l) + c.c] \\
 & - \bar{g}Z_\mu[\bar{\nu}\gamma^\mu(s_{\nu_L}P_L + s_{\nu_R}P_R)\nu + \bar{l}\gamma^\mu(s_{l_L}P_L + s_{l_R}P_R)l] \\
 & + \frac{2v\chi + \chi^2}{4}\left(\left(\frac{2m_W}{v}\right)^2 W_{+\mu}^* W_+^\mu + \frac{1}{2}\left(\frac{2m_Z}{v}\right)^2 Z_\mu Z^\mu\right) \\
 & - \frac{m_l}{v}\chi(\bar{l}l) - \frac{m_\nu}{v}\chi(\bar{\nu}\nu) \\
 & - \frac{m_H^2}{2v}\chi^3 - \frac{m_H^2}{8v^2}\chi^4
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

ここで、

$$\begin{aligned}
 m_H &= \sqrt{-4\mu^2}, \quad m_W = \frac{vg}{2}, \quad m_Z = \frac{v\bar{g}}{2}, \\
 e &= g \sin \theta_W, \quad \bar{g} = \sqrt{g^2 + g'^2}, \quad \sin \theta_W = \frac{g'}{\bar{g}}, \quad \cos \theta_W = \frac{g}{\bar{g}}
 \end{aligned}$$

である。

付録B トラックパラメターの定義

本論文ではトラックパラメターの定義は文献 [21] に従っている。ここではそのトラックパラメターの定義の仕方を説明する。

右手系のカルテシアン座標系を考え、ビーム衝突点を原点にとる。磁場方向を z 軸に取り、 z 軸に垂直かつ地平面に平行な方向を x 軸、 x, z 軸に垂直かつ上を向く方向に y 軸を取る。荷電粒子のトラックはリファレンスポイント $\mathbf{P}^r = (P_x^r, P_y^r, P_z^r)$ と 5 つのトラックパラメター ($\omega, \phi_0, d_0, z_0, \tan \lambda$) で表すことができる。 x - y 平面においてリファレンスポイントに最も近いトラック上の点を、 $\mathbf{P}^0 = (P_x^0, P_y^0, P_z^0)$ とする。また、本研究では終始リファレンスポイントは $\mathbf{P}^r = \mathbf{0}$ としている。

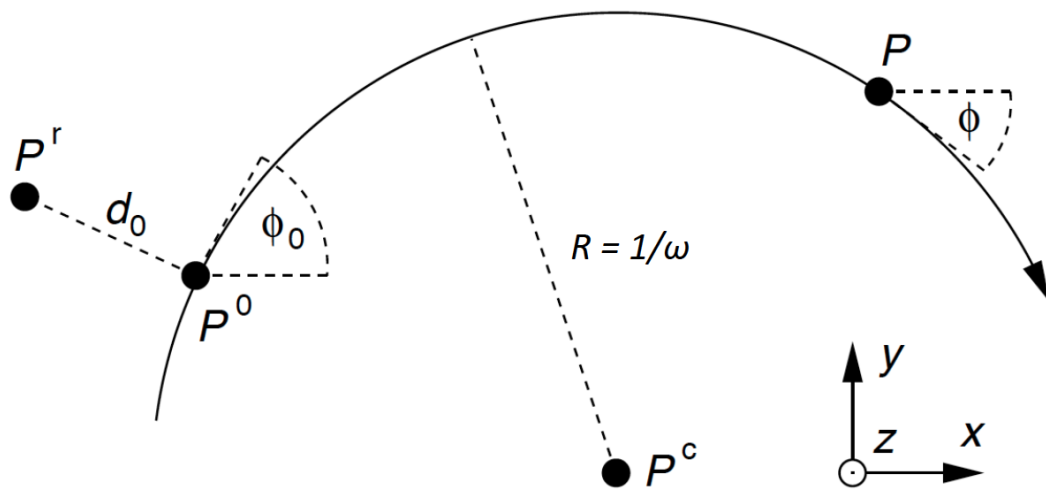


図 B.1: x - y 平面に射影されたトラック

d_0, ϕ_0, ω は x - y 平面上に射影されたトラックの形状に関するパラメターであり、図 B.1 にトラックと d_0, ϕ_0, ω との関連を示している。ここで R はトラックが描く円の曲率半径である。この時、

- ϕ_0 は最近接点における粒子の運動方向に関する方位角である。
- ω は符号付きのトラックの曲率であり、

$$|\omega| = \frac{1}{R} \quad (\text{B.1})$$

の関係が成り立つ。 ω は粒子の電荷が $+$ の場合 $\omega > 0$ となり、 $-$ の場合 $\omega < 0$ となる。

- d_0 は x-y 平面における符号付きの impact parameter である。ここで

$$\mathbf{d} \equiv \mathbf{P}^0 - \mathbf{P}^r$$

$$\mathbf{n}_{pca} \equiv \begin{pmatrix} -\sin \phi_0 \\ \cos \phi_0 \end{pmatrix}$$

を定義する。 \mathbf{n}_{pca} は最近接点からリファレンスポイントを指す正規化されたベクトルである。この時、 d_0 は \mathbf{d} の \mathbf{n}_{pca} への射影として定義する。

$$d_0 \equiv \mathbf{n}_{pca} \cdot \mathbf{d} = -(P_x^0 - P_x^r) \sin \phi_0 + (P_y^0 - P_y^r) \cos \phi_0 \quad (\text{B.2})$$

$|\mathbf{n}_{pca}| = 1$ なので、 $|d_0|$ は x-y 平面における \mathbf{P}^r と \mathbf{P}^0 との間の距離となる。

このように定義することにより d_0 の符号の付き方は次の通りになる。リファレンスポイントから最近接点を見る時、最近接点で粒子が左から右に行く場合は $d_0 > 0$ となり、右から左なら $d_0 < 0$ となる。この性質により、 \mathbf{P}^r が円軌道の内側にあるとき $\text{sgn}(\omega) = \text{sgn}(d_0)$ となり、 \mathbf{P}^r が円軌道の外側なら $\text{sgn}(\omega) = -\text{sgn}(d_0)$ となる。基本的には ω と \mathbf{P}^r の位置から符号を特定する方法が簡単である。

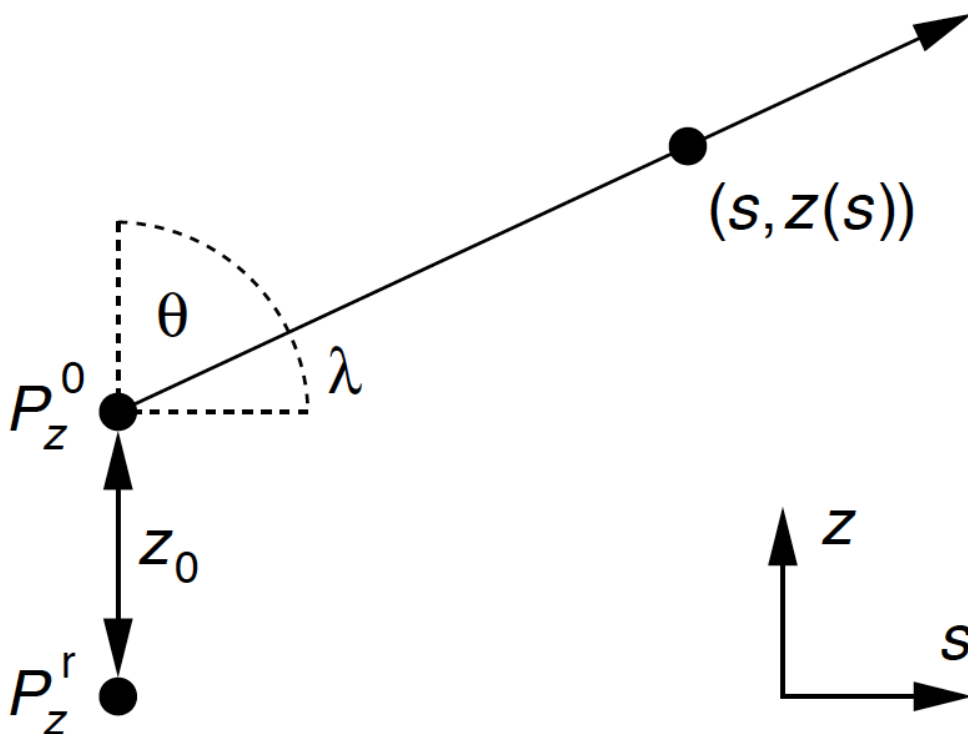


図 B.2: s-z 平面に射影されたトラック

$z_0, \tan \lambda$ は s-z 平面上に射影されたトラックの形状に関するパラメーターであり、図 B.2 にトラックと $z_0, \tan \lambda$ との関連を示している。ここで s は x-y 平面上において粒子が \mathbf{P}^0 から進んだ距離を表す。この時、

-
- $\tan \lambda$ は s-z 平面における傾き $\frac{dz}{ds}$ を表す。よって、このパラメータは運動量ベクトルの仰角 θ に直接関係しており、

$$\tan \lambda = \frac{p_z}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2}} = \cot \theta \quad (\text{B.3})$$

となる。

- z_0 は s-z 平面における符号付きの impact parameter である。 z_0 は

$$z_0 \equiv P_z^0 - P_z^r \quad (\text{B.4})$$

と定義する。

付録C ペアバックグラウンドヒットの ζ 分布と ξ 分布

以下の図はペアバックグラウンドヒットの ζ 分布と ξ 分布のデータである。ここでの ζ 、 ξ 方向の定義は、レイヤーを構成する板(ラダー)の平面を ξ - ζ 平面とし、 ζ 方向を磁場方向と平行に取り、 ξ 方向を ζ 方向と直交する方向に取る(つまり ζ 方向と z 方向は数学的には同値だが、 ζ はラダー平面上に取られた座標系を意識し、 z 方向は実験室系の座標系を意識している点で区別される)。図 5.5 の右上のイメージ図に ξ 軸、 ζ 軸を明記したので参照していただきたい。

また、各レイヤーのラダー毎の分布は図 C.25 から図 C.168 に示した。各レイヤーのラダー 0 は $\phi = -90^\circ$ 方向にあるラダーとし、これを基準に $+\phi$ 方向にあるラダーを順に 1, 2, ... とする。

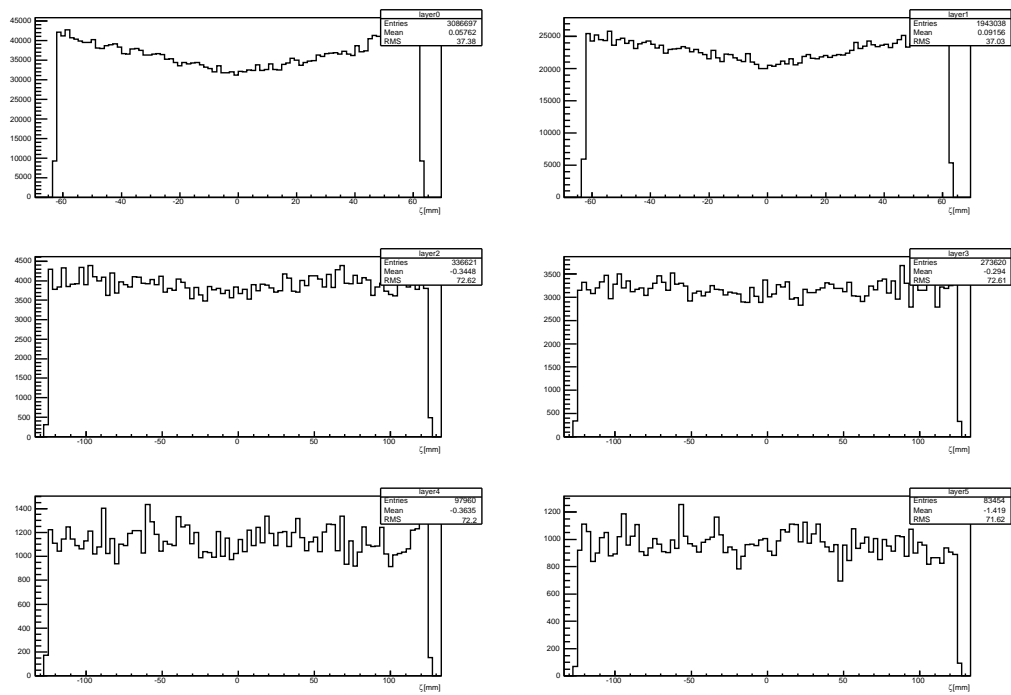


図 C.1: 各レイヤーの ζ 分布 (250 GeV)

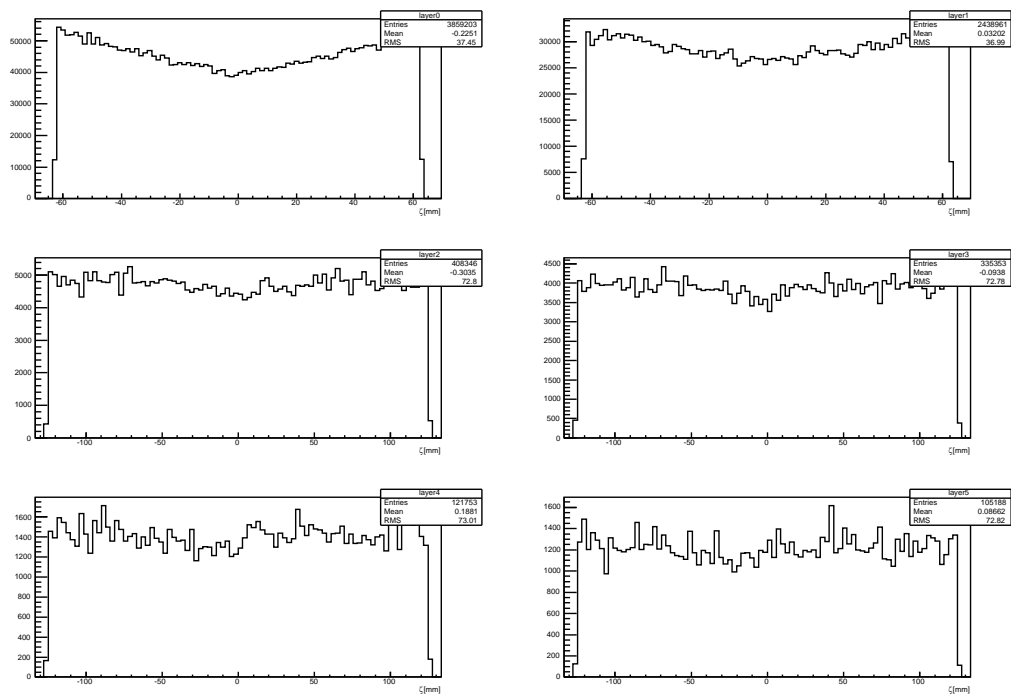
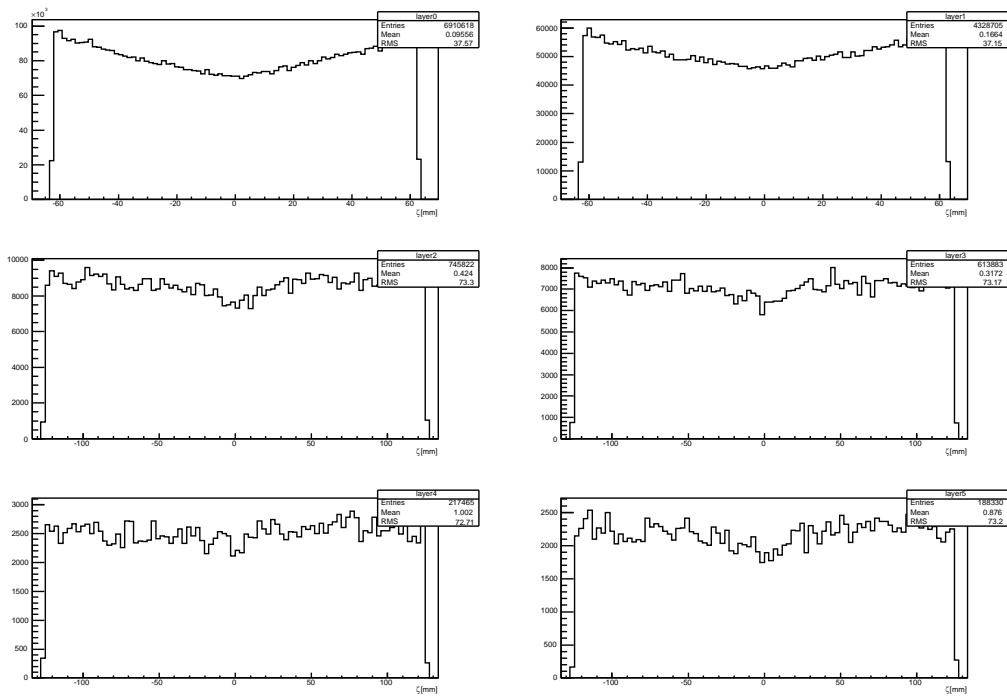
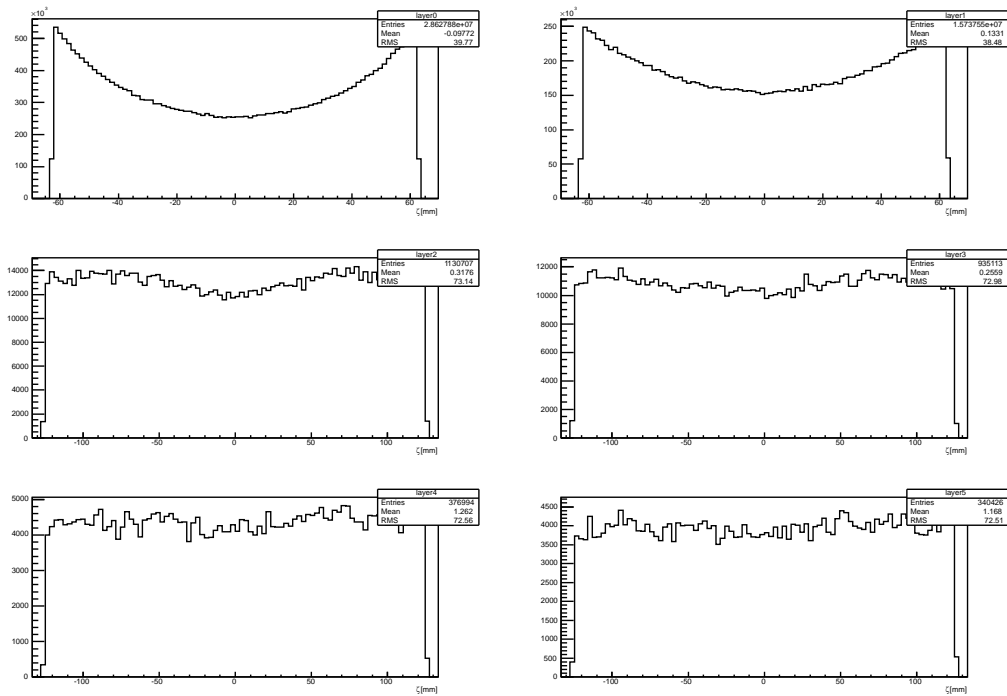


図 C.2: 各レイヤーの ζ 分布 (350 GeV)

図 C.3: 各レイヤーの ζ 分布 (500 GeV)図 C.4: 各レイヤーの ζ 分布 (1000 GeV)

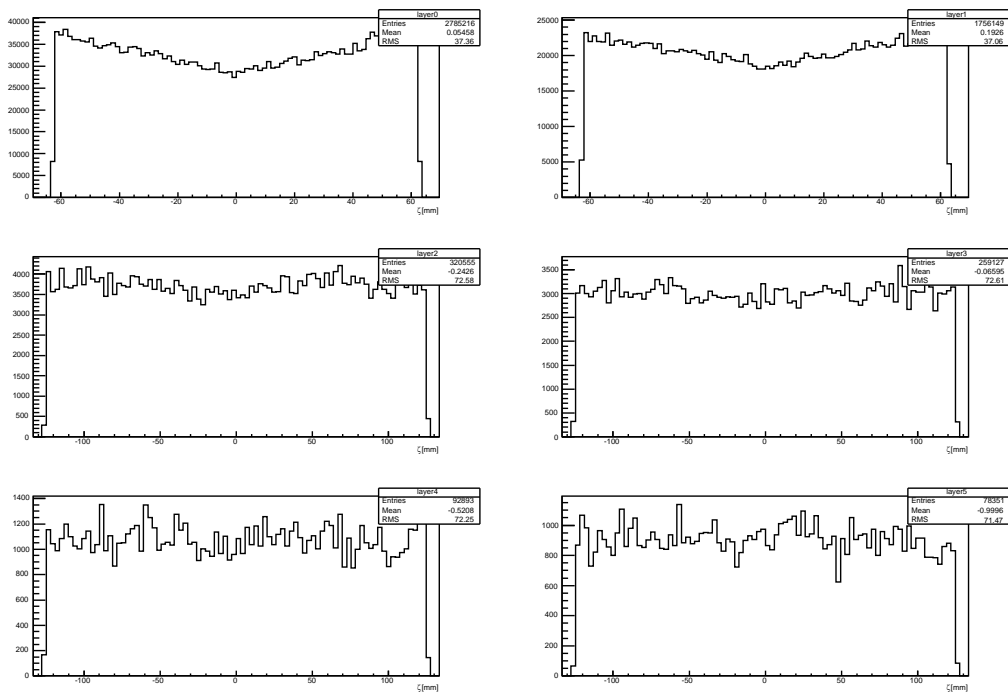


図 C.5: 各レイヤーの ζ 分布 (250 GeV、直接ペア)

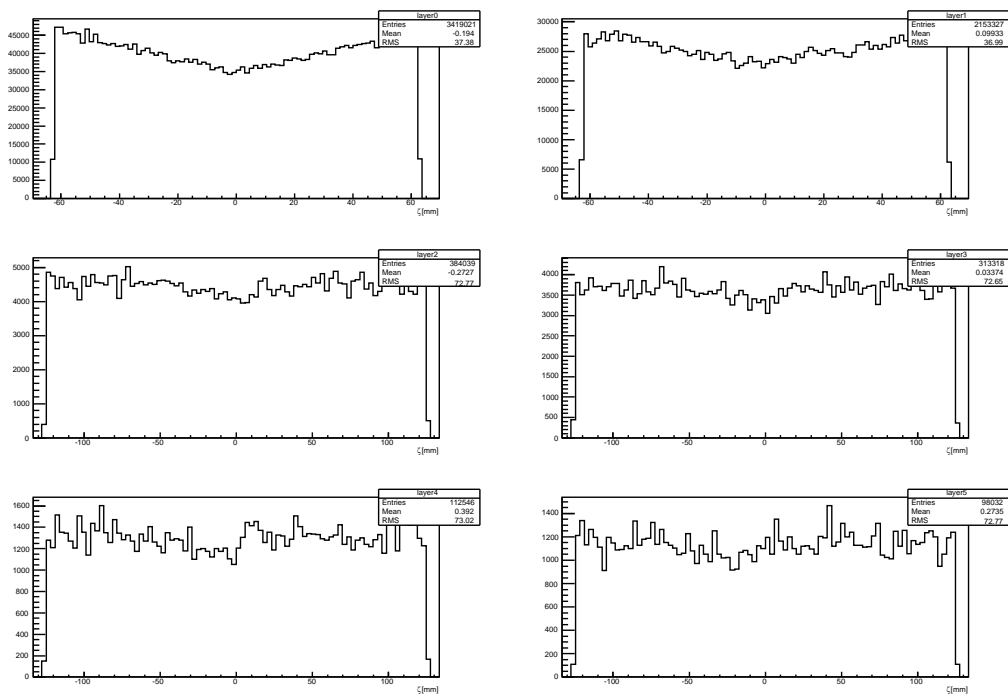
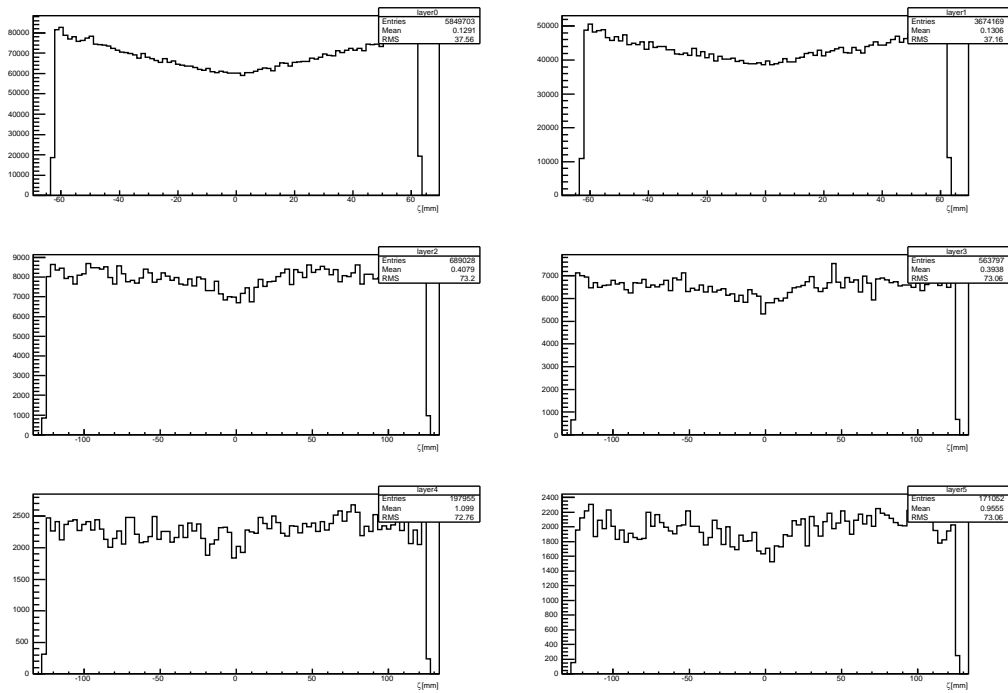
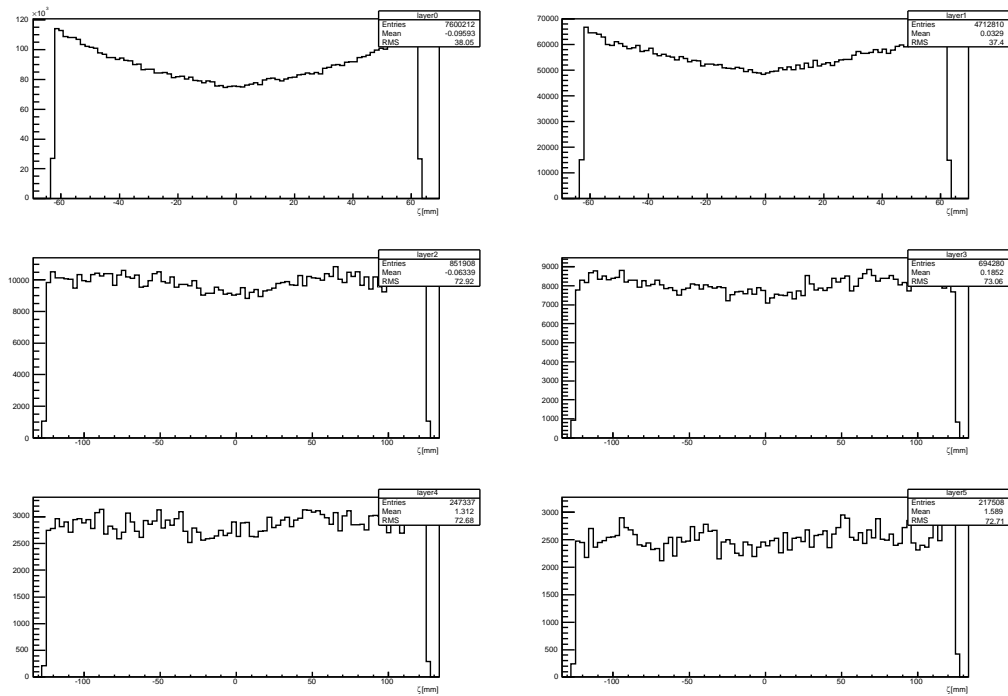


図 C.6: 各レイヤーの ζ 分布 (350 GeV、直接ペア)

図 C.7: 各レイヤーの ζ 分布 (500 GeV、直接ペア)図 C.8: 各レイヤーの ζ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

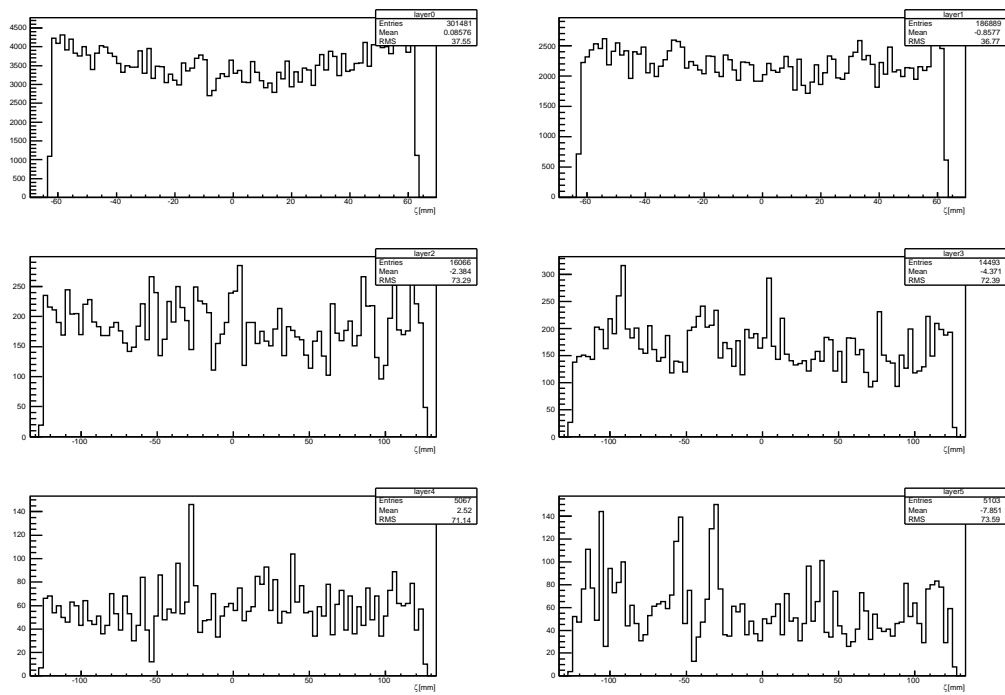


図 C.9: 各レイヤーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

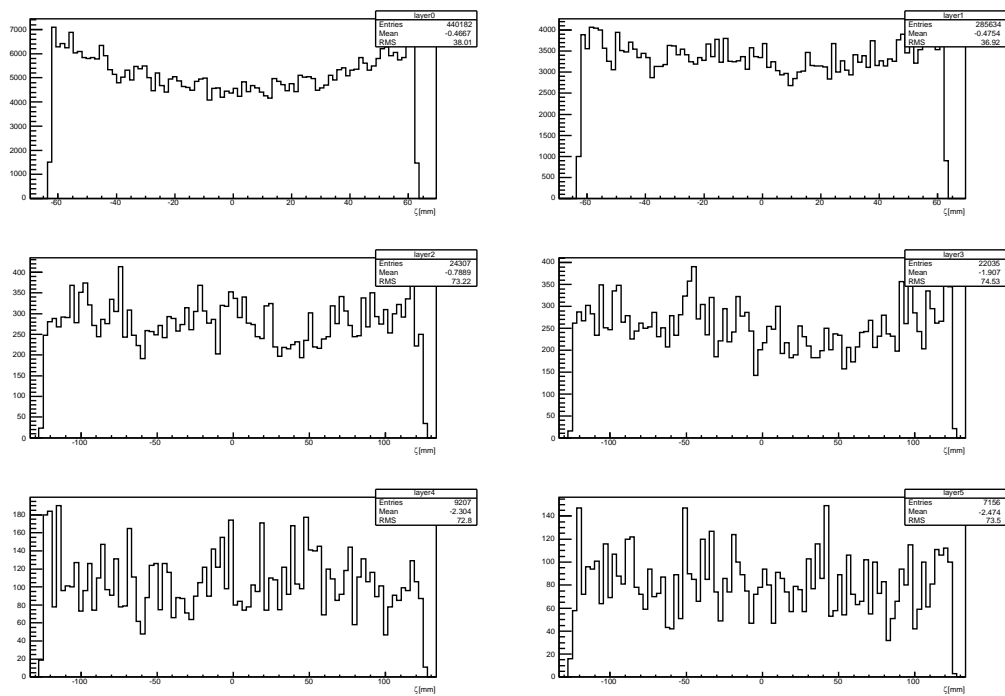
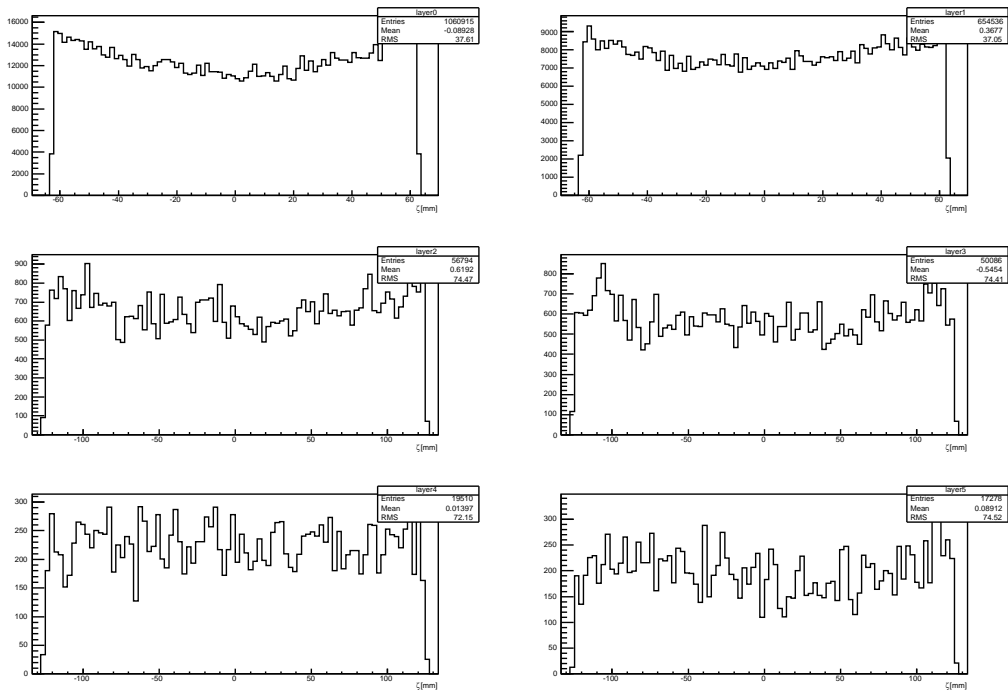
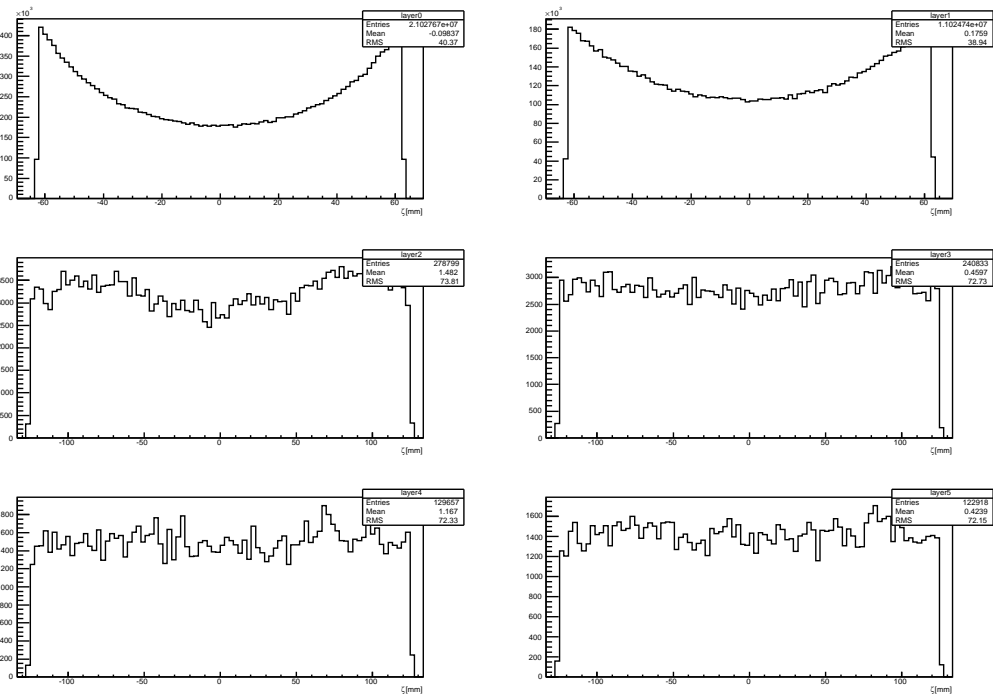


図 C.10: 各レイヤーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

図 C.11: 各レイヤーの ζ 分布 (500 GeV、反跳ペア)図 C.12: 各レイヤーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

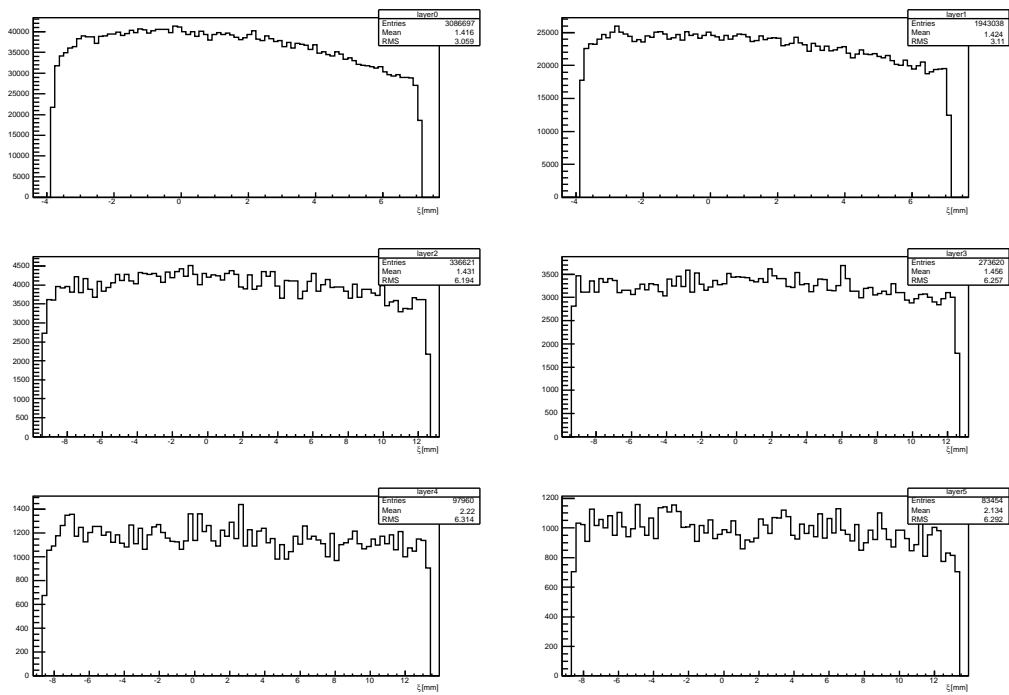


図 C.13: 各レイヤーの ξ 分布 (250 GeV)

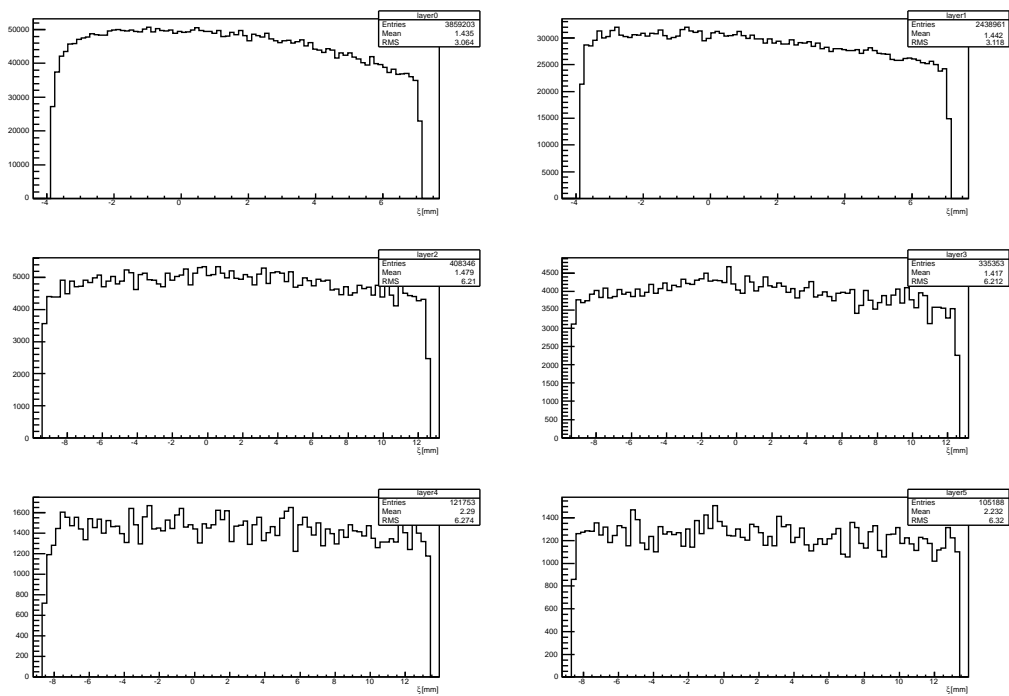
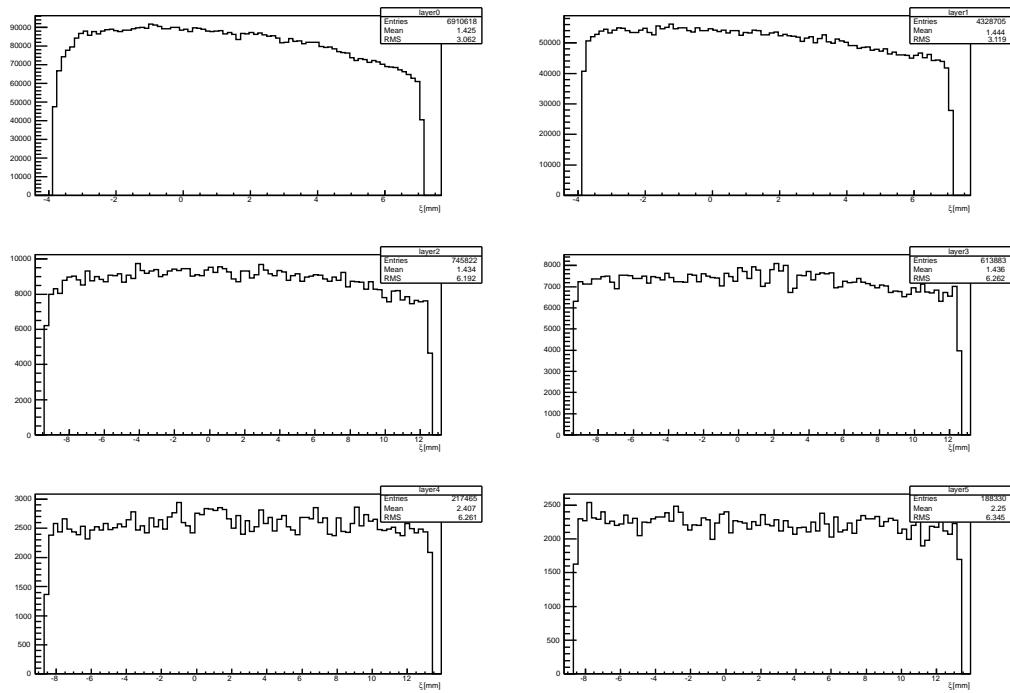
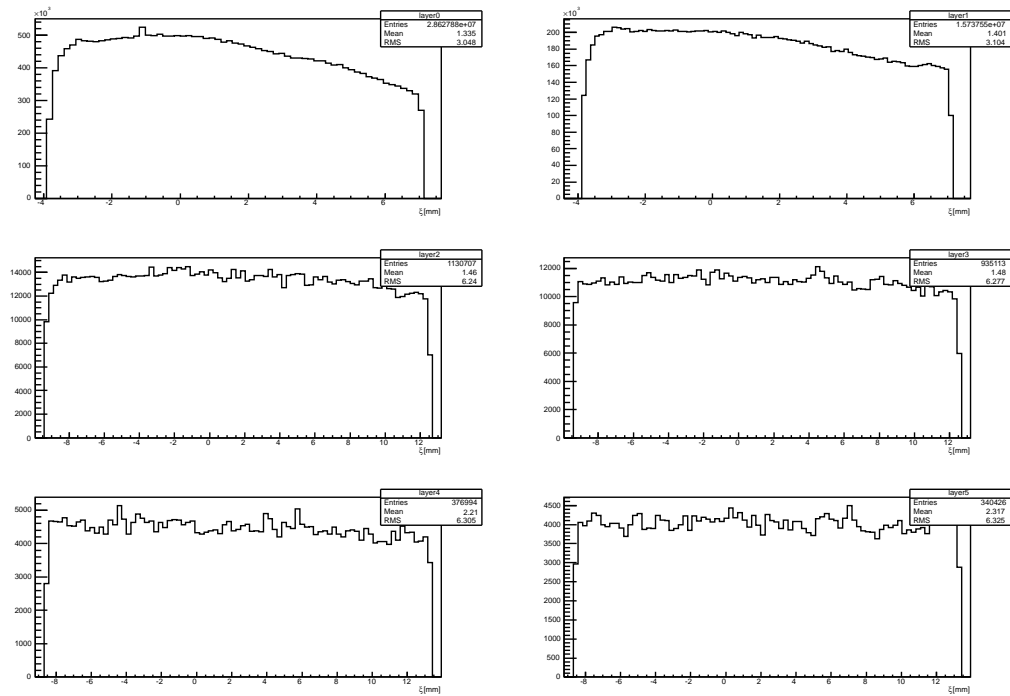


図 C.14: 各レイヤーの ξ 分布 (350 GeV)

図 C.15: 各レイヤーの ξ 分布 (500 GeV)図 C.16: 各レイヤーの ξ 分布 (1000 GeV)

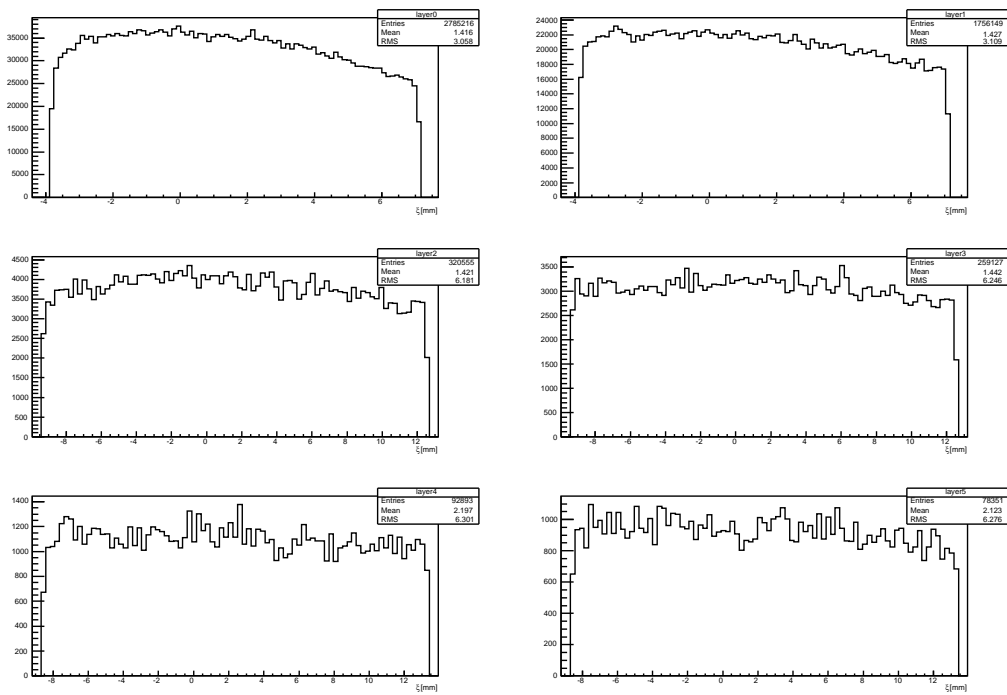


図 C.17: 各レイヤーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)

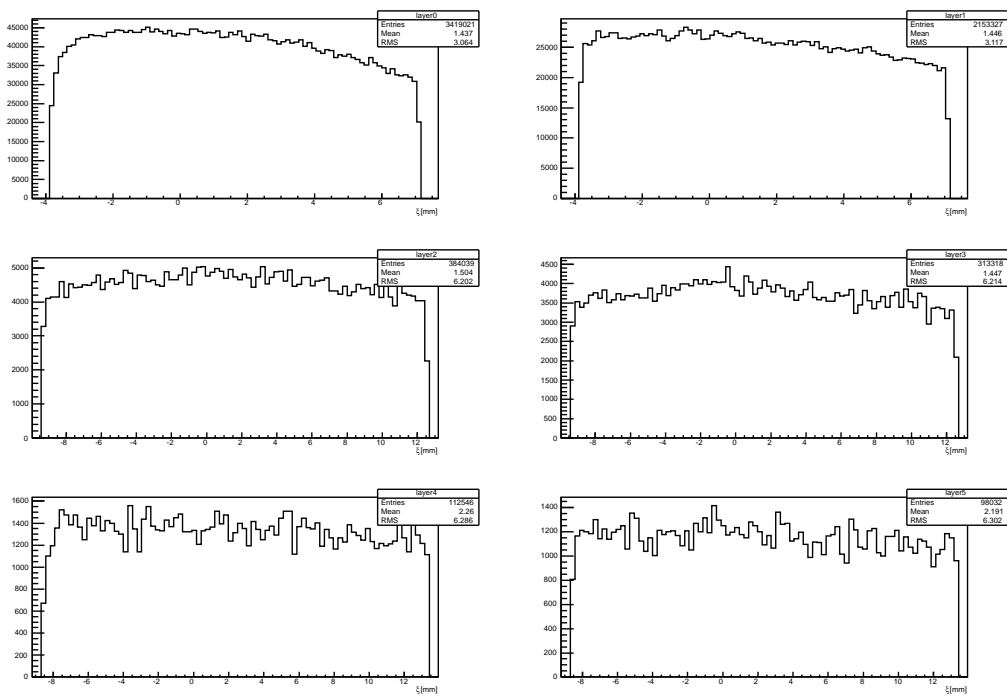
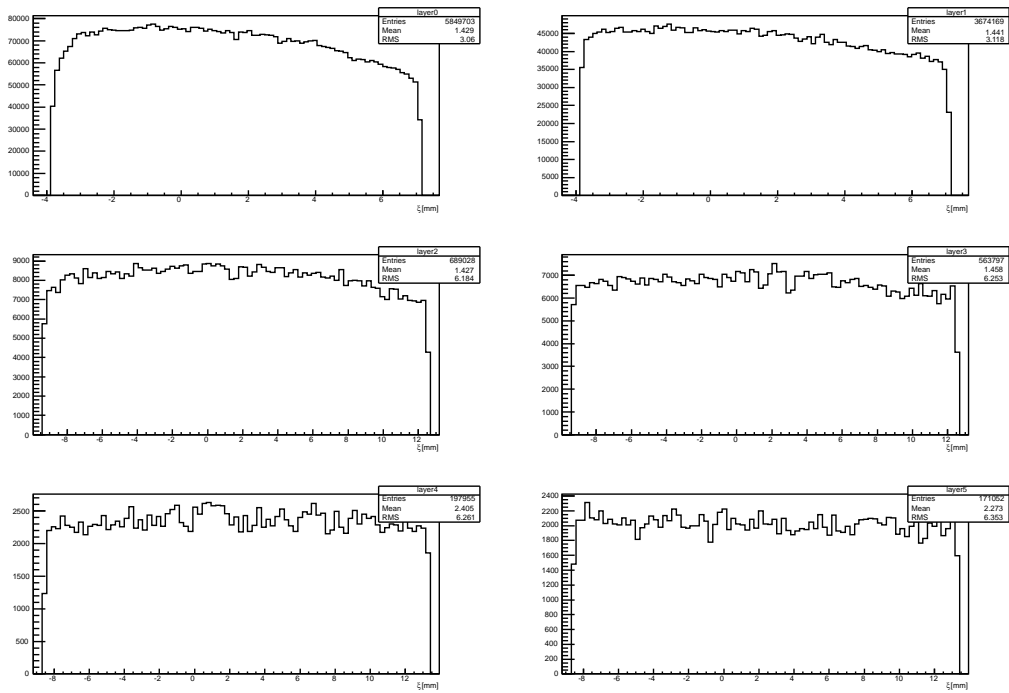
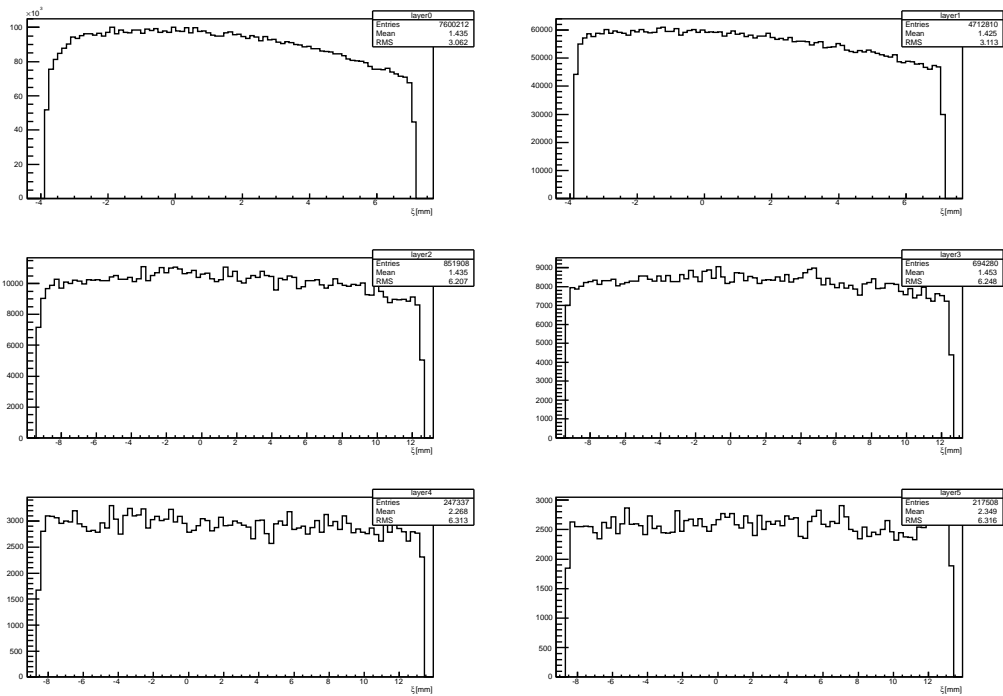


図 C.18: 各レイヤーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)

図 C.19: 各レイヤーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)図 C.20: 各レイヤーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

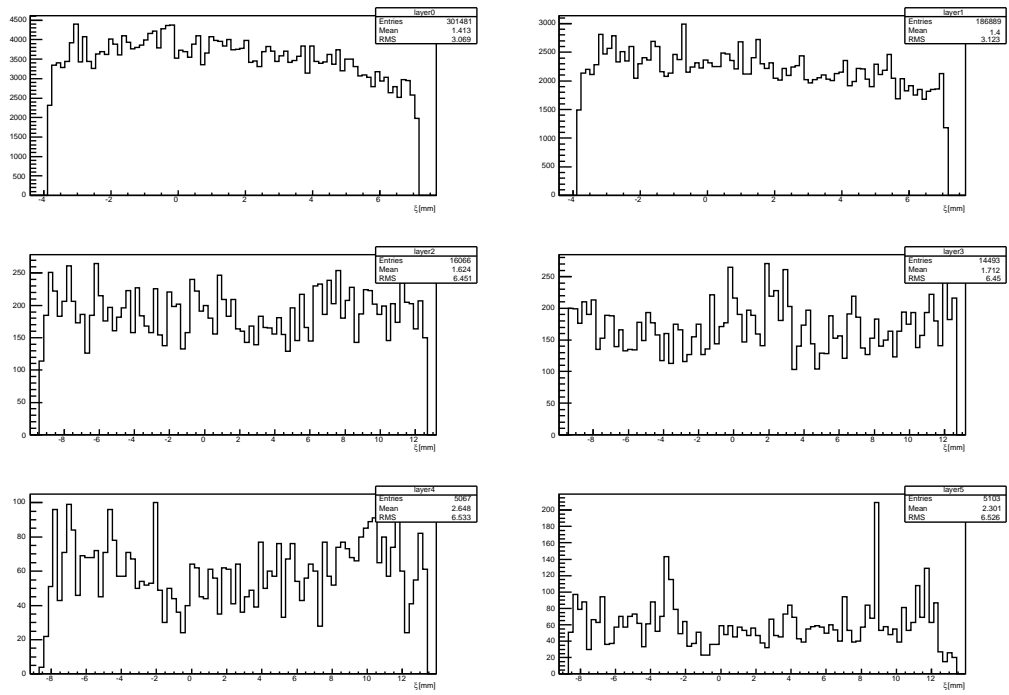


図 C.21: 各レイヤーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

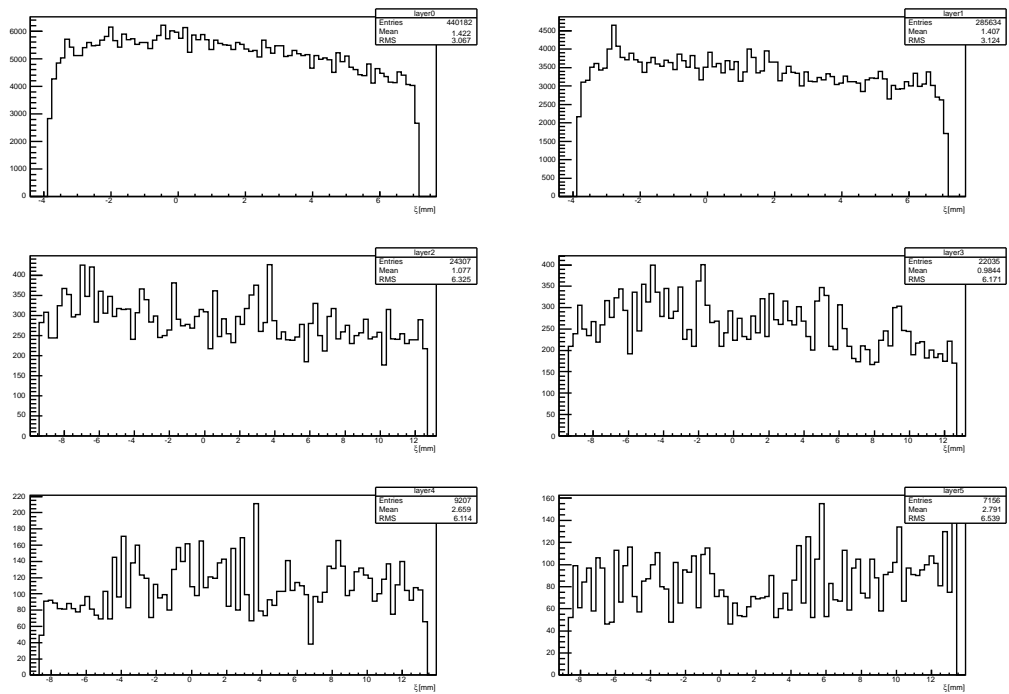
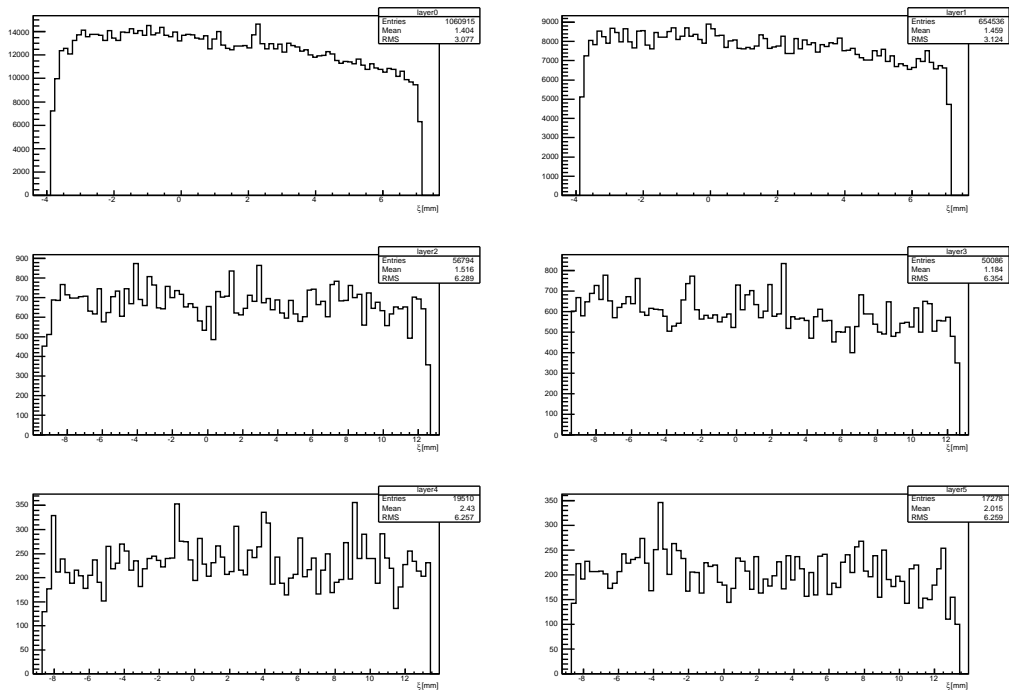
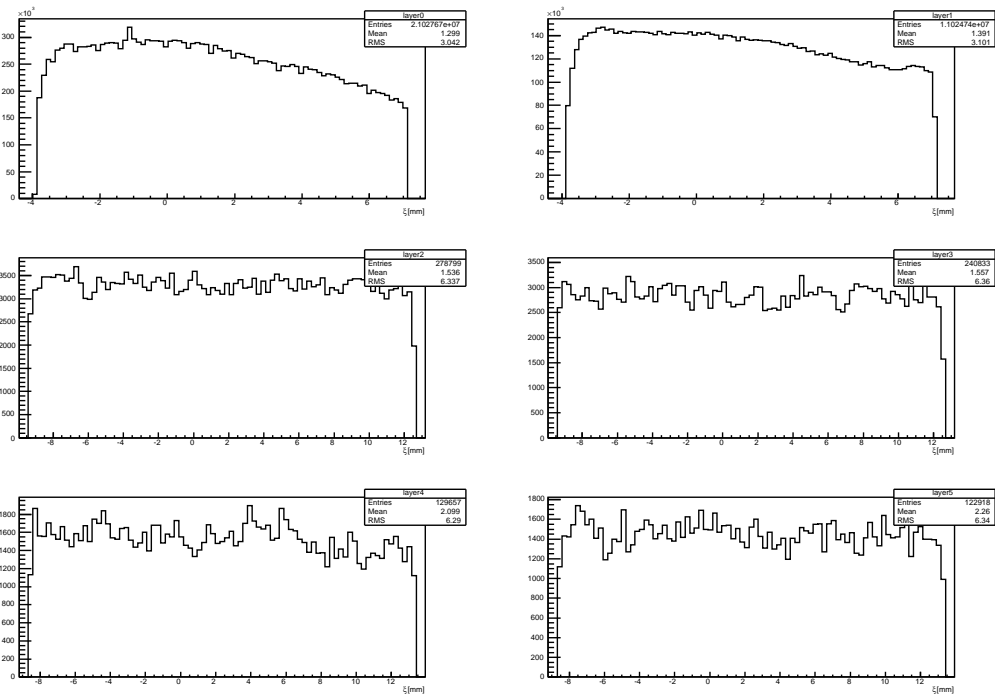


図 C.22: 各レイヤーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

図 C.23: 各レイヤーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)図 C.24: 各レイヤーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

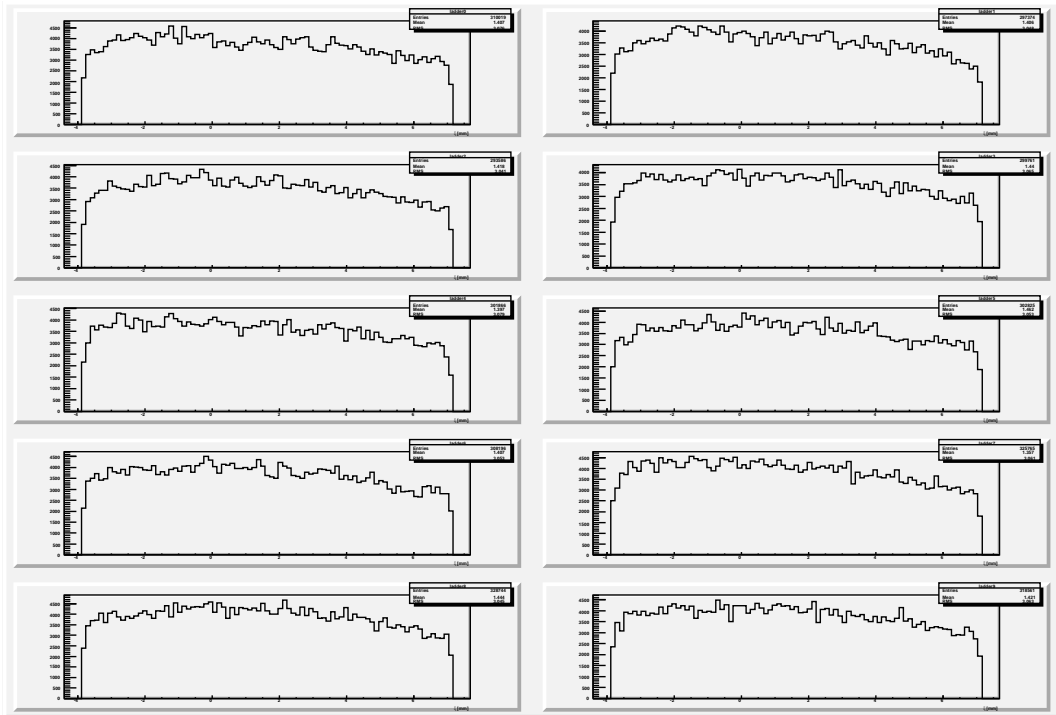


図 C.25: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV)

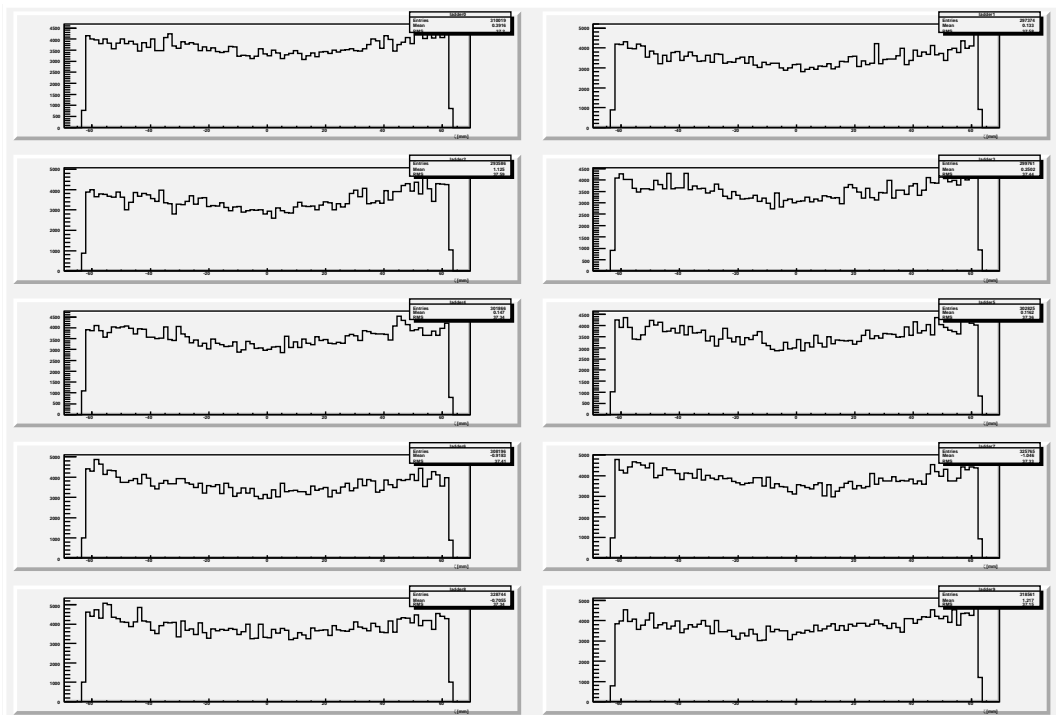


図 C.26: レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV)

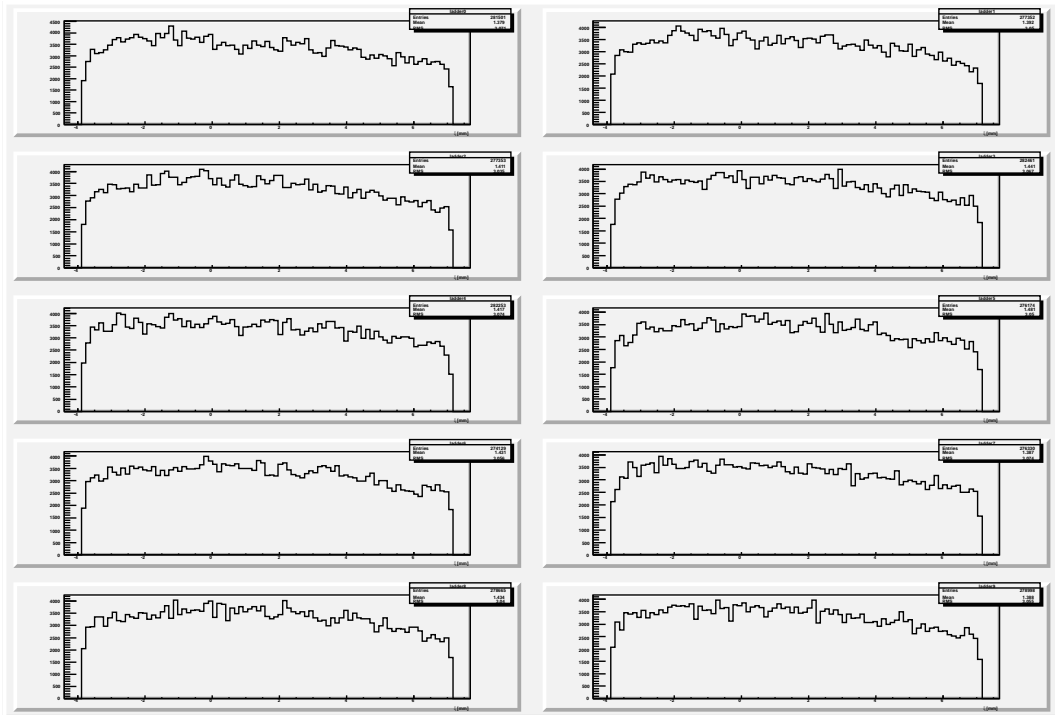


図 C.27: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)

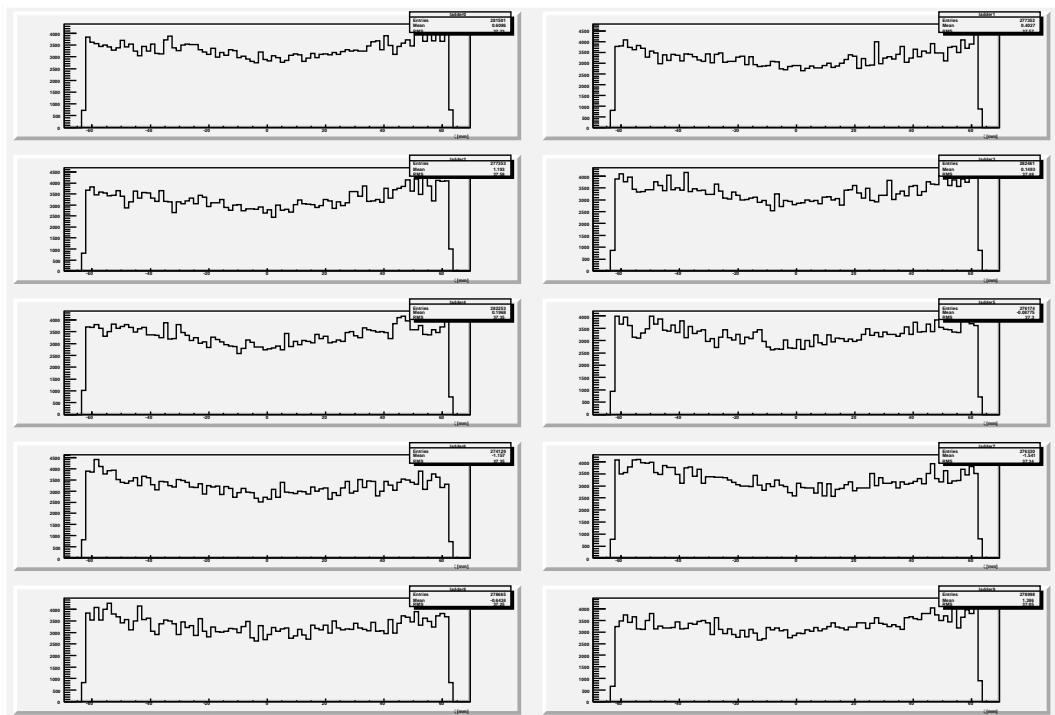


図 C.28: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)

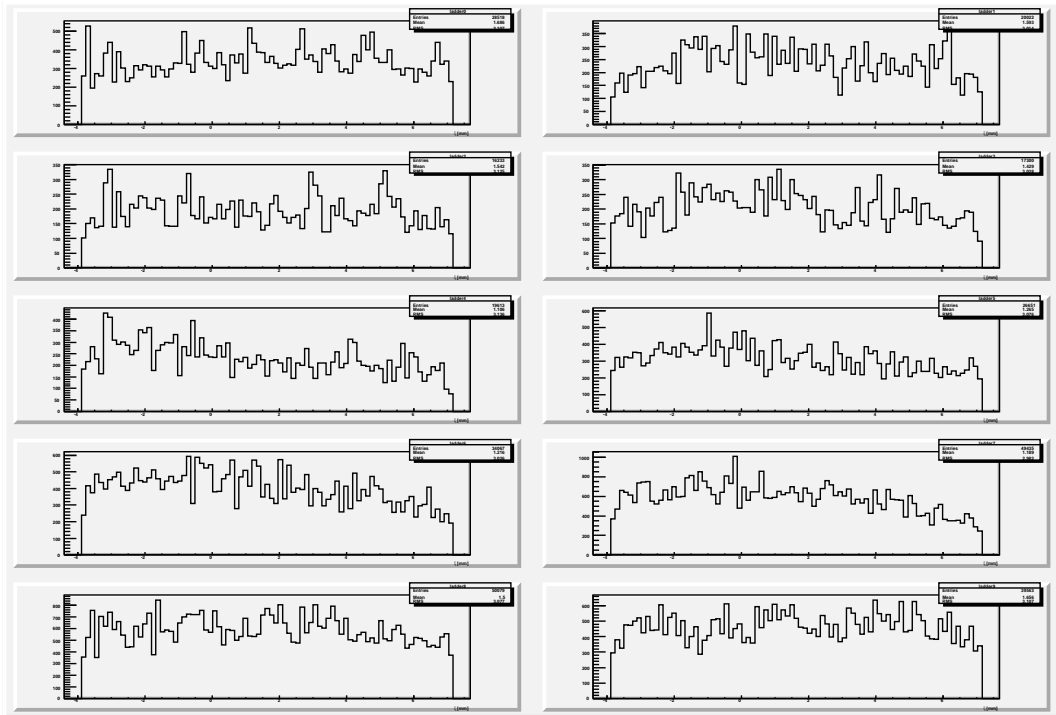


図 C.29: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

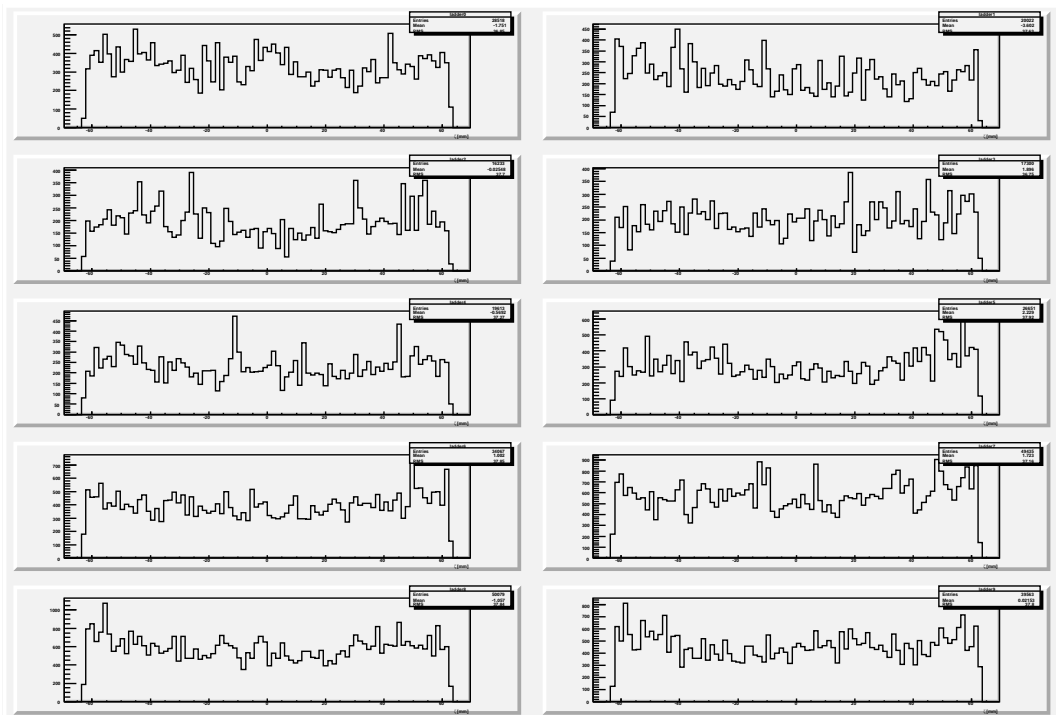


図 C.30: レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

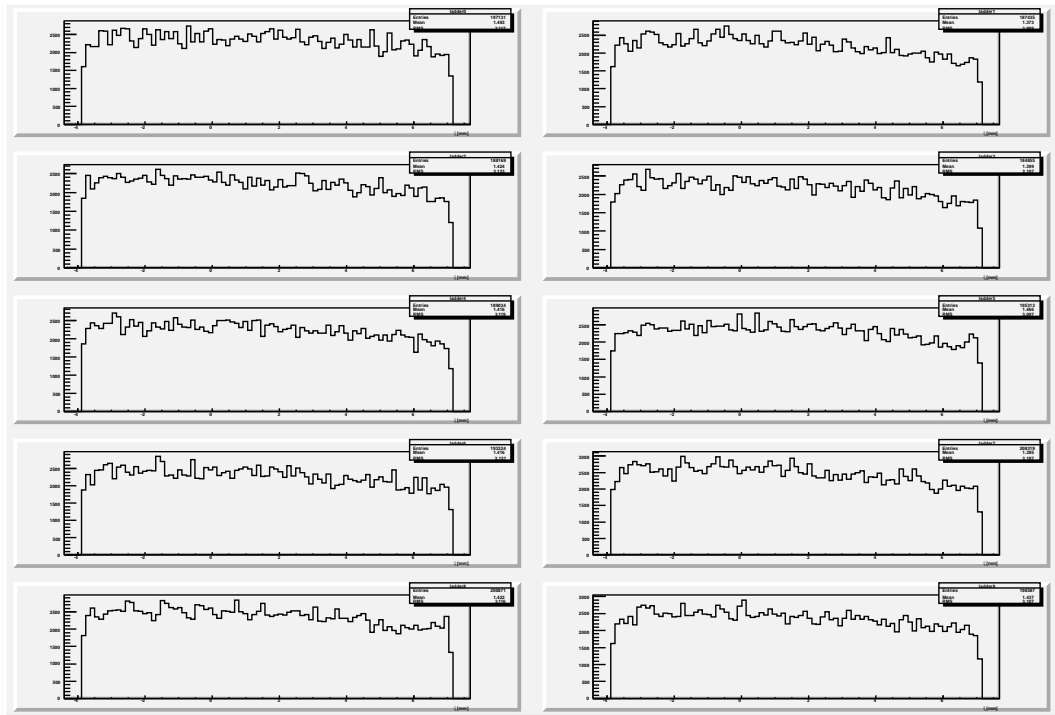


図 C.31: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV)

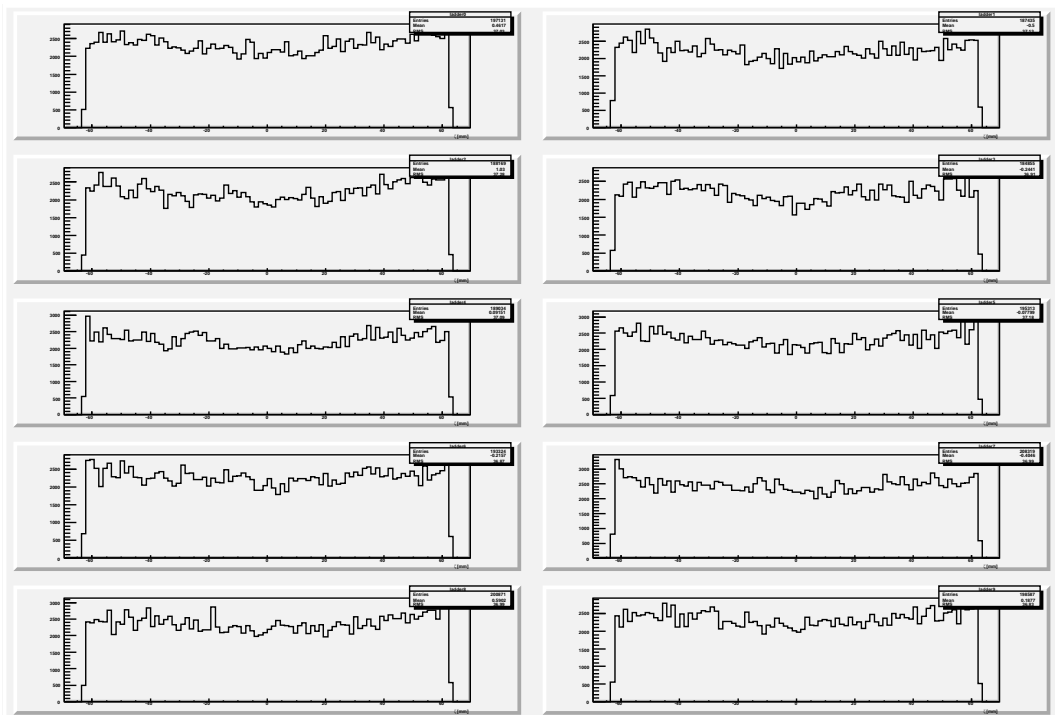


図 C.32: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV)

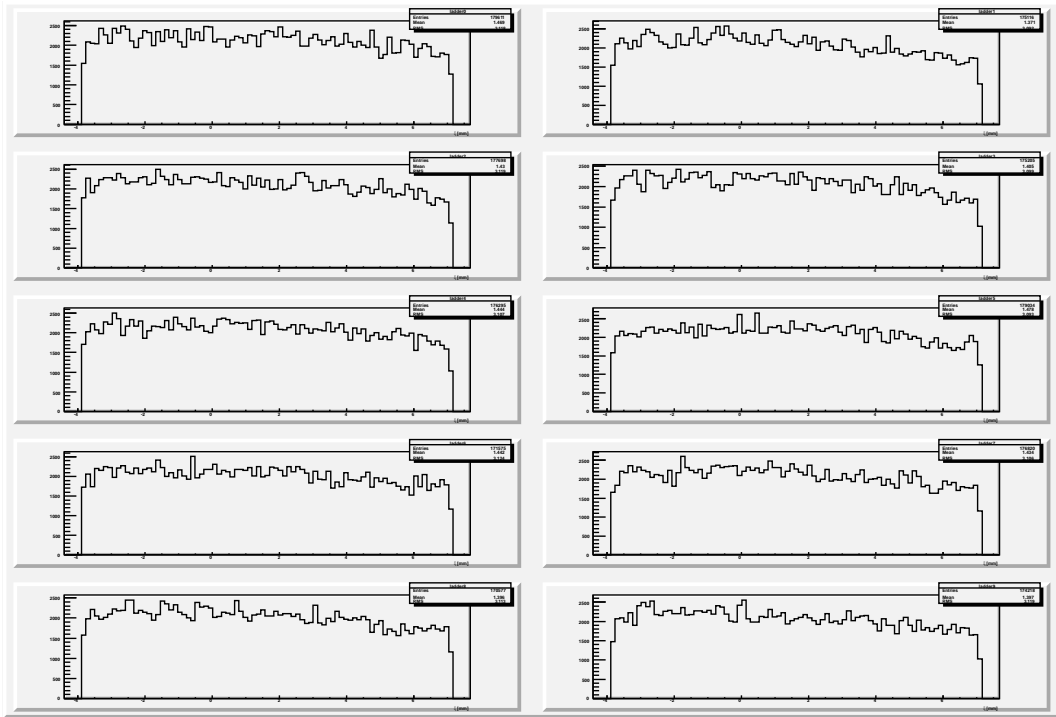


図 C.33: レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)

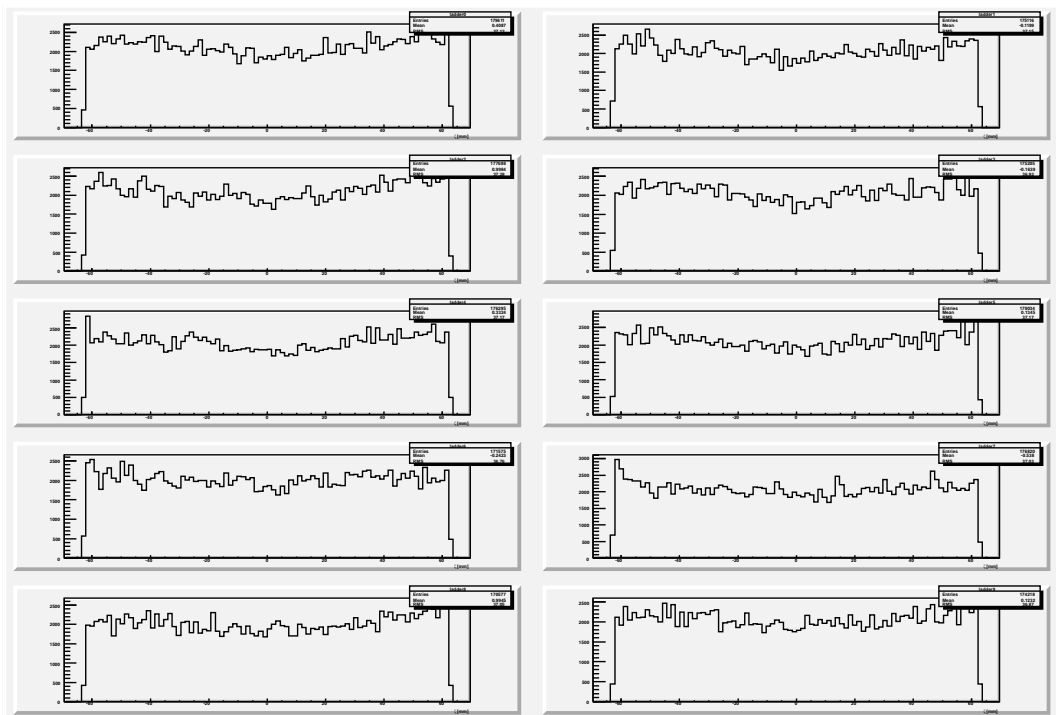


図 C.34: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、直接ペア)

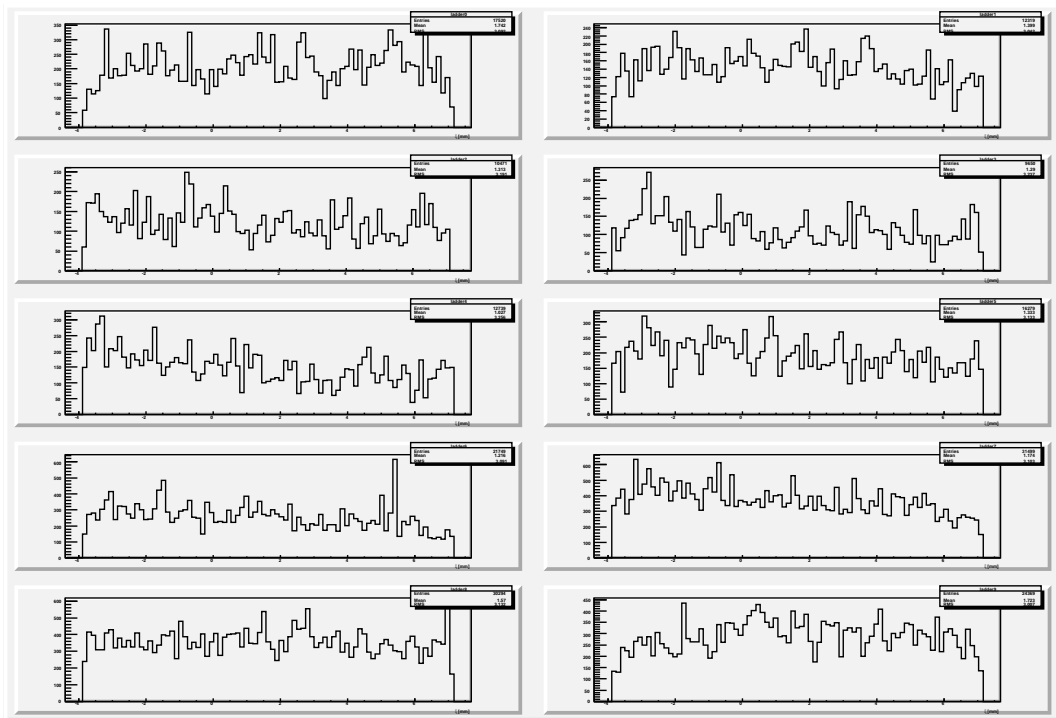


図 C.35: レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

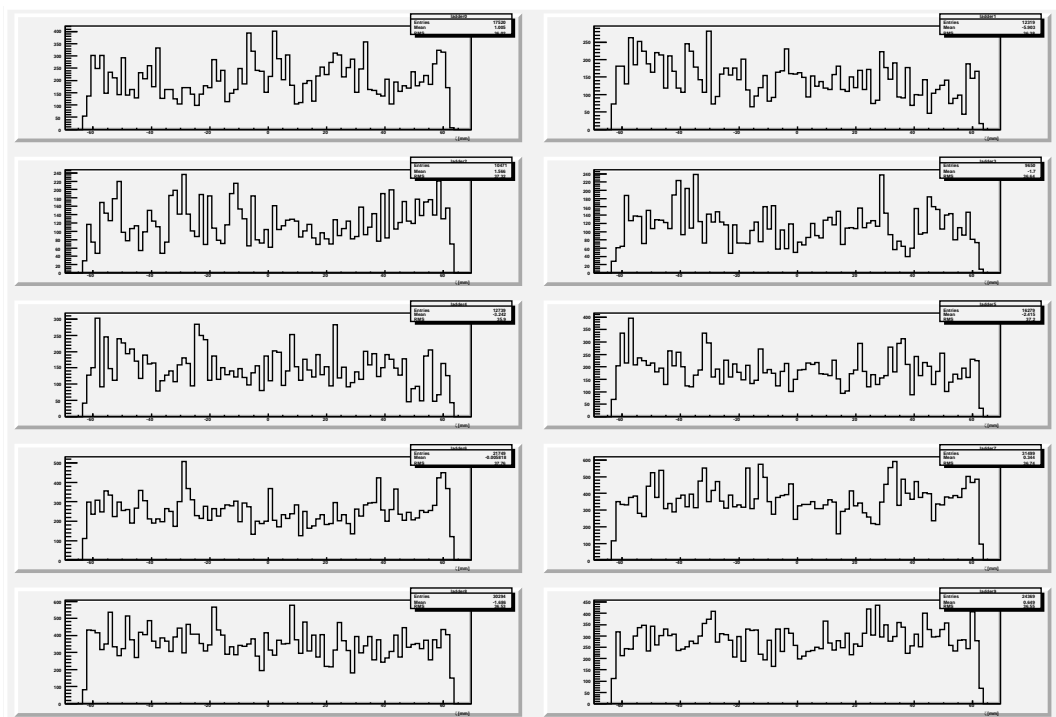


図 C.36: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

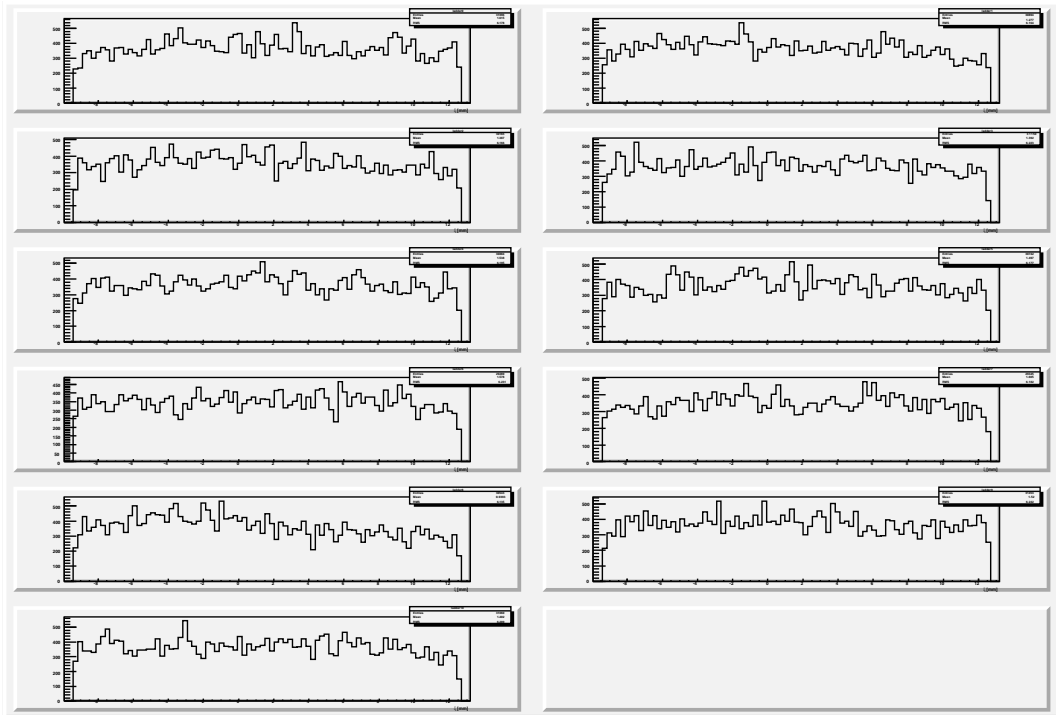


図 C.37: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV)

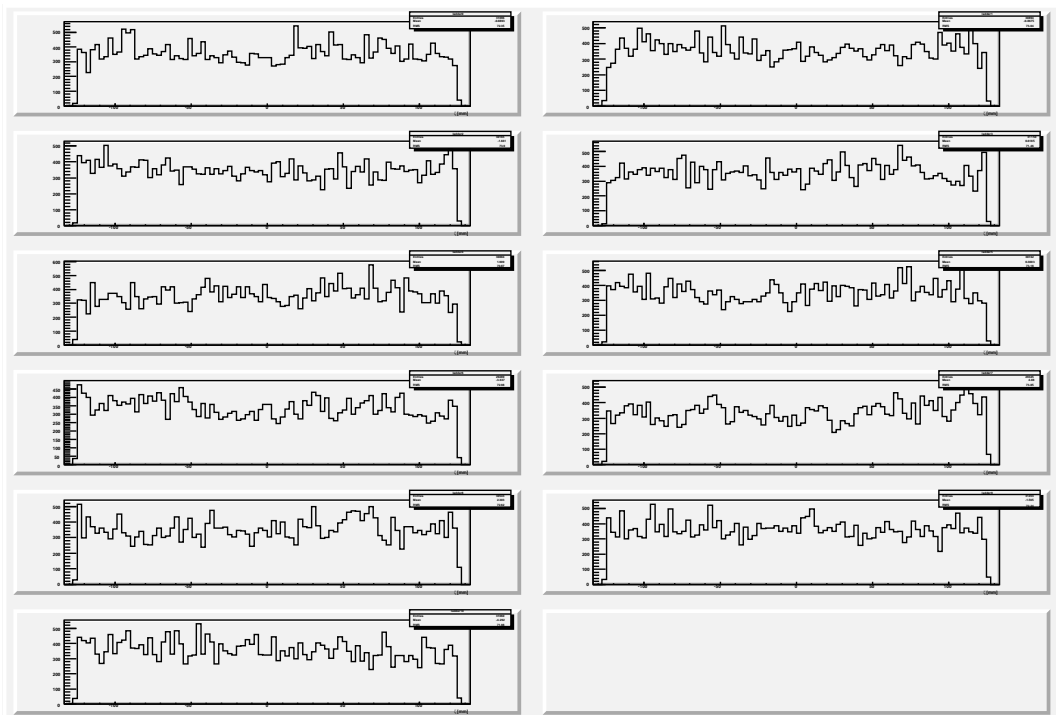


図 C.38: レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV)

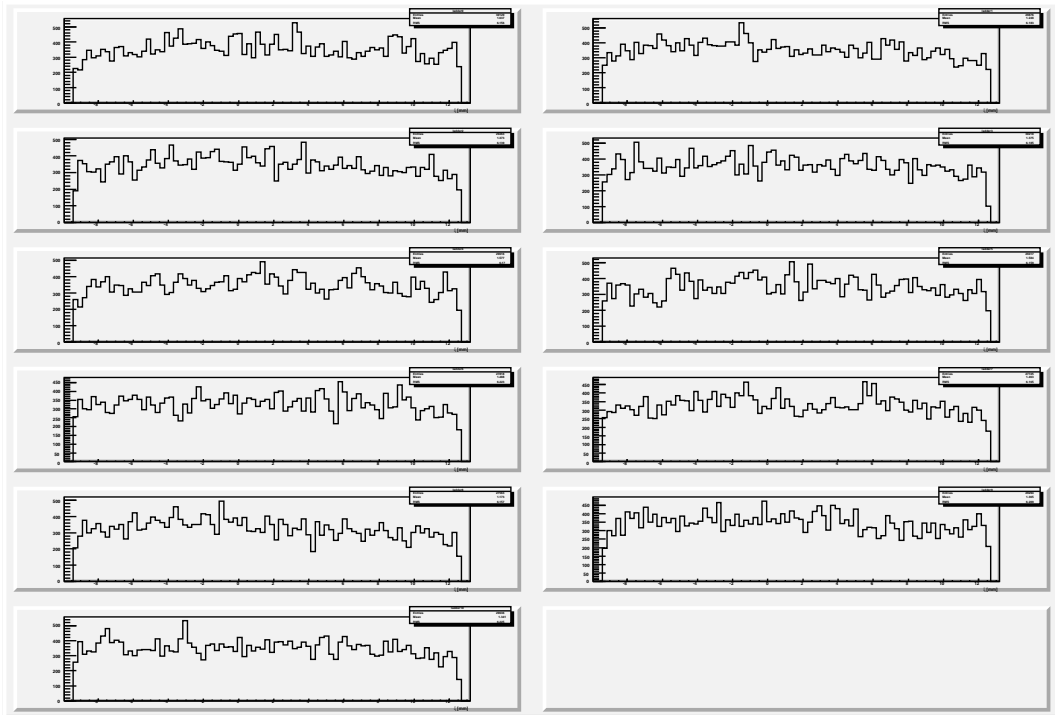


図 C.39: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)

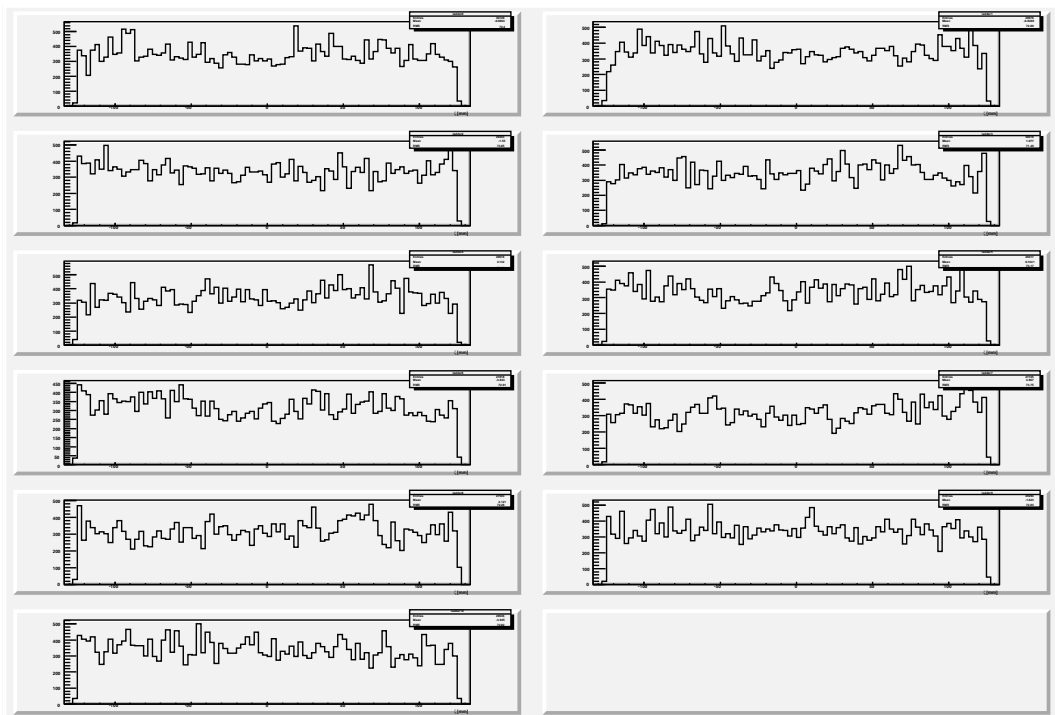


図 C.40: レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、直接ペア)

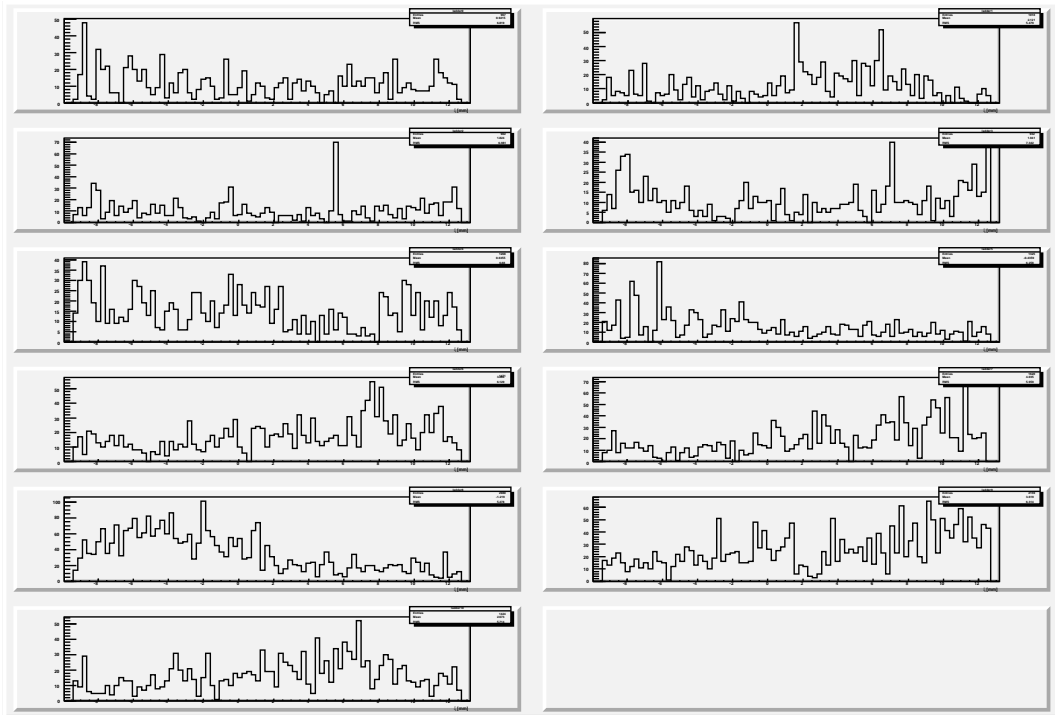


図 C.41: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

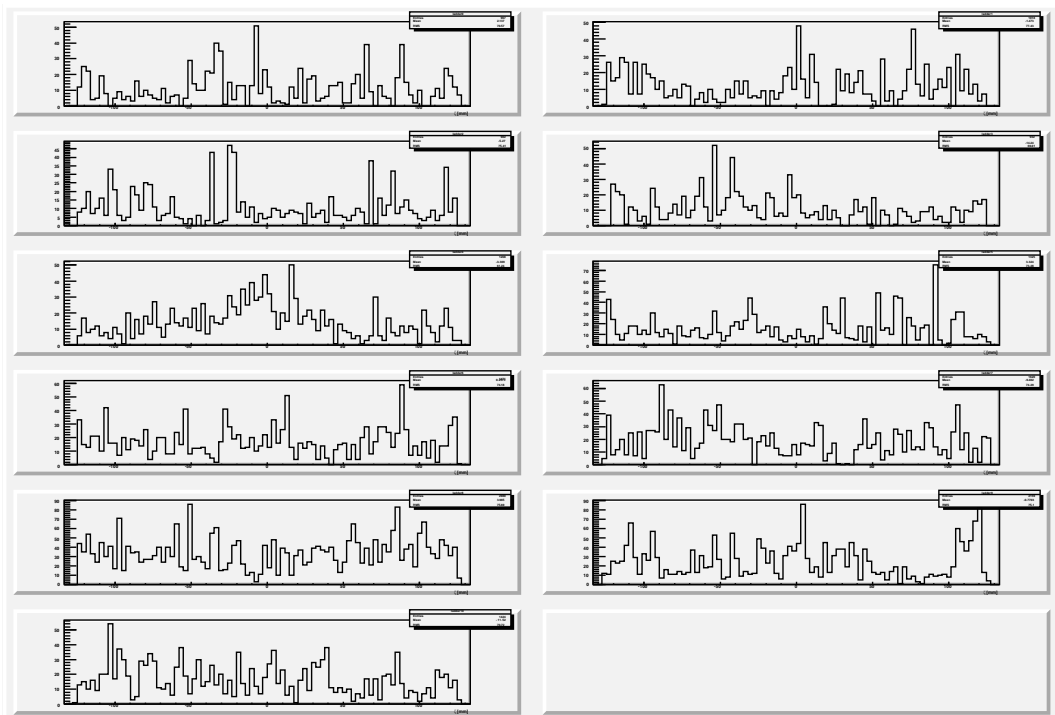


図 C.42: レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

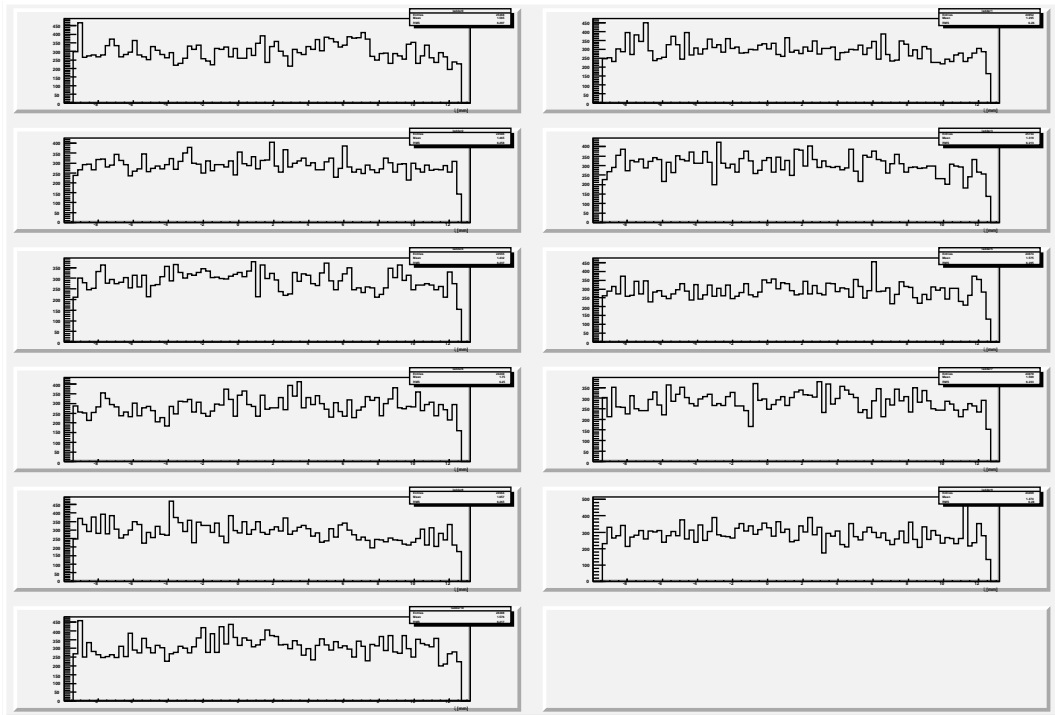


図 C.43: レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV)

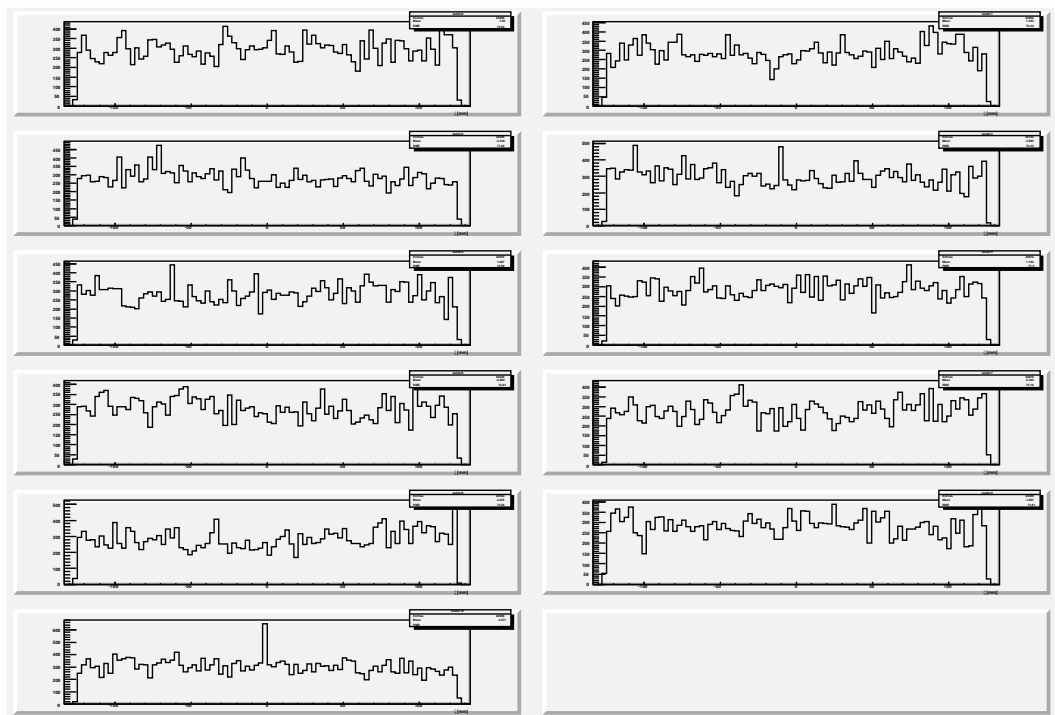


図 C.44: レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV)

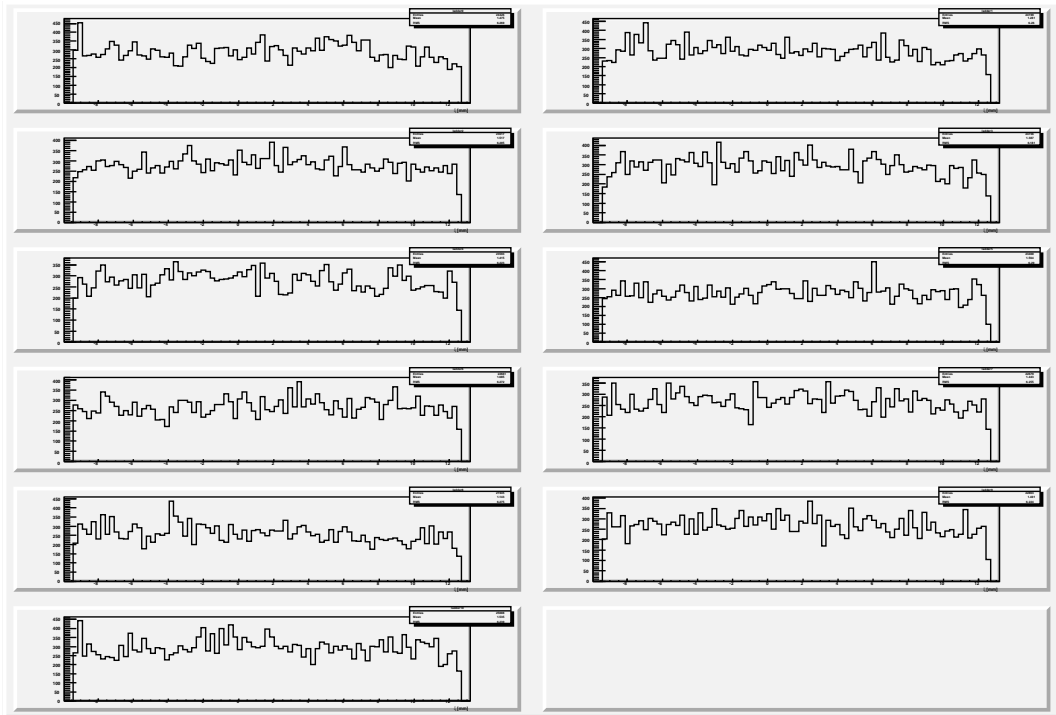


図 C.45: レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)

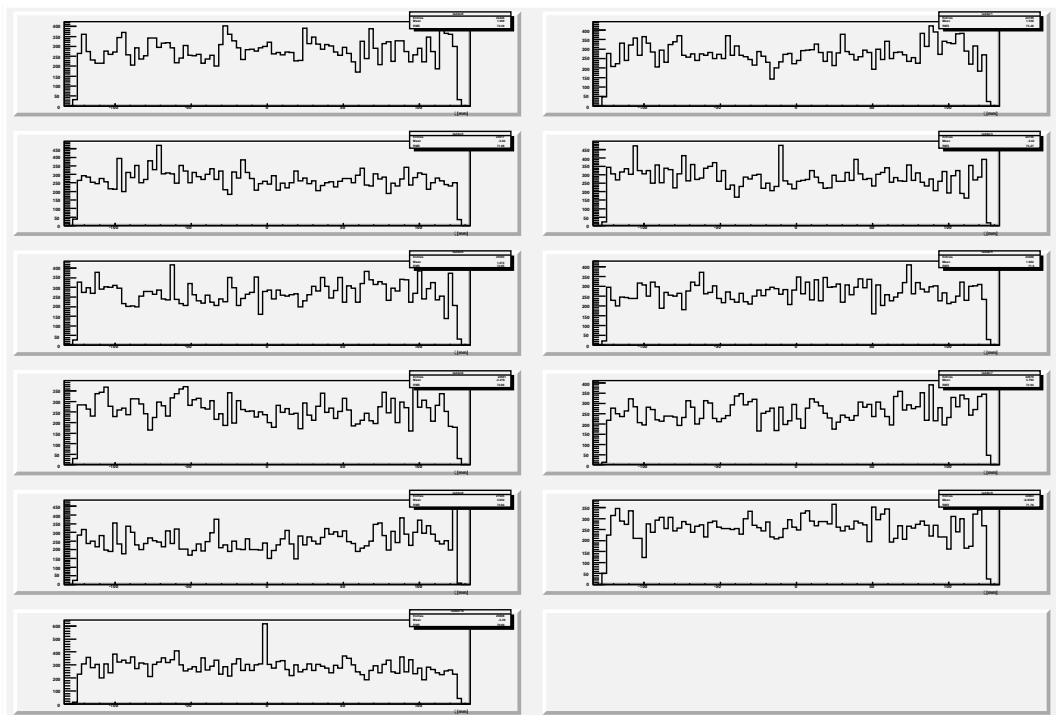


図 C.46: レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、直接ペア)

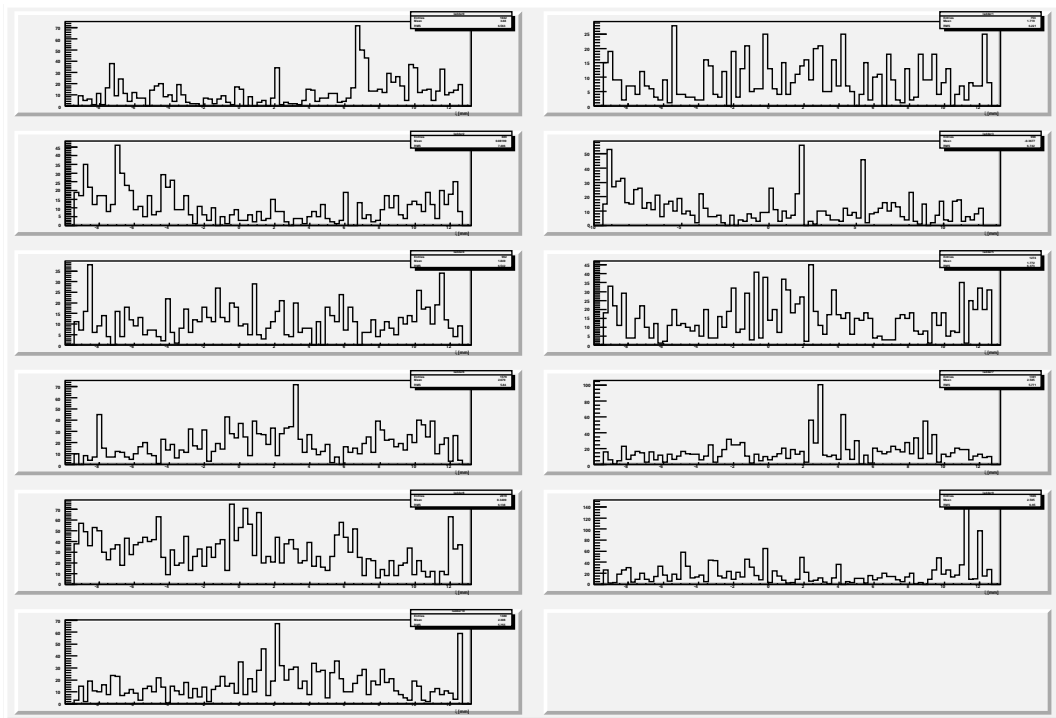


図 C.47: レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

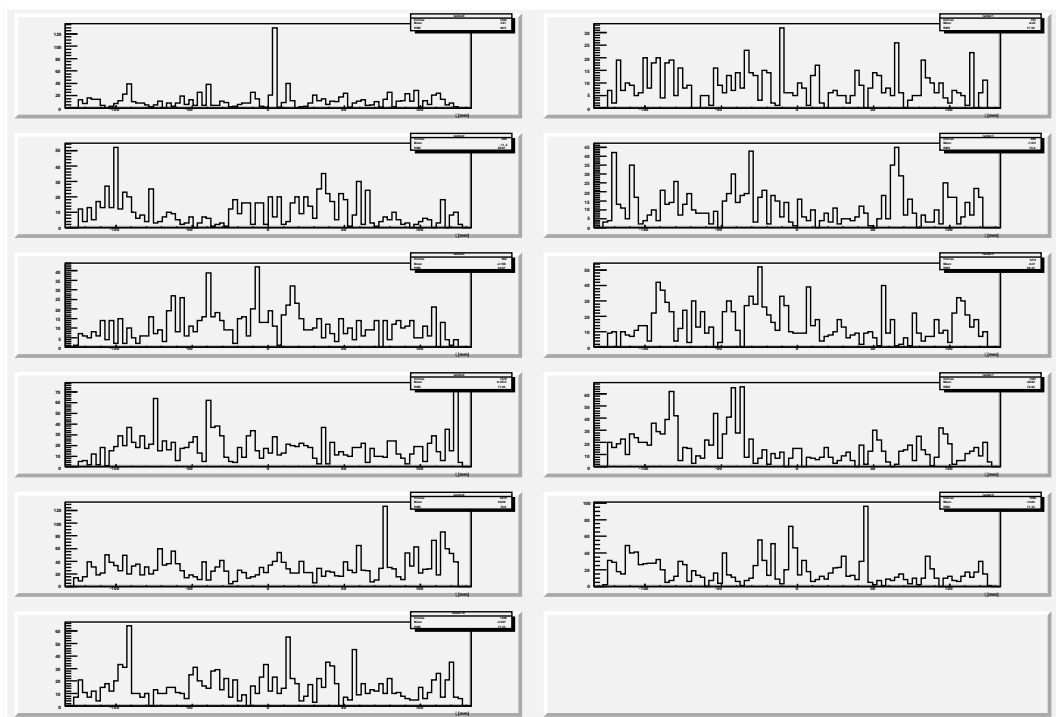


図 C.48: レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

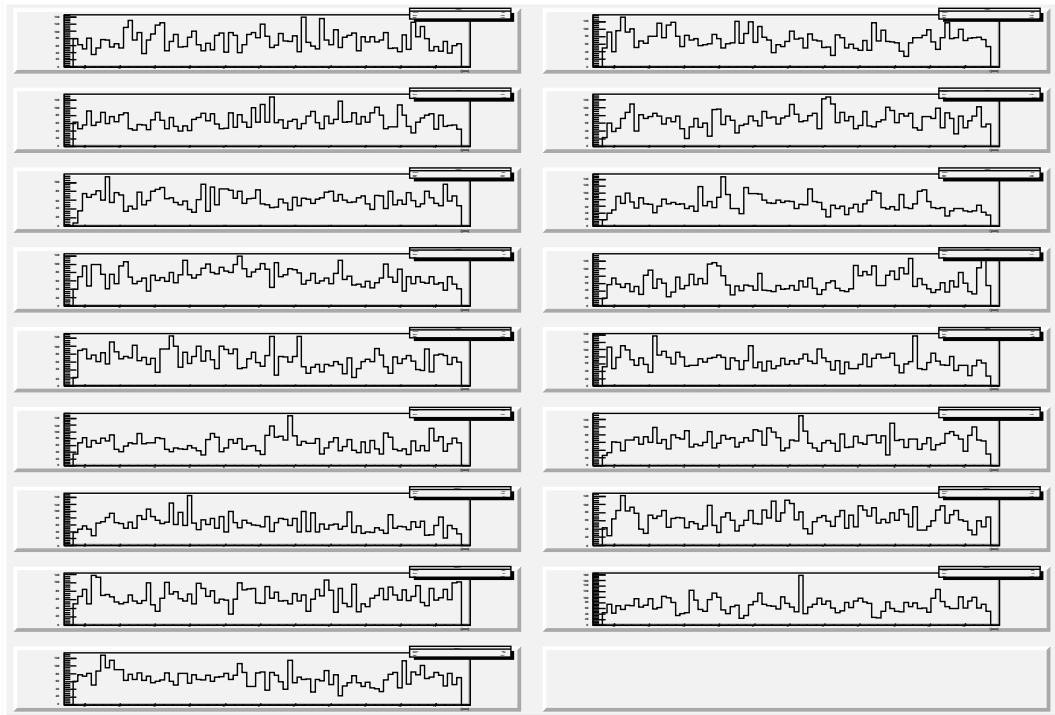


図 C.49: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV)

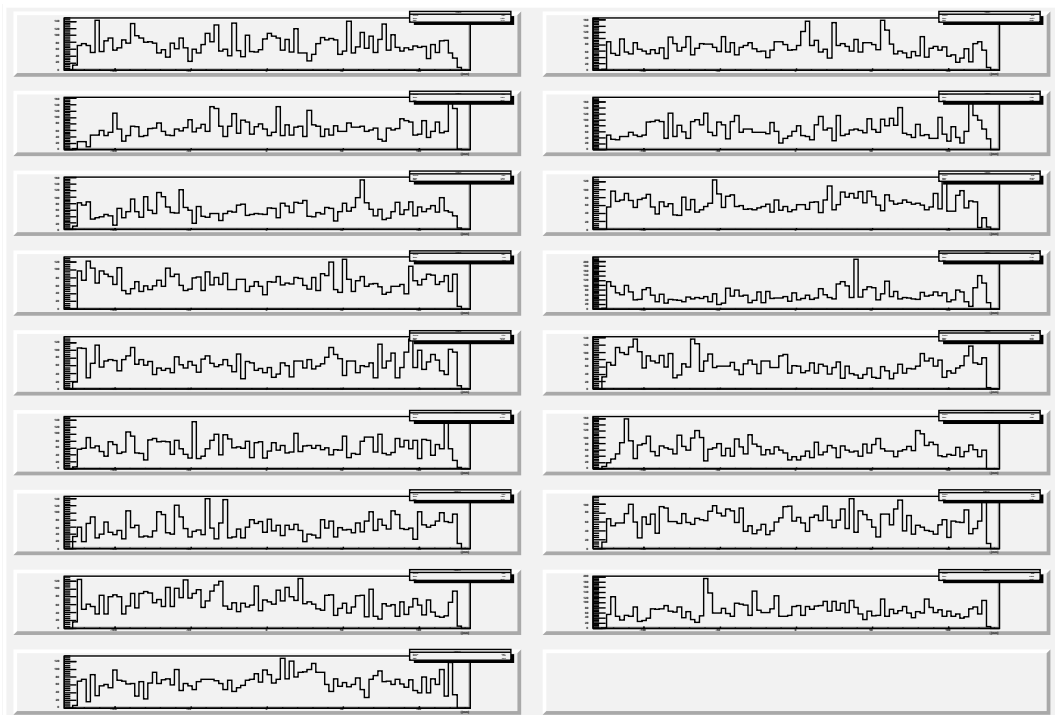


図 C.50: レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV)

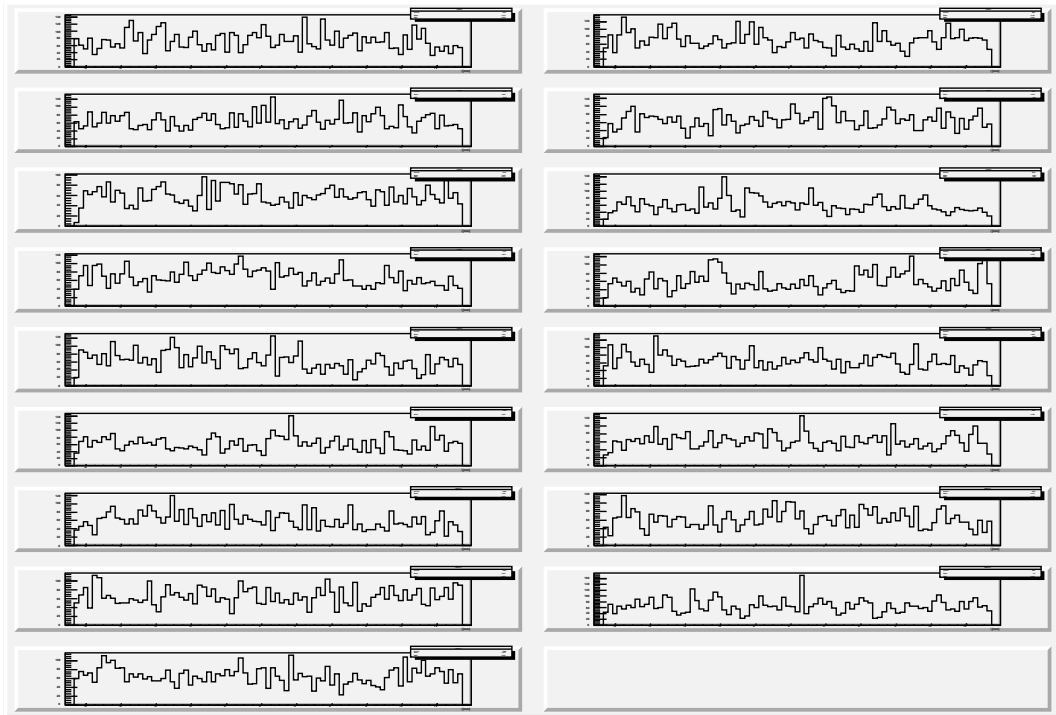


図 C.51: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)

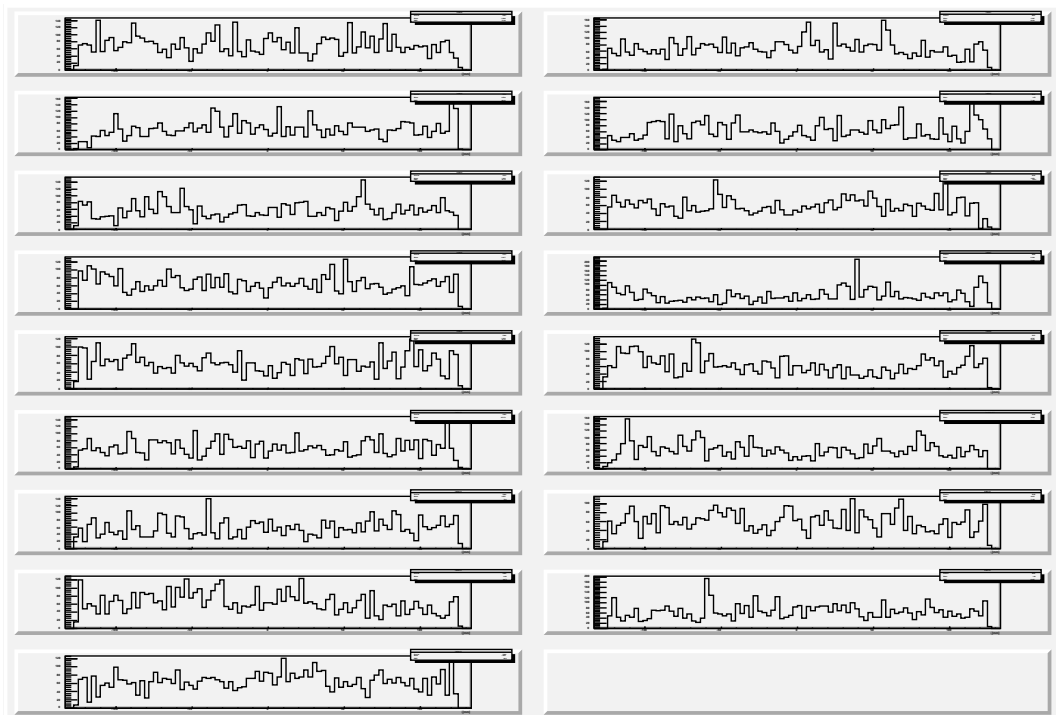


図 C.52: レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、直接ペア)

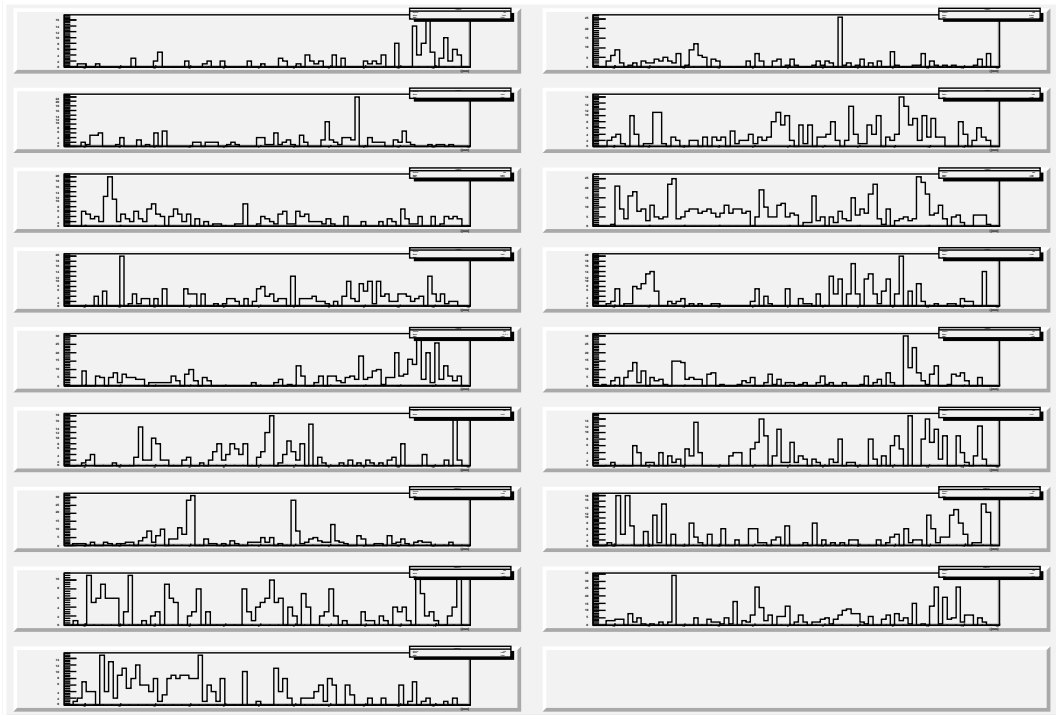


図 C.53: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

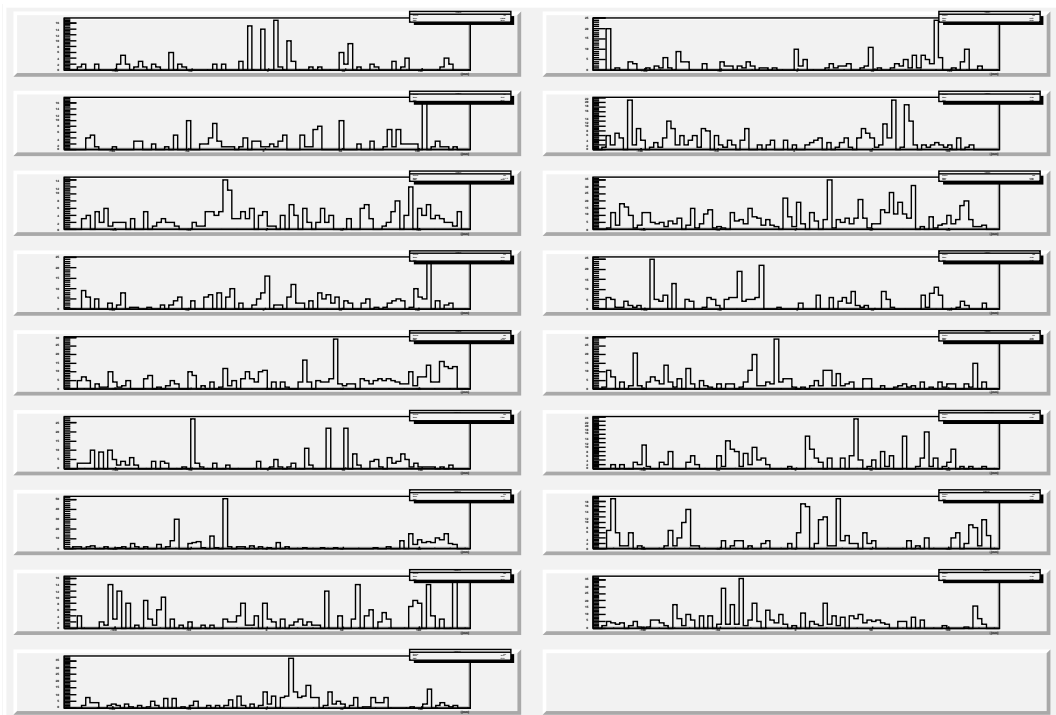


図 C.54: レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

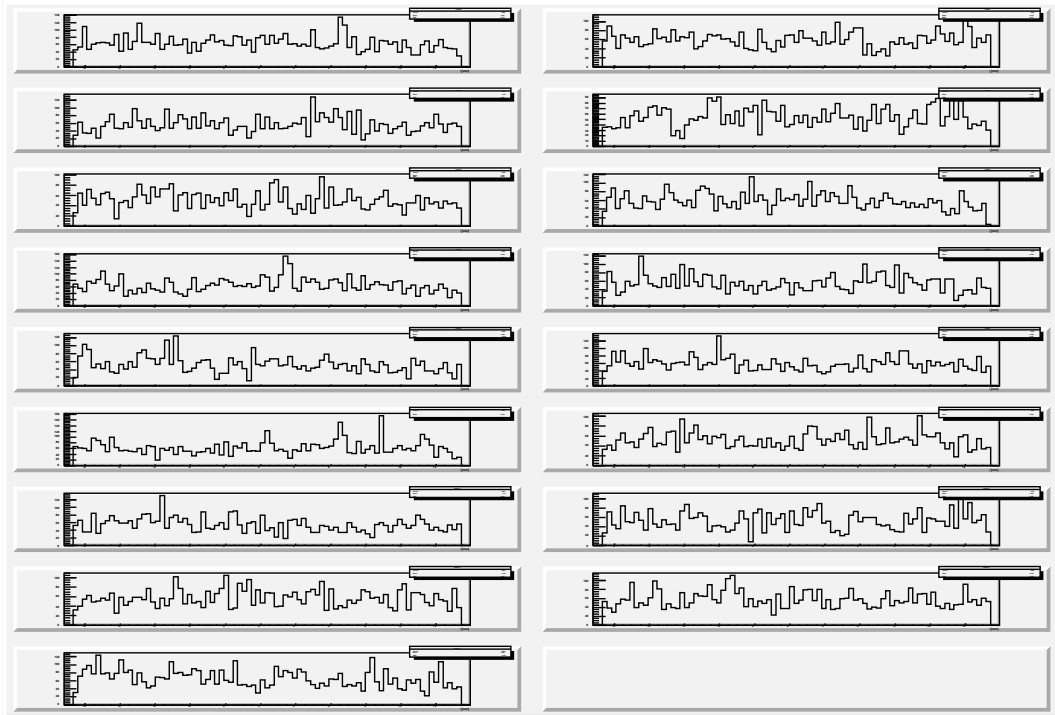


図 C.55: レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV)

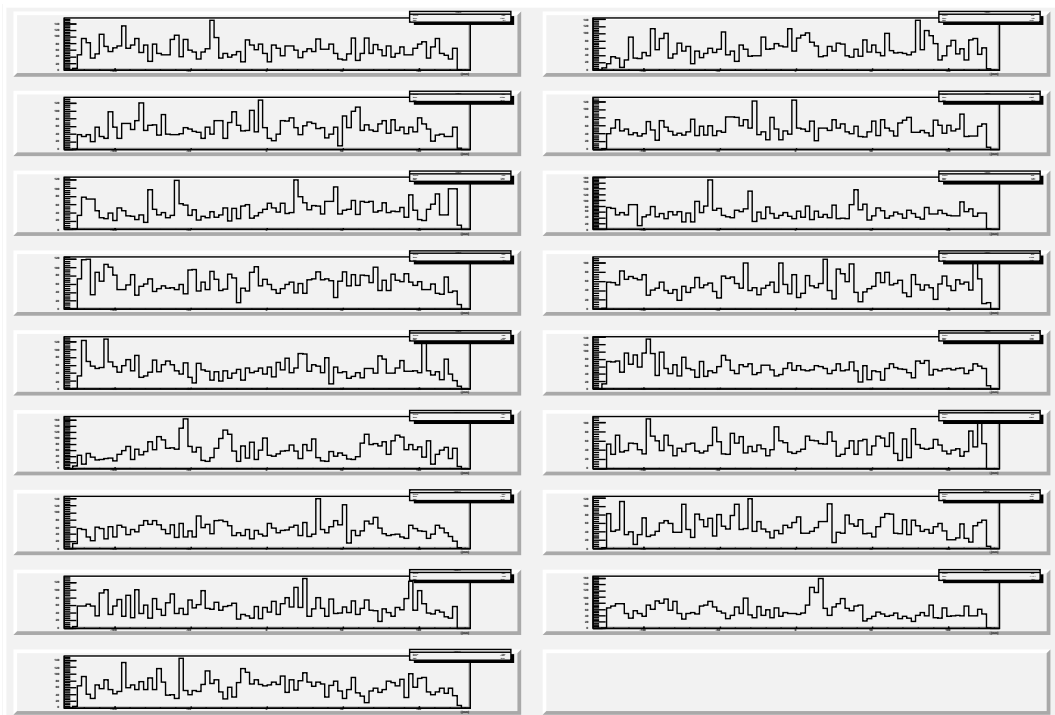


図 C.56: レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV)

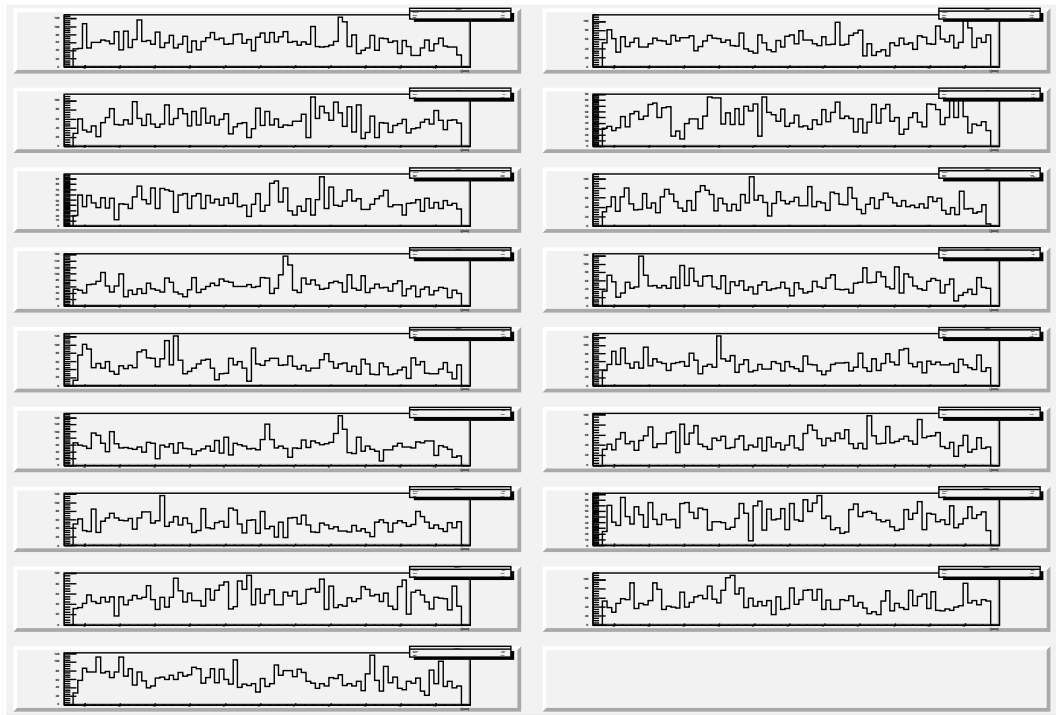


図 C.57: レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、直接ペア)

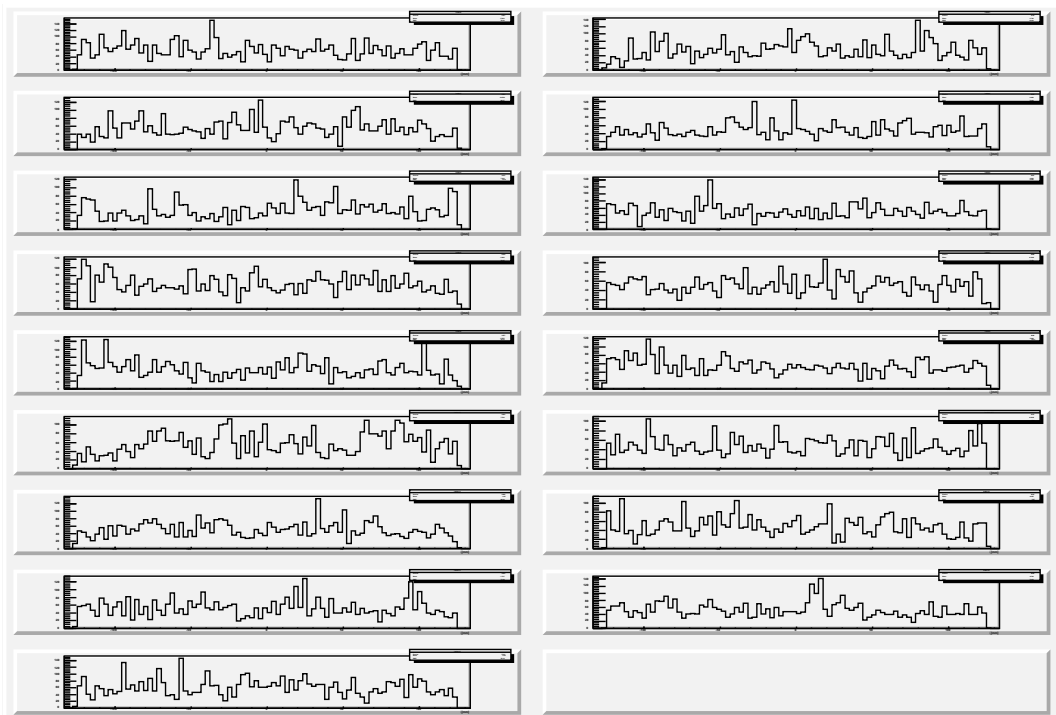


図 C.58: レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、直接ペア)

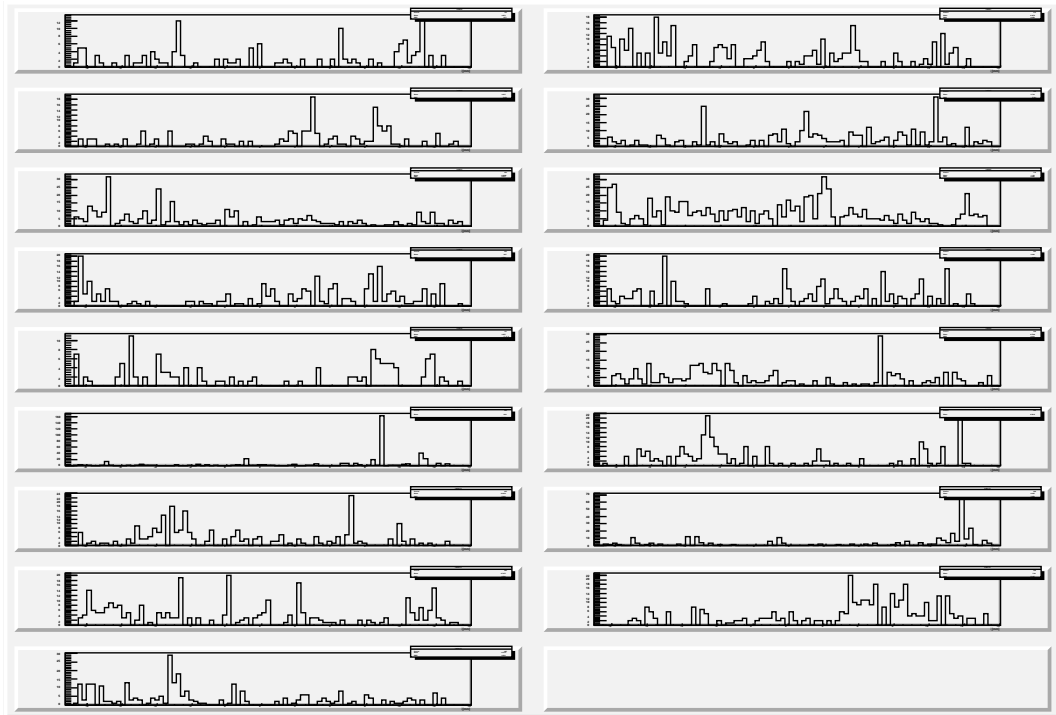


図 C.59: レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

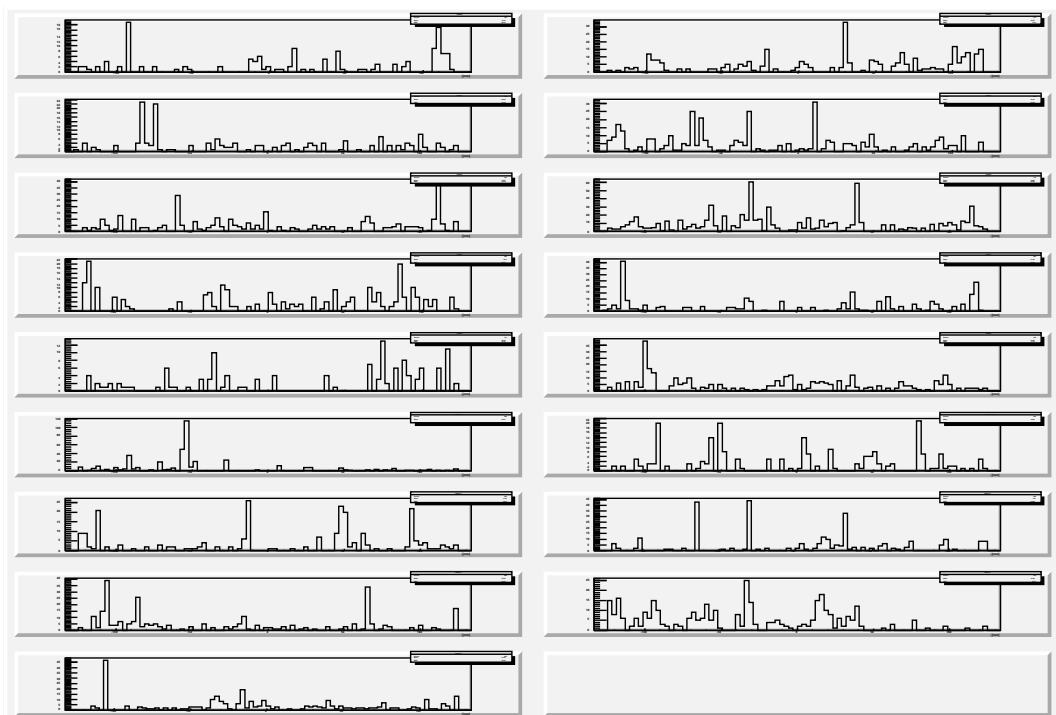


図 C.60: レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (250 GeV、反跳ペア)

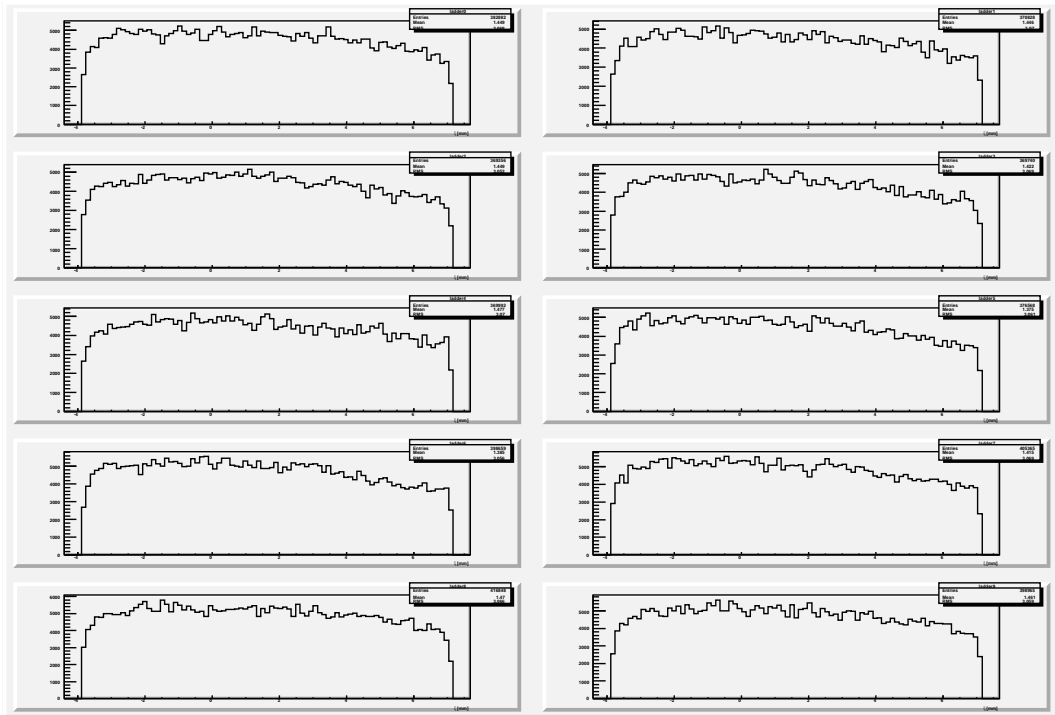


図 C.61: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV)

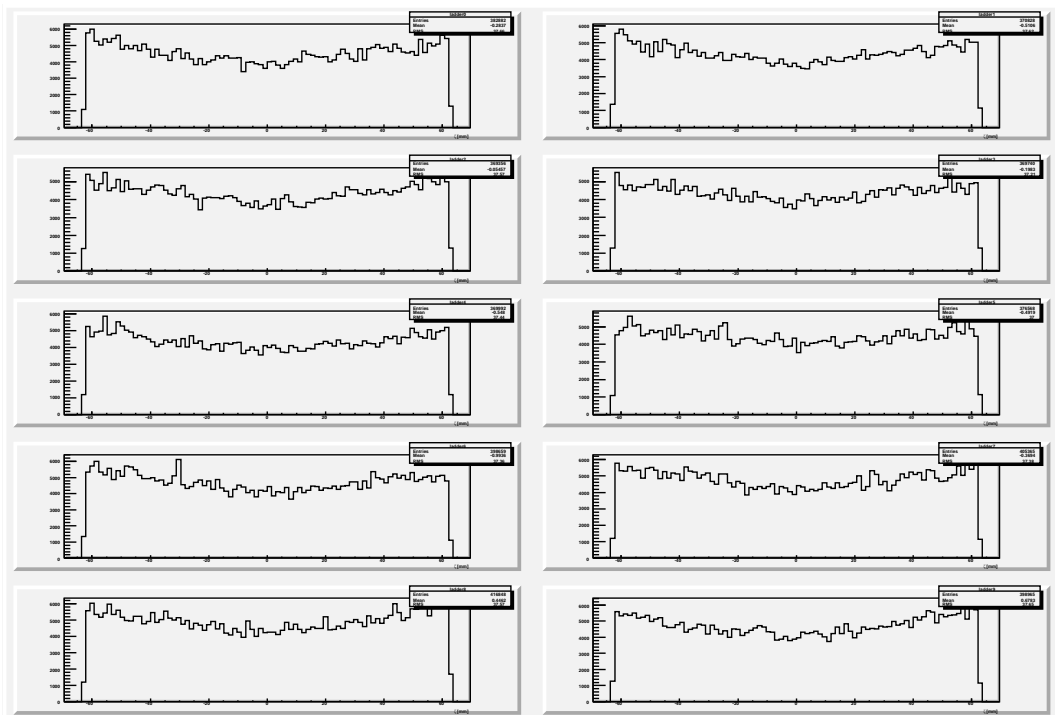


図 C.62: レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV)

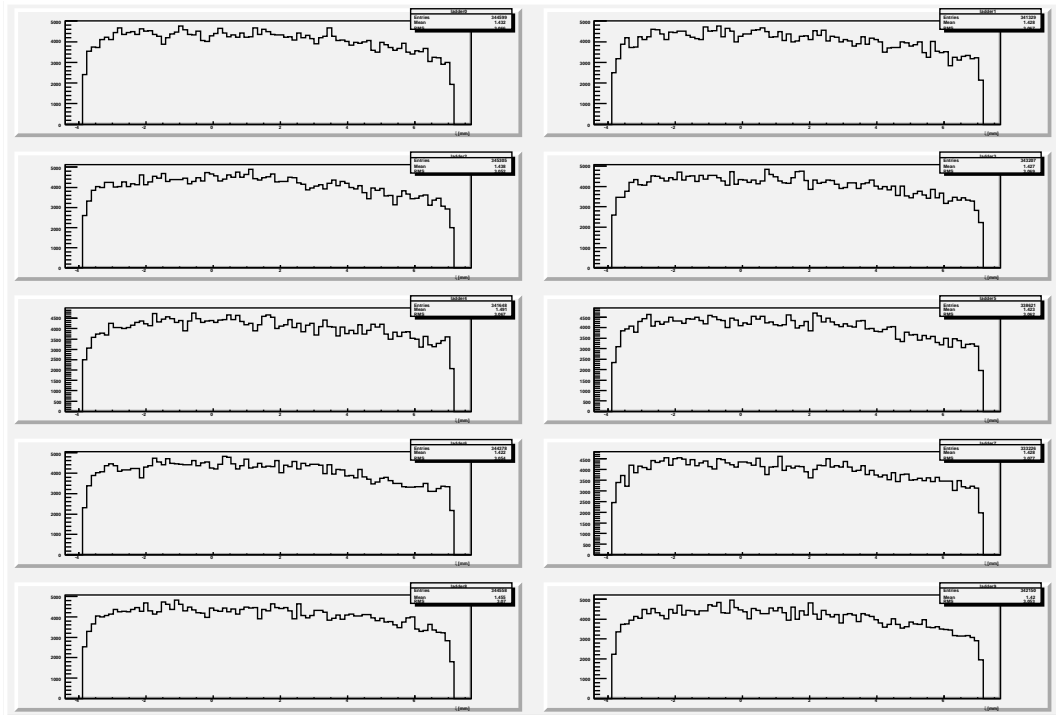


図 C.63: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)

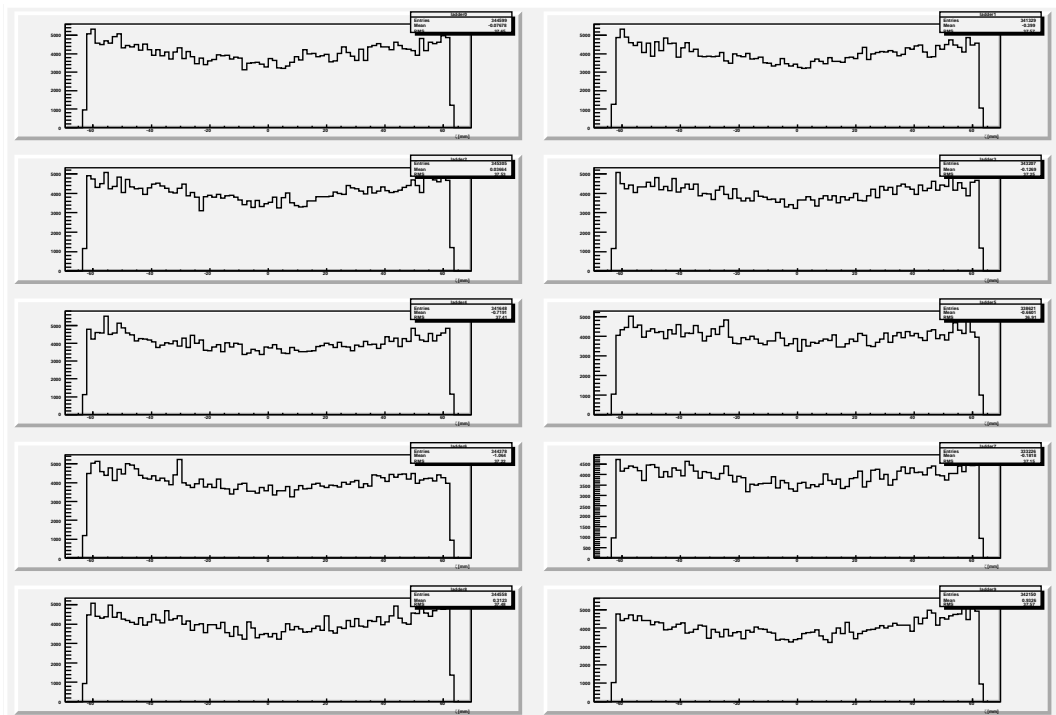


図 C.64: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)

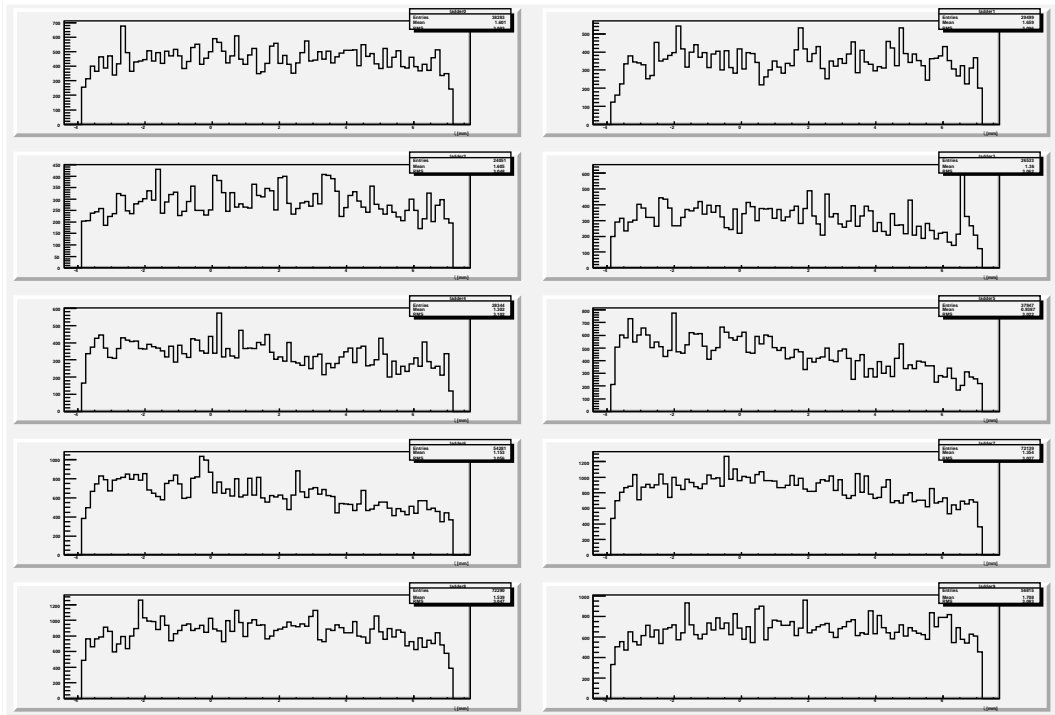


図 C.65: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

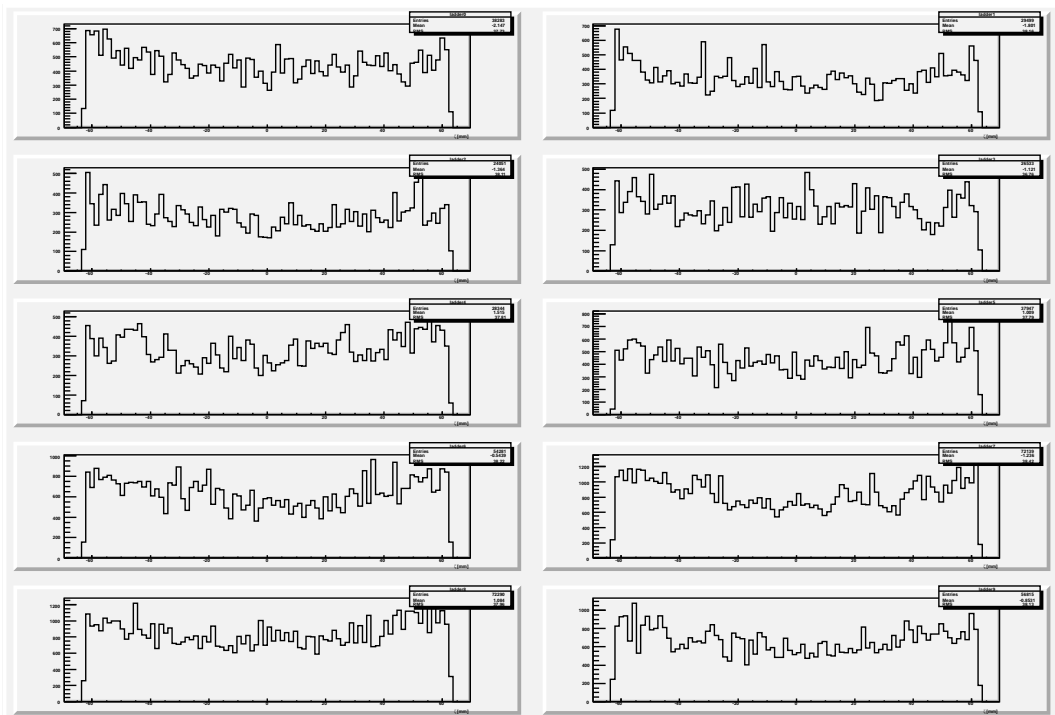


図 C.66: レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

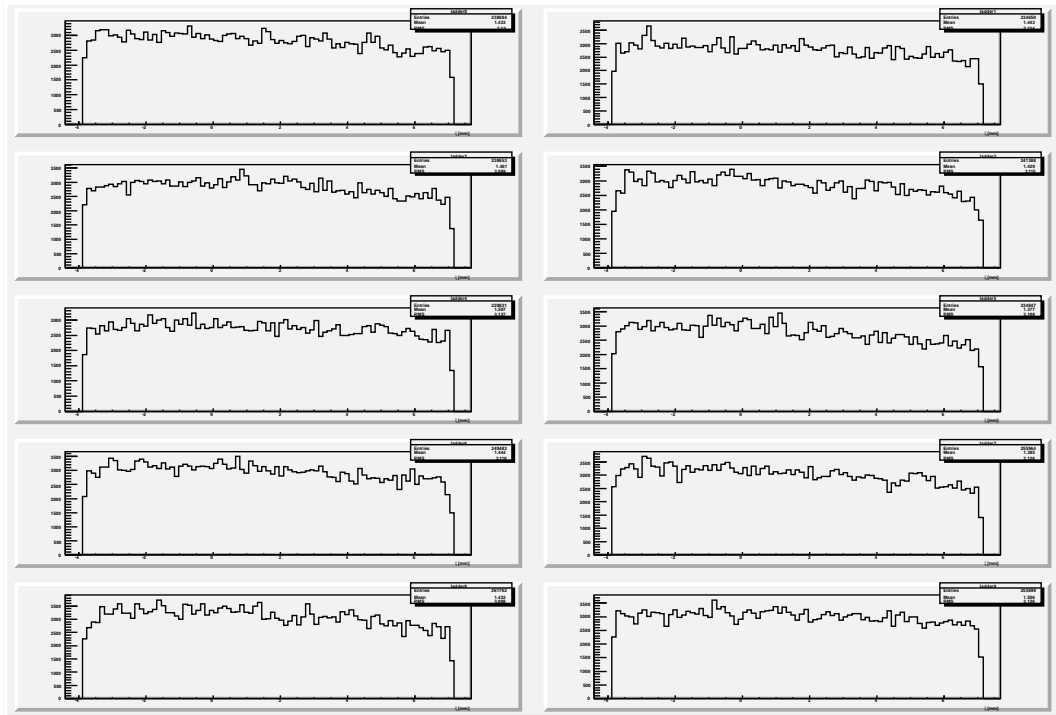


図 C.67: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV)

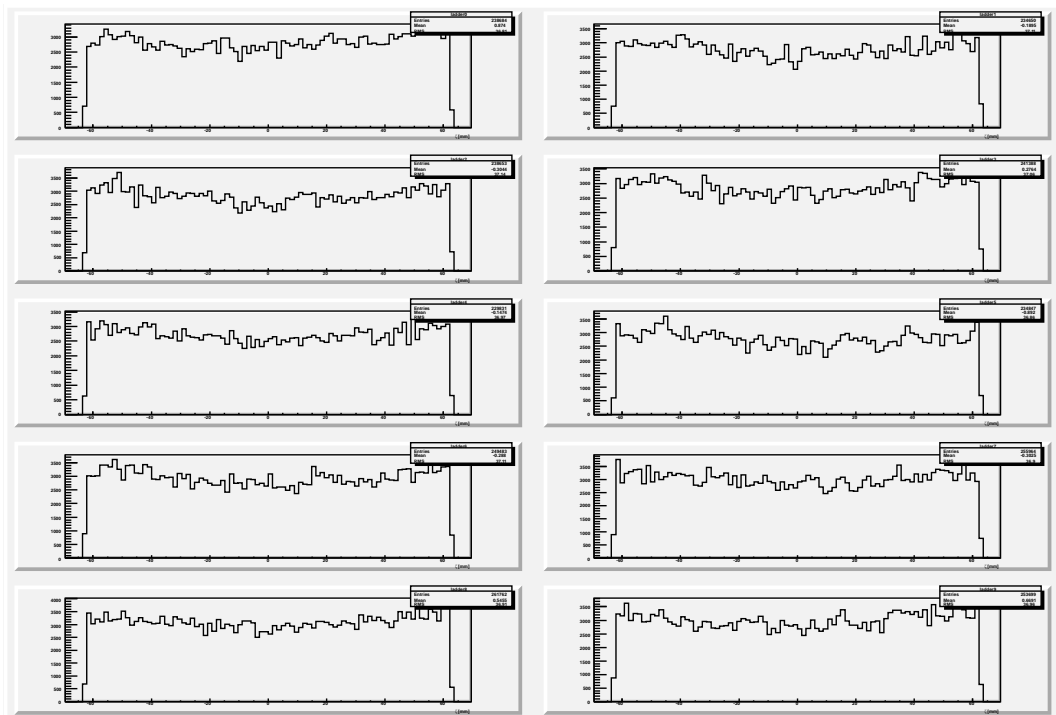


図 C.68: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV)

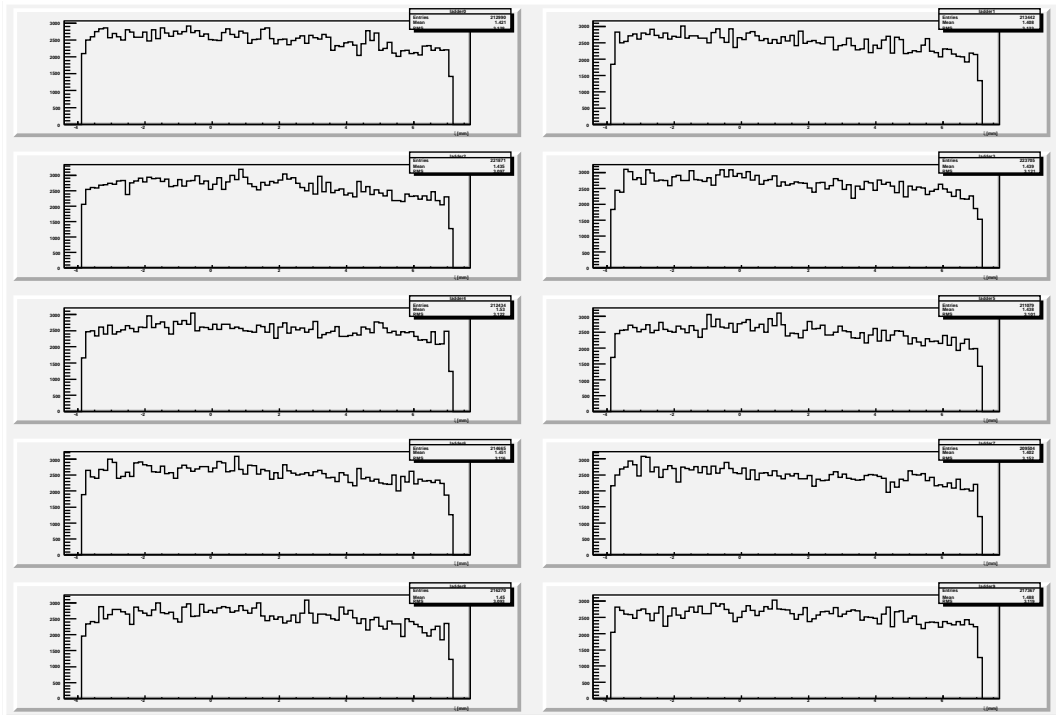


図 C.69: レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)

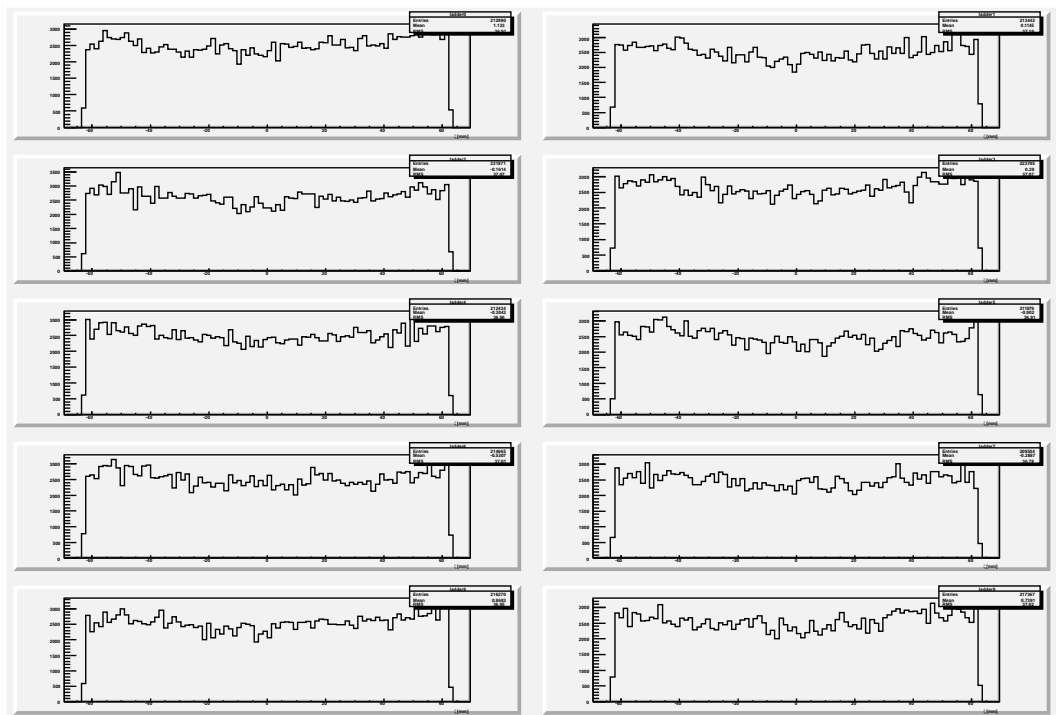


図 C.70: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、直接ペア)

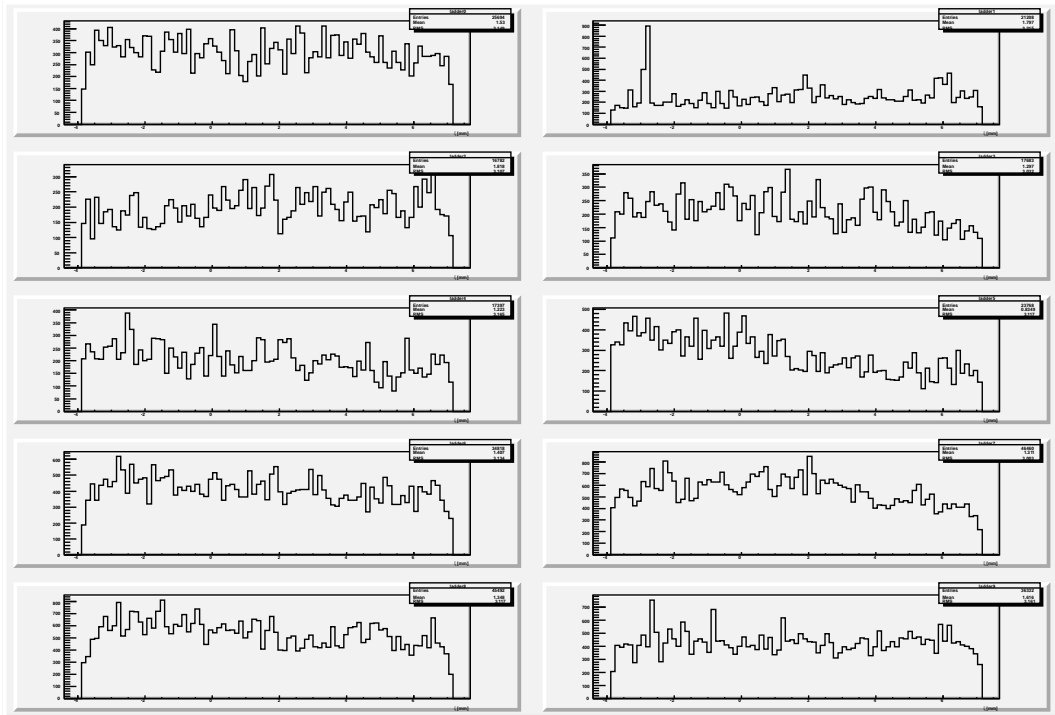


図 C.71: レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

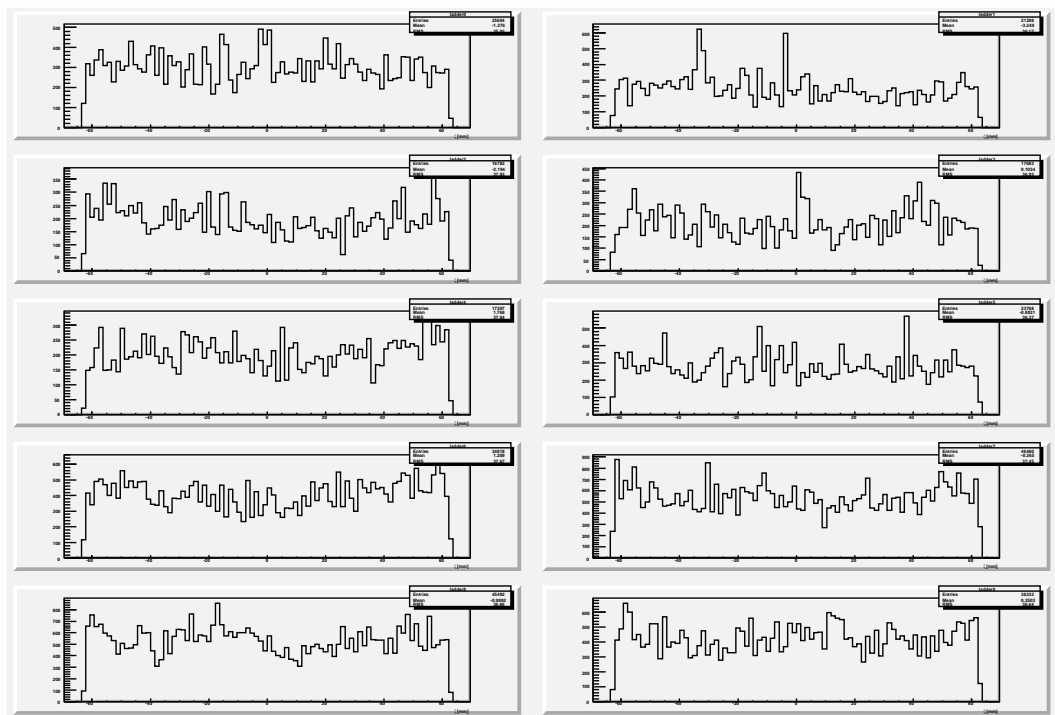


図 C.72: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

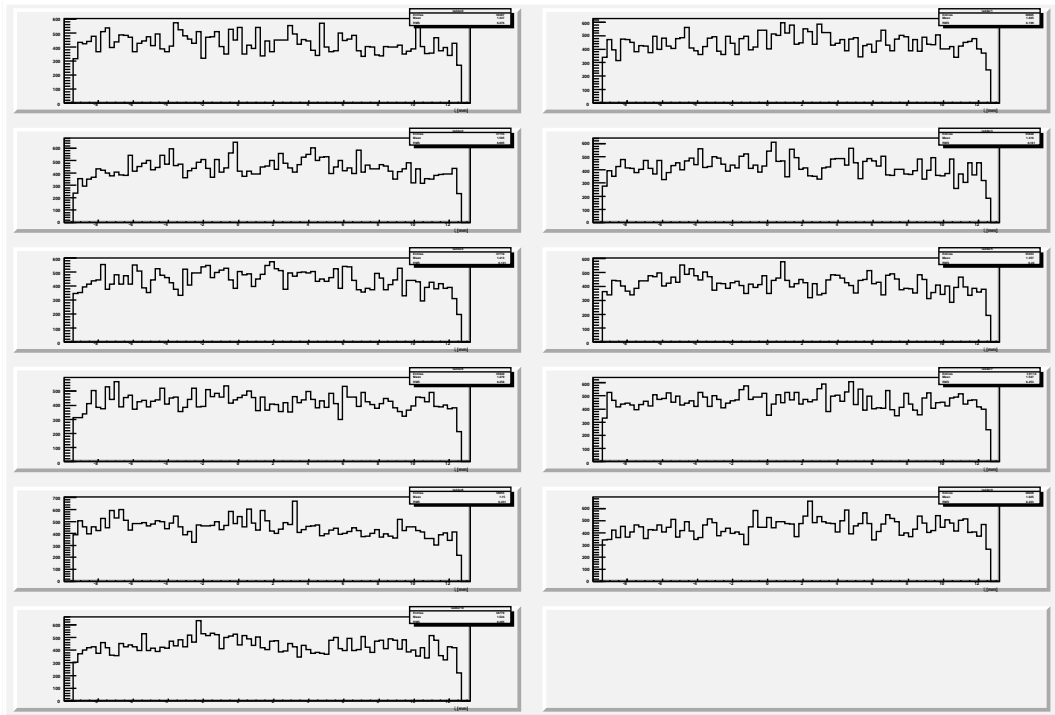


図 C.73: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV)

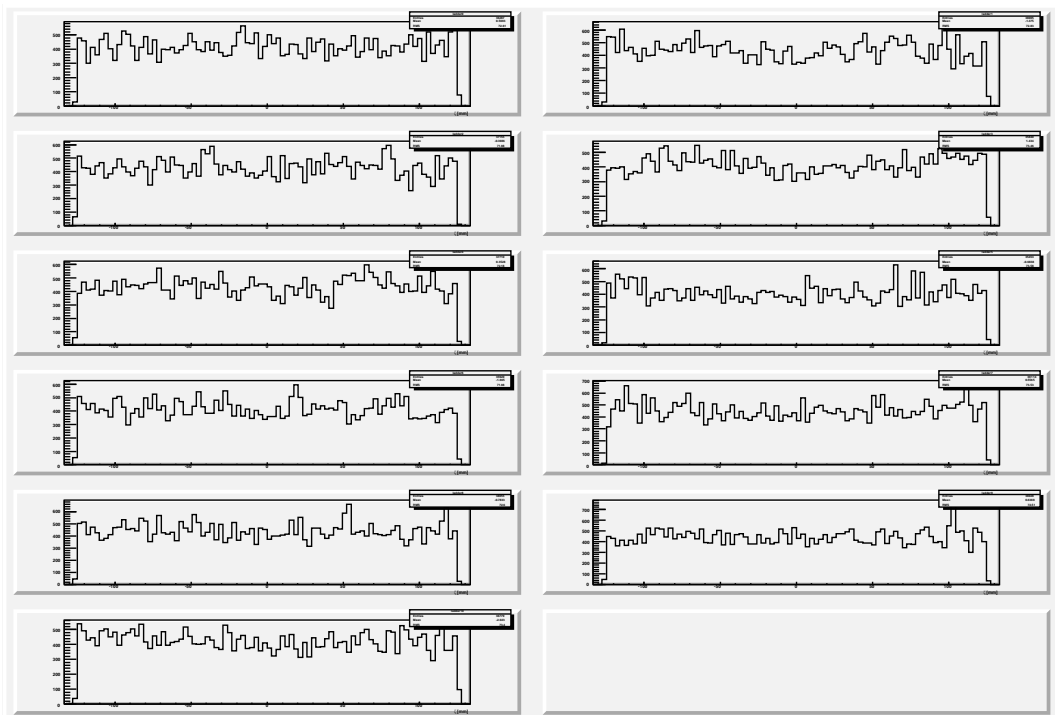


図 C.74: レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV)

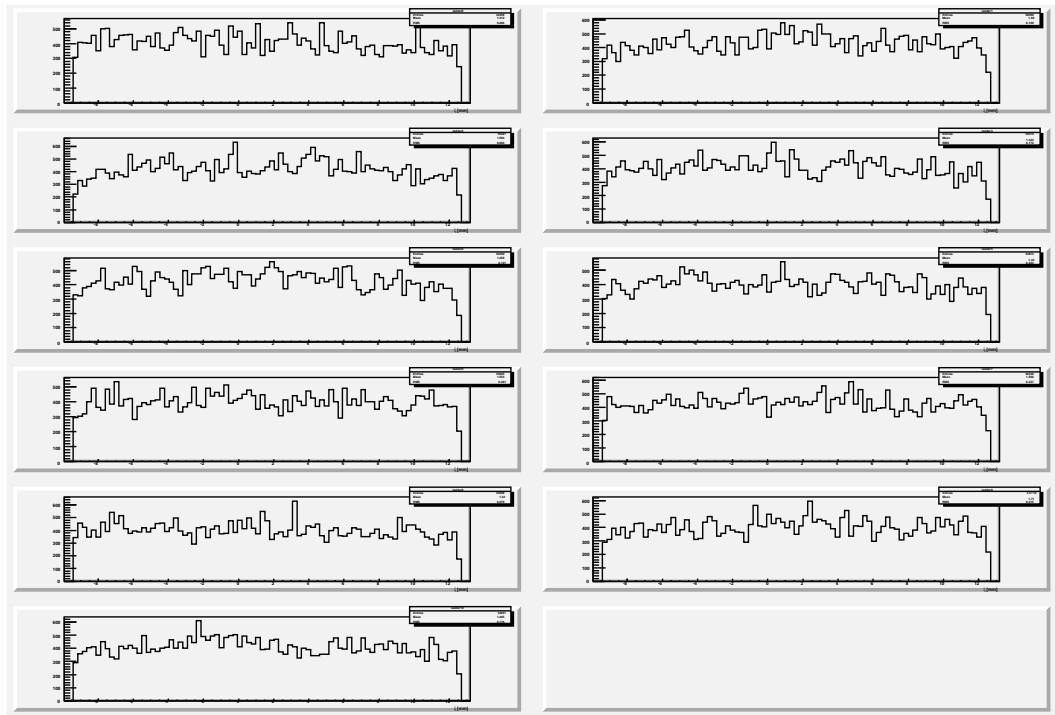


図 C.75: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)

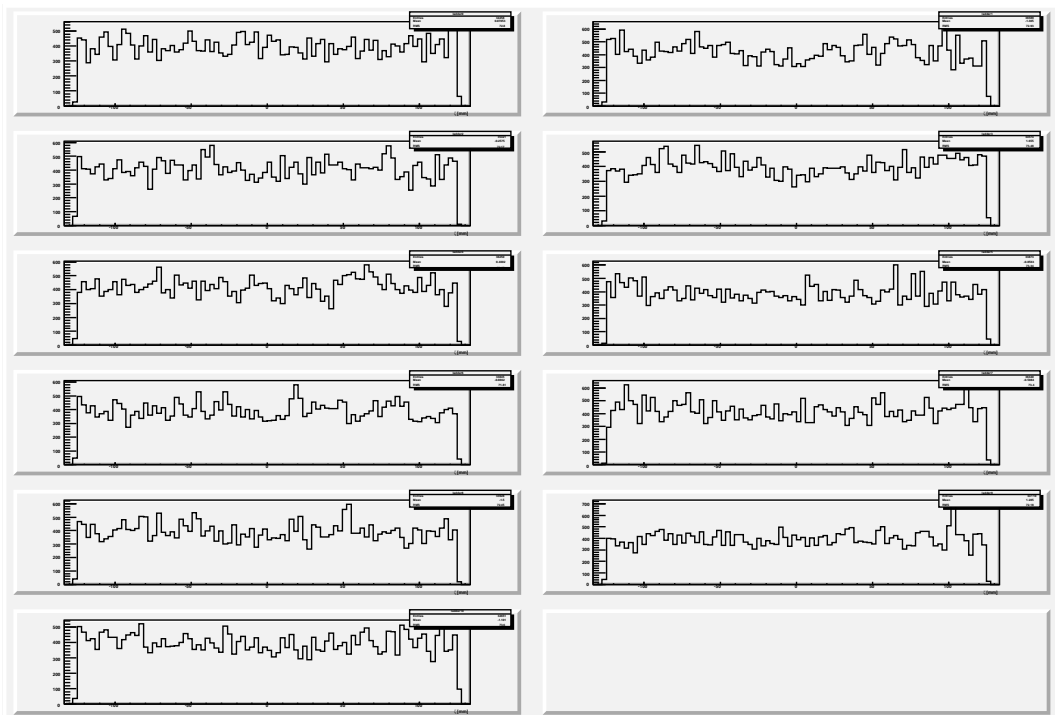


図 C.76: レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、直接ペア)

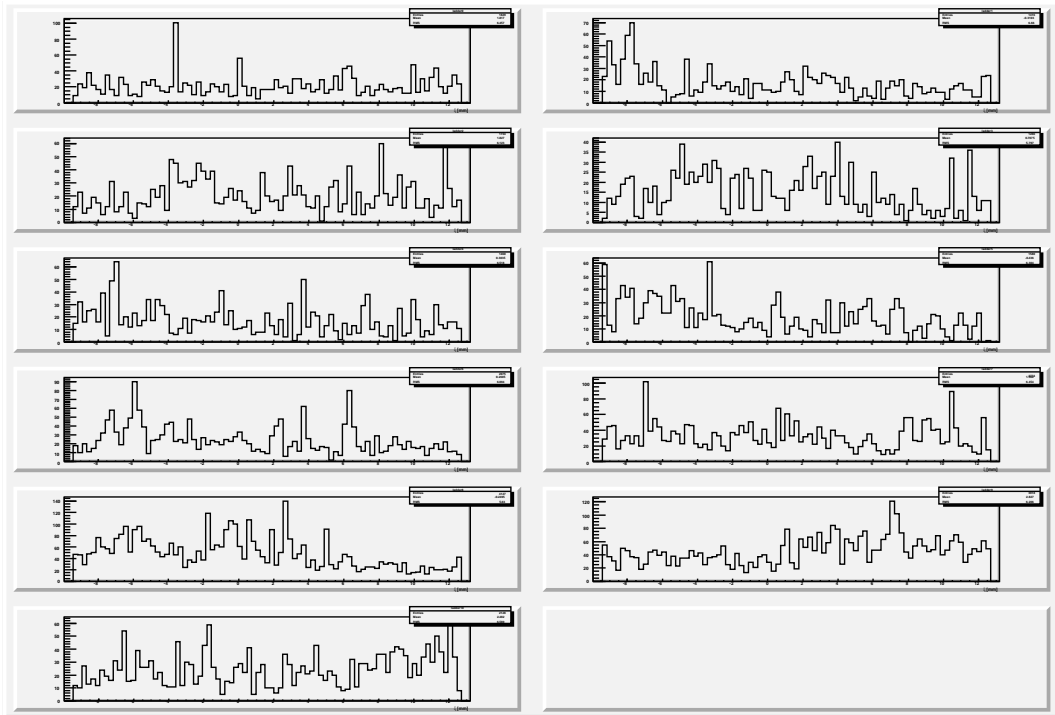


図 C.77: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

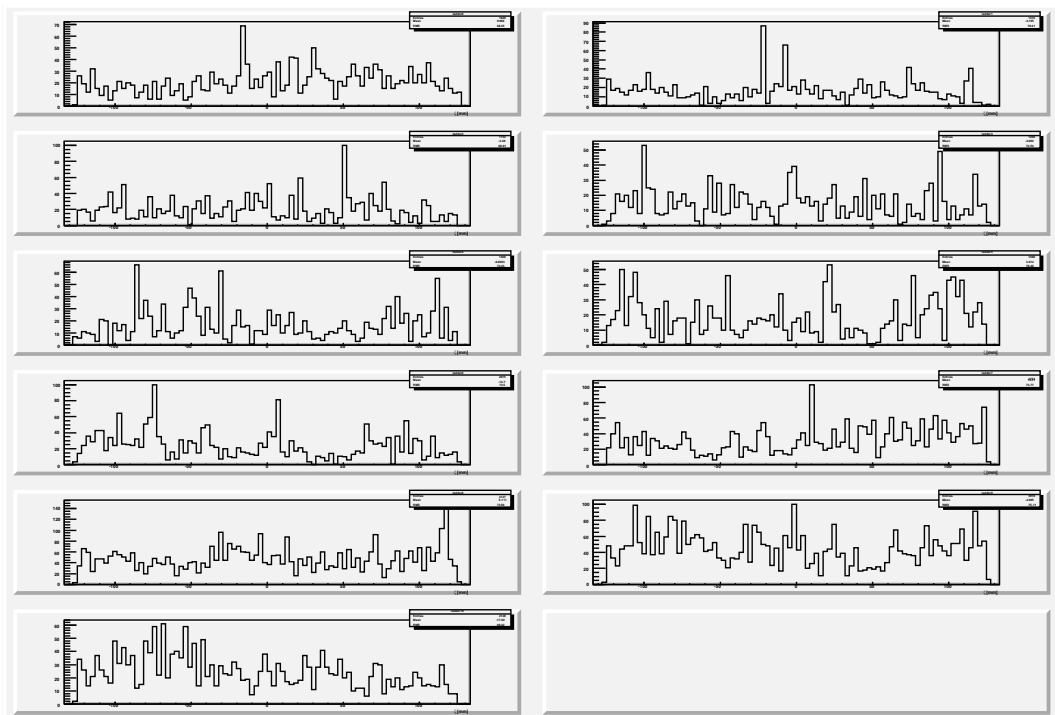


図 C.78: レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

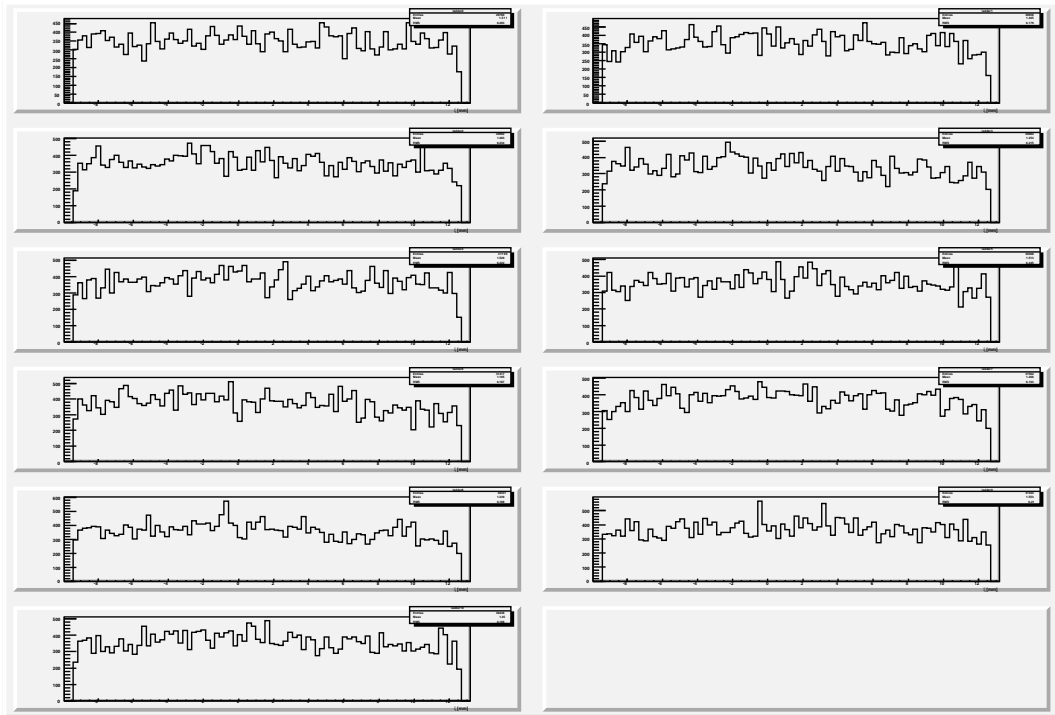


図 C.79: レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV)

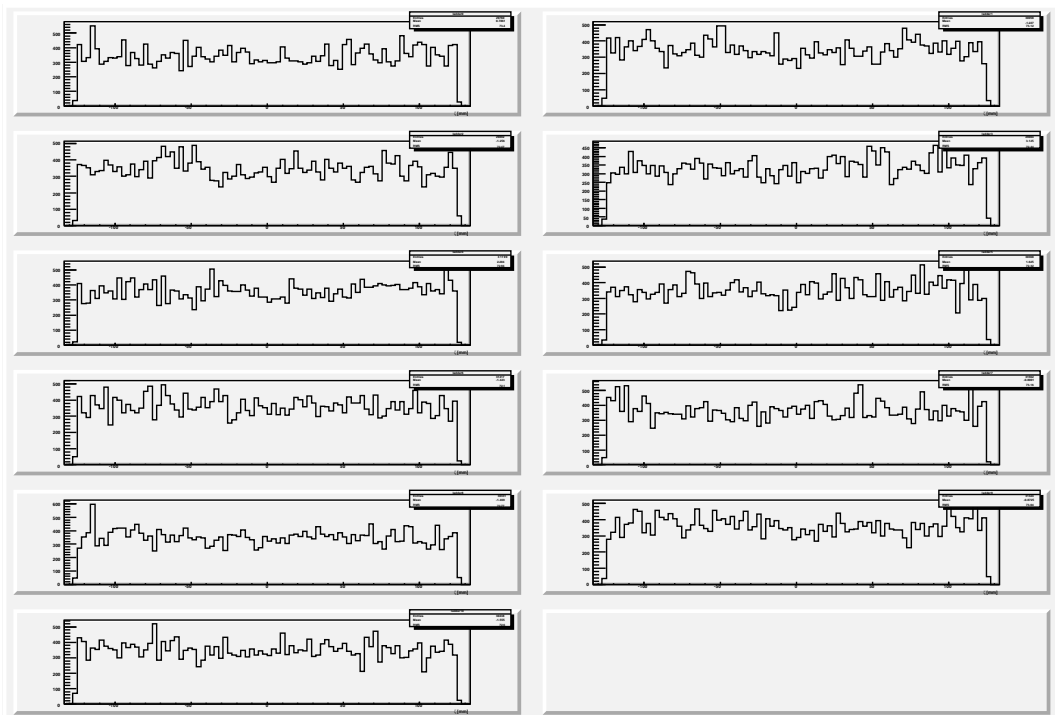


図 C.80: レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV)

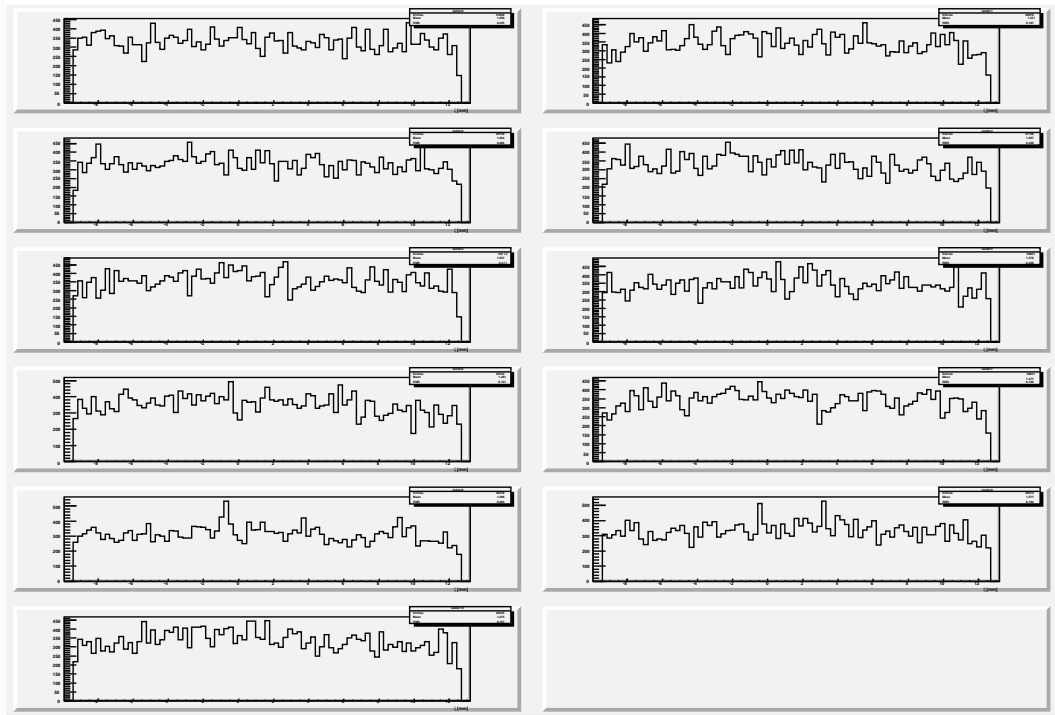


図 C.81: レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)

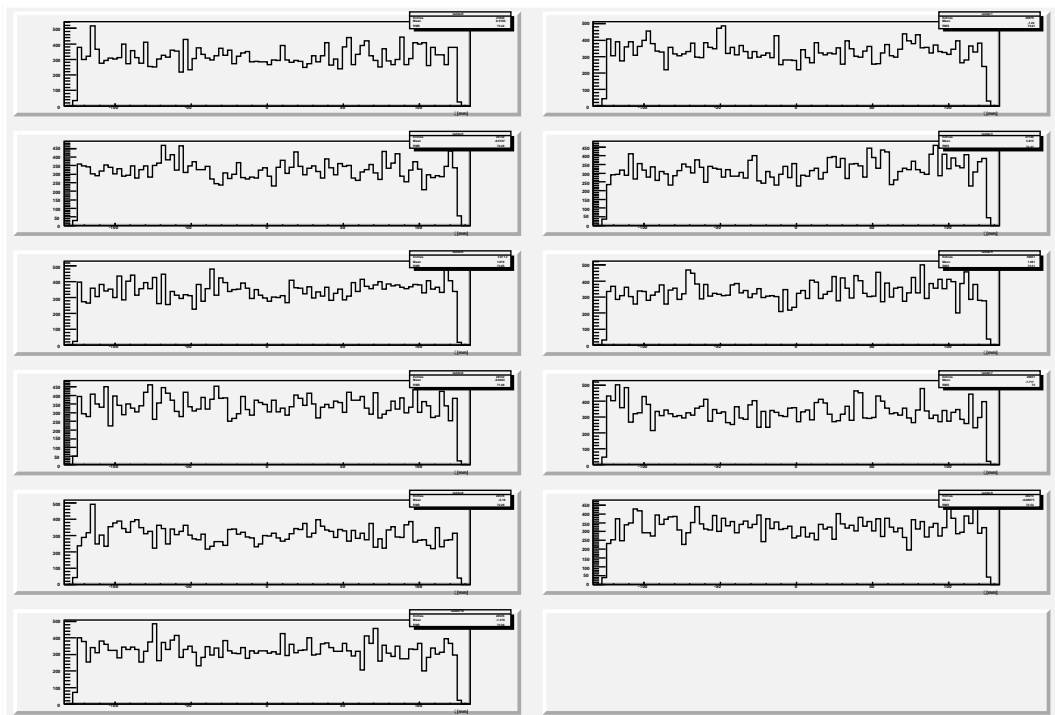


図 C.82: レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、直接ペア)

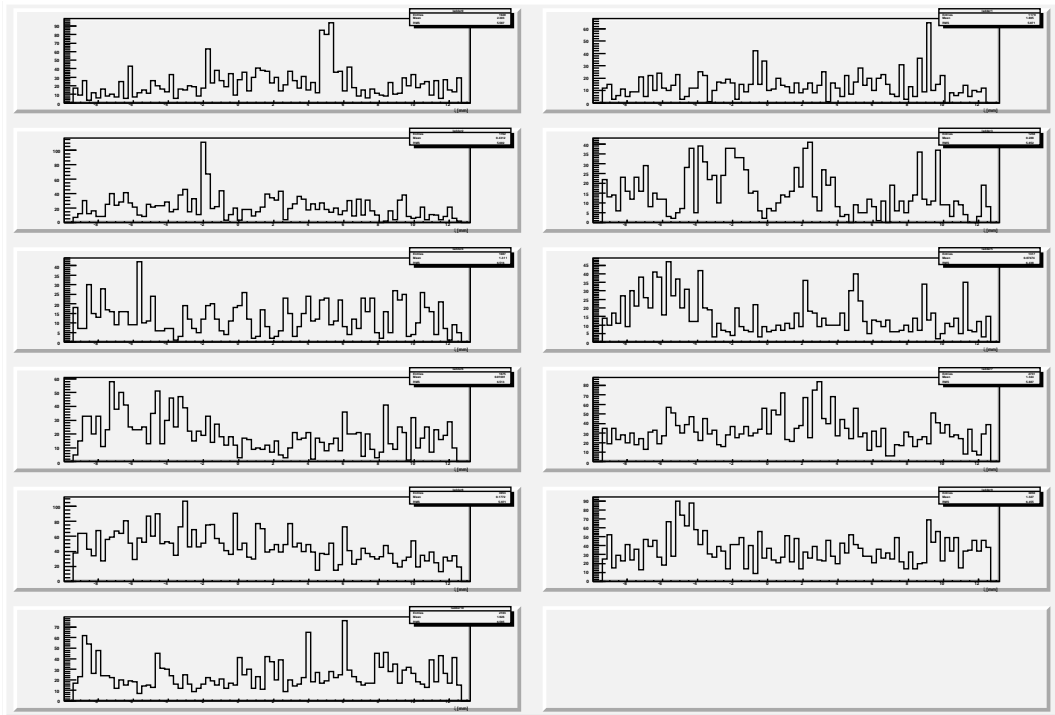


図 C.83: レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

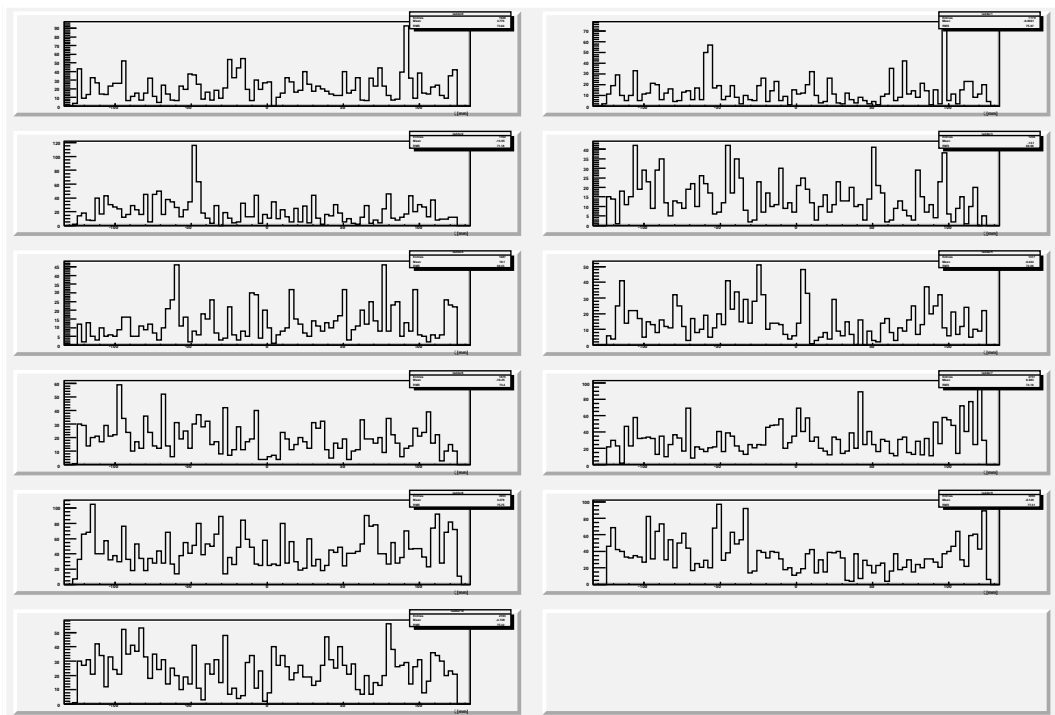


図 C.84: レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

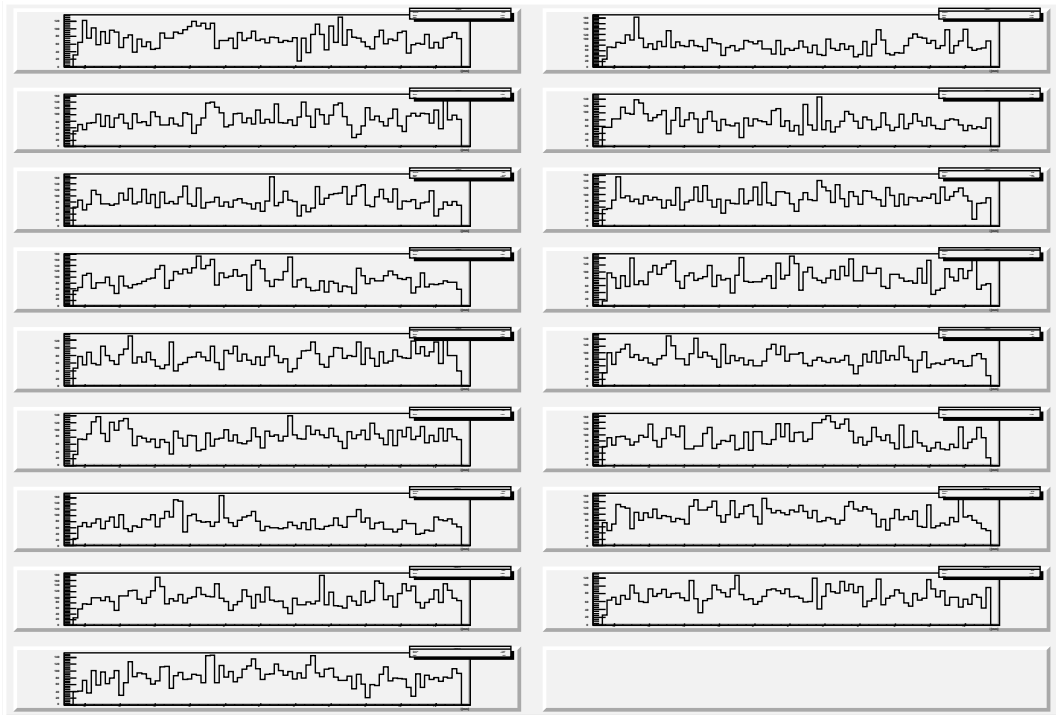


図 C.85: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV)

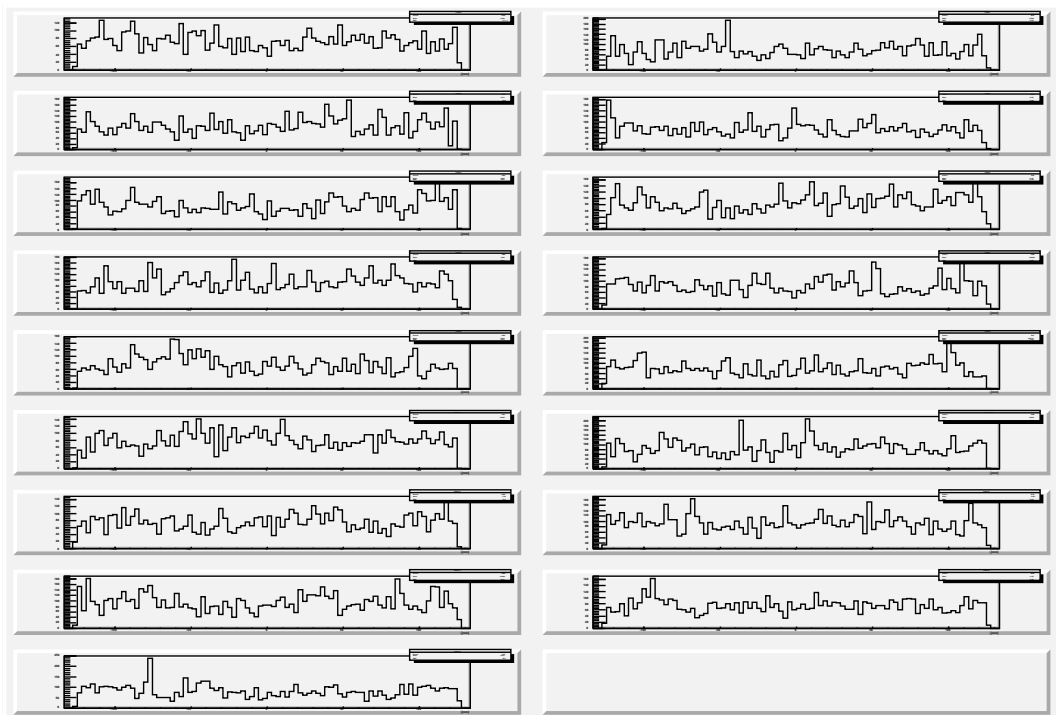


図 C.86: レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV)

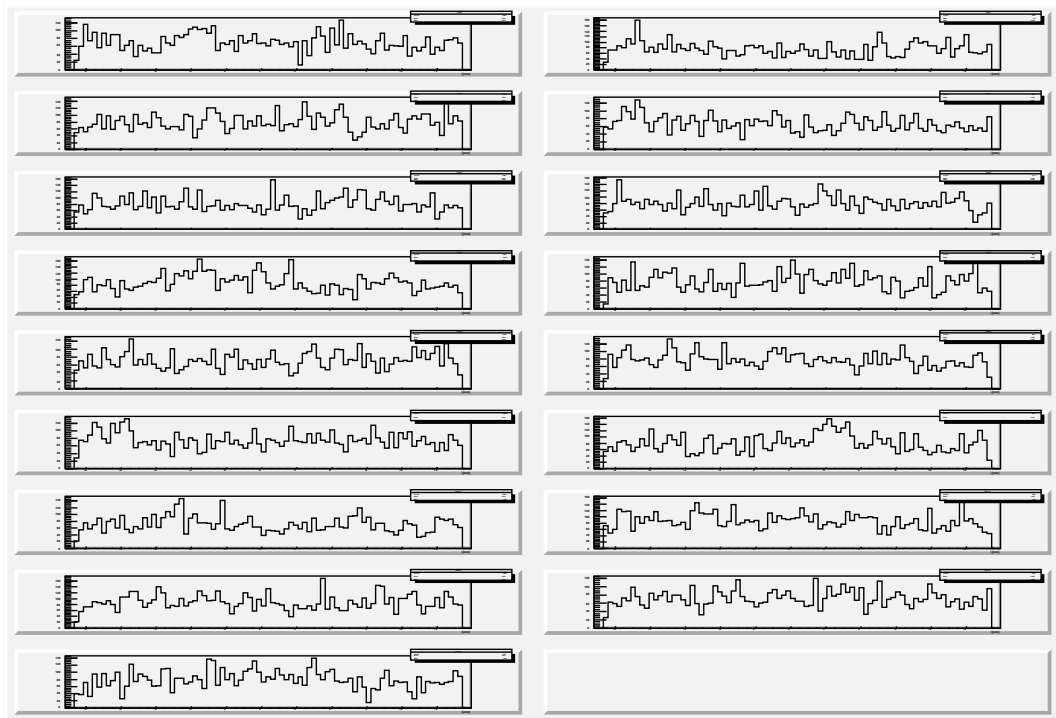


図 C.87: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)

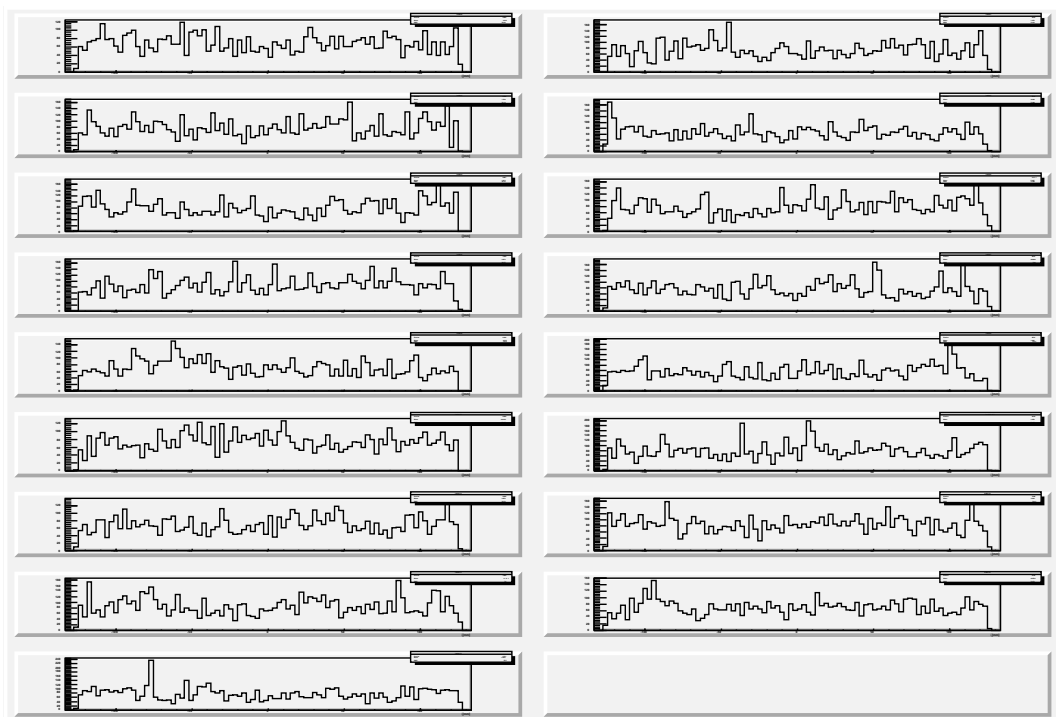


図 C.88: レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、直接ペア)

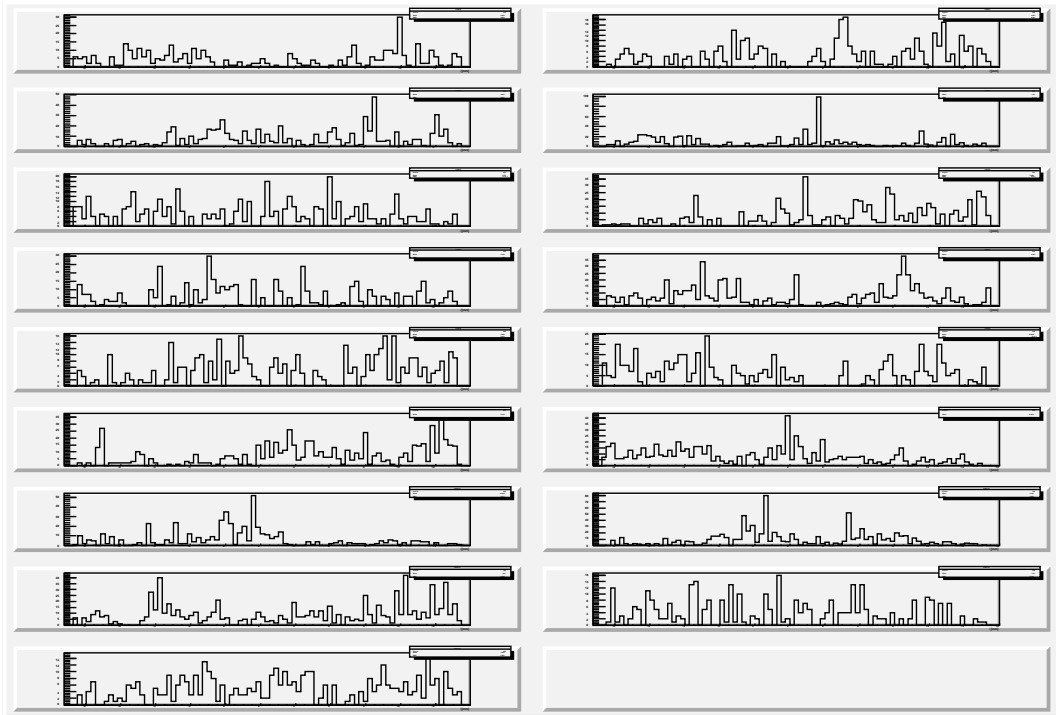


図 C.89: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

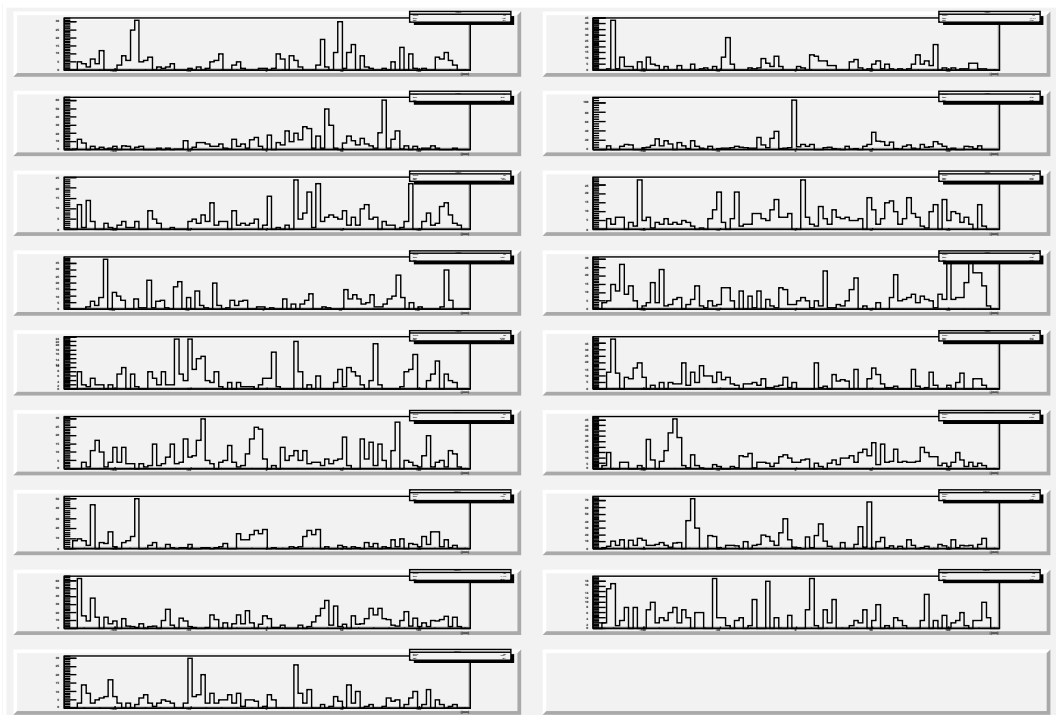


図 C.90: レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

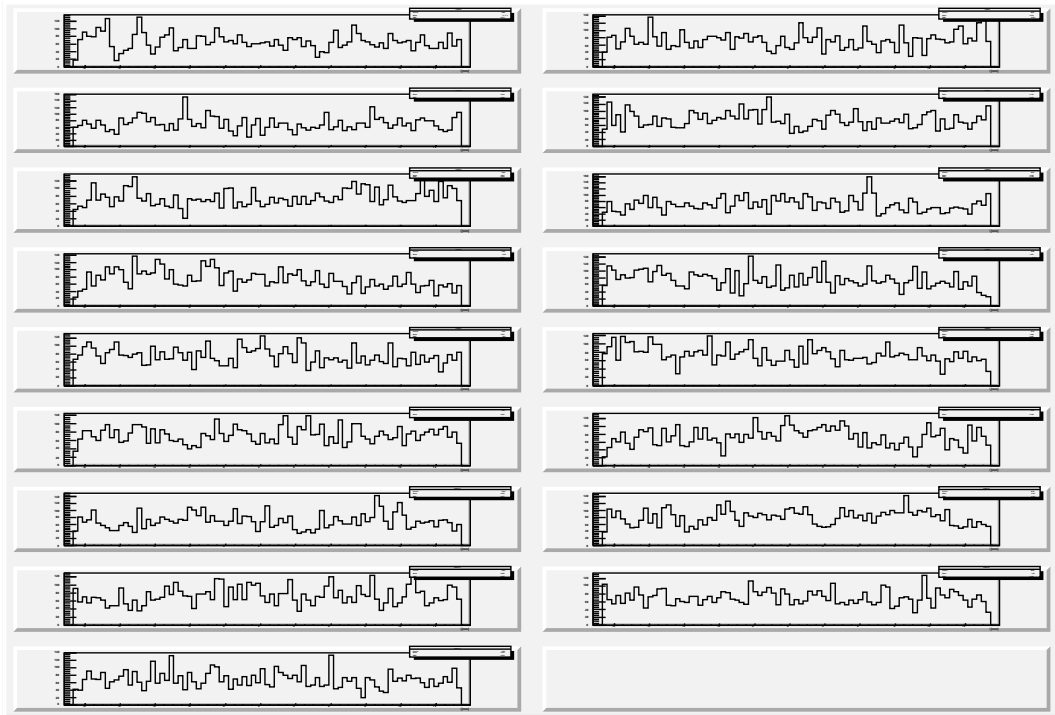


図 C.91: レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV)

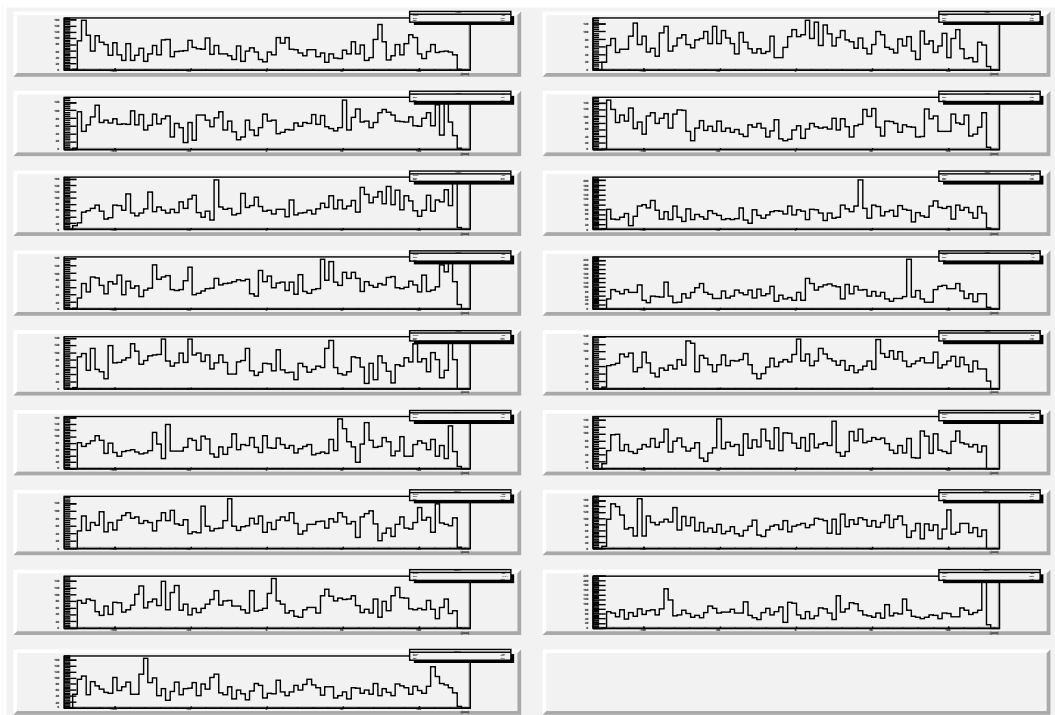


図 C.92: レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV)

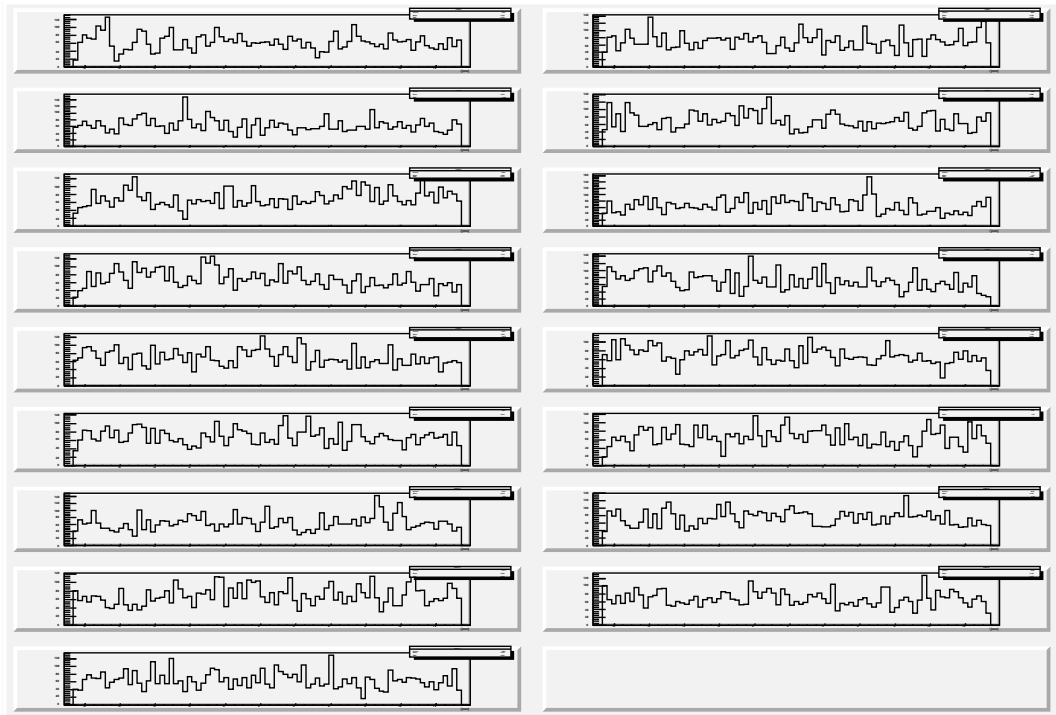


図 C.93: レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、直接ペア)

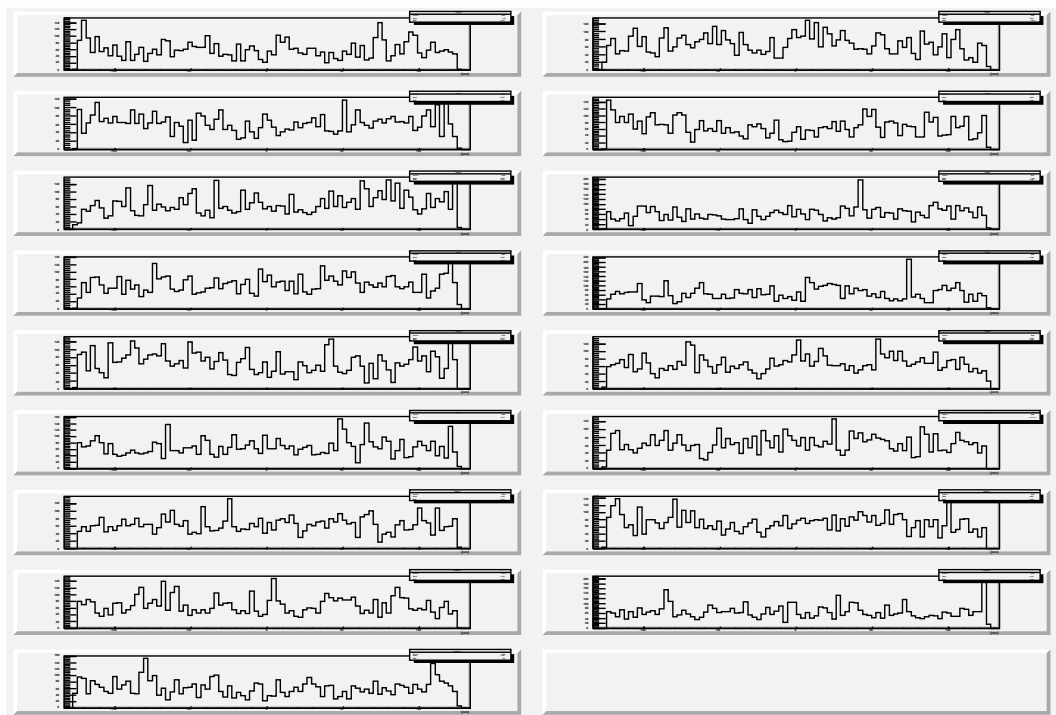


図 C.94: レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、直接ペア)

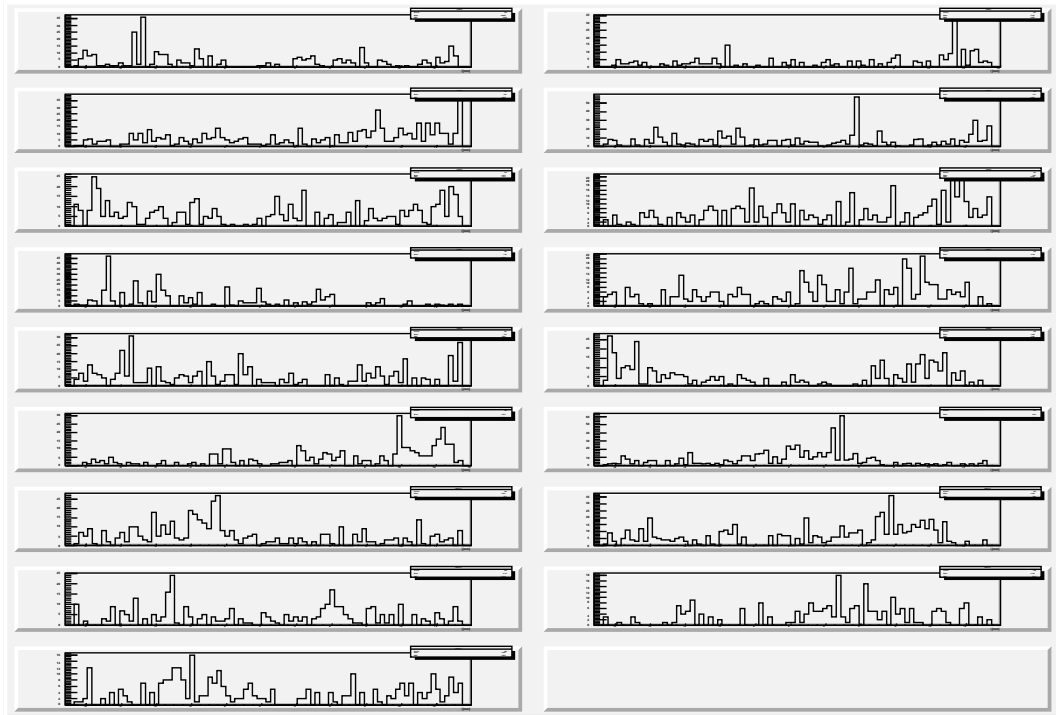


図 C.95: レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

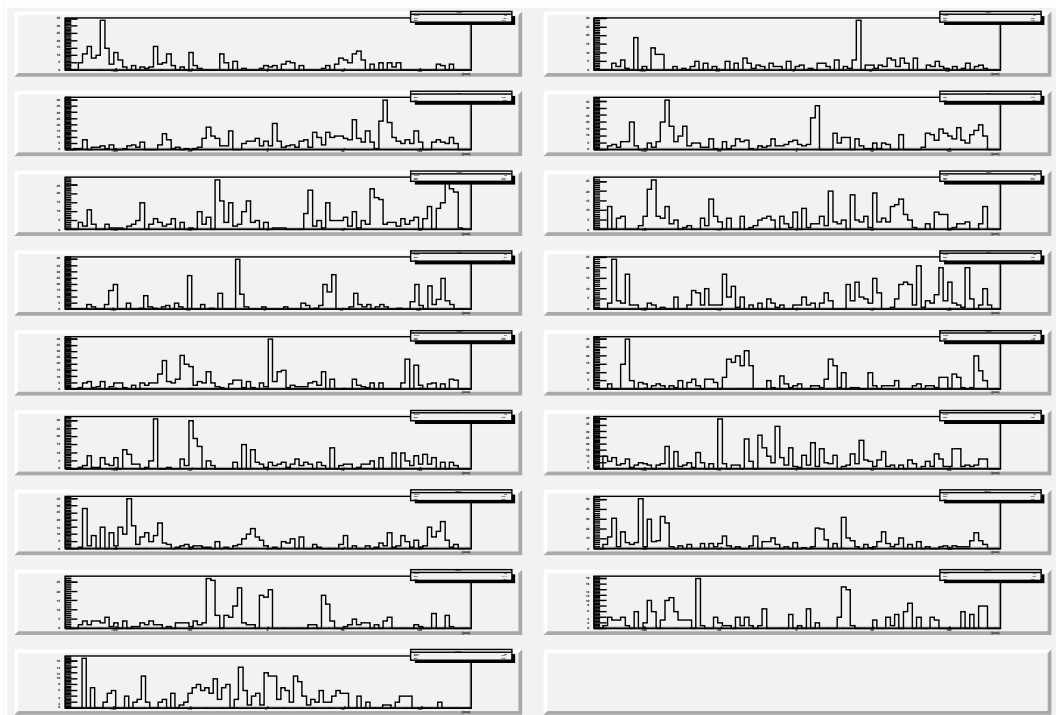


図 C.96: レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (350 GeV、反跳ペア)

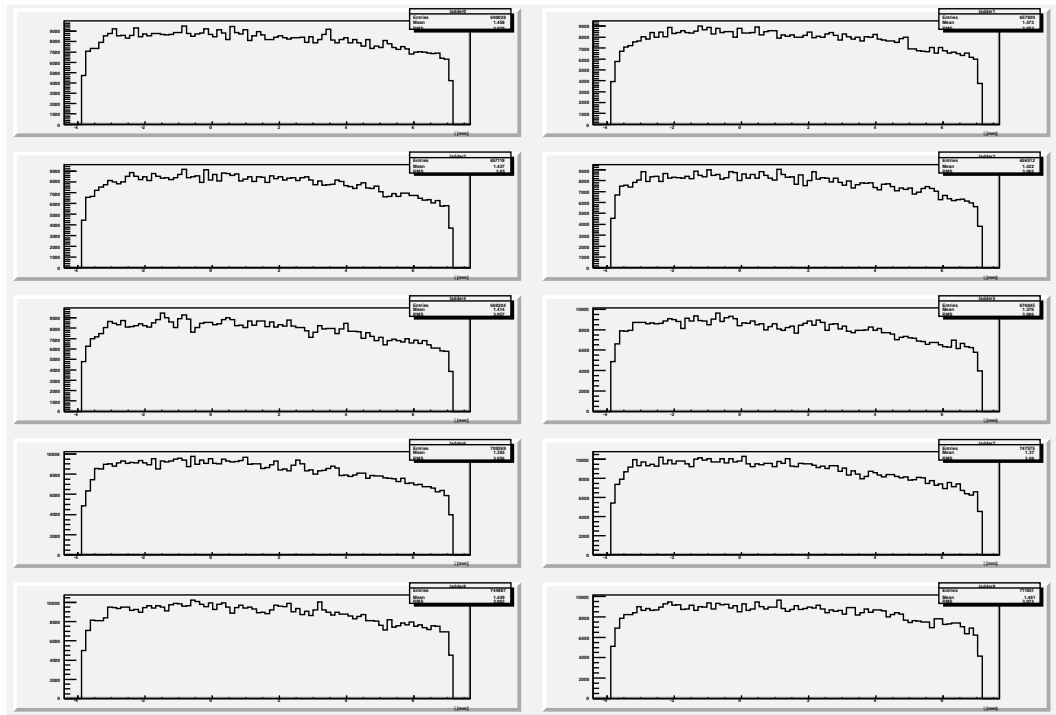


図 C.97: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)

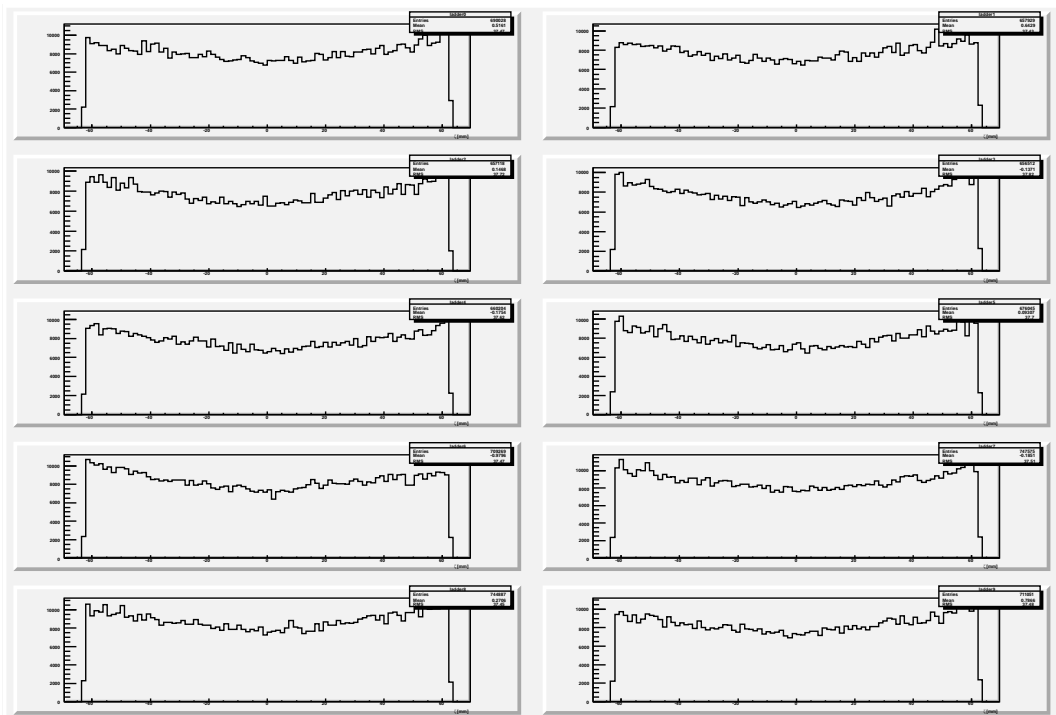


図 C.98: レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV)

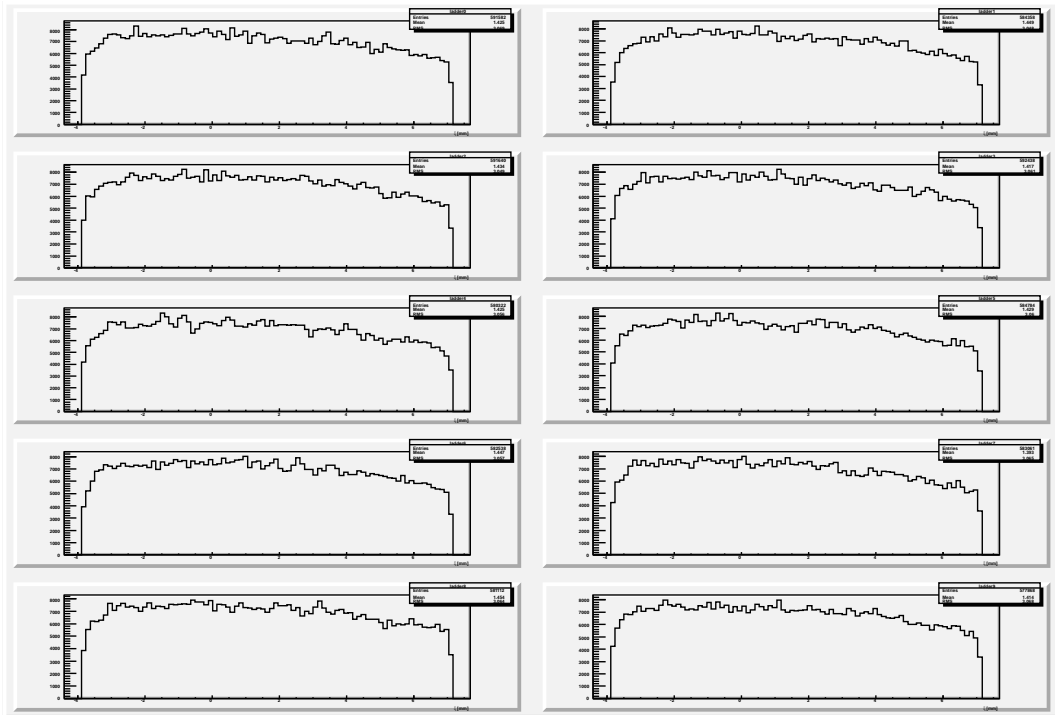


図 C.99: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)

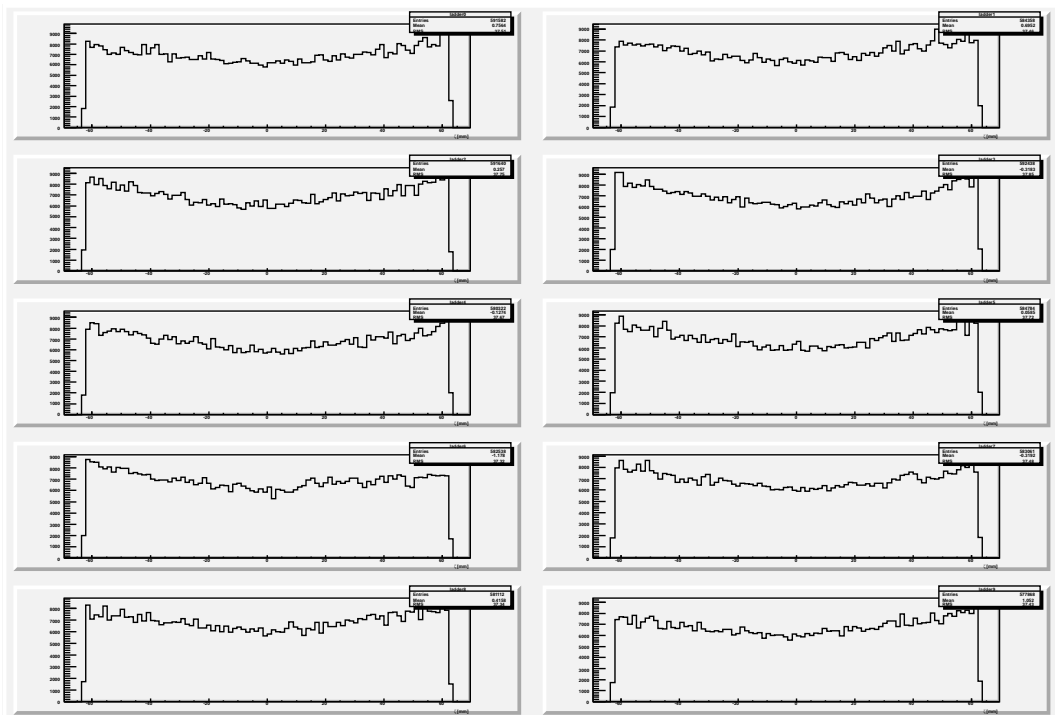


図 C.100: レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、直接ペア)

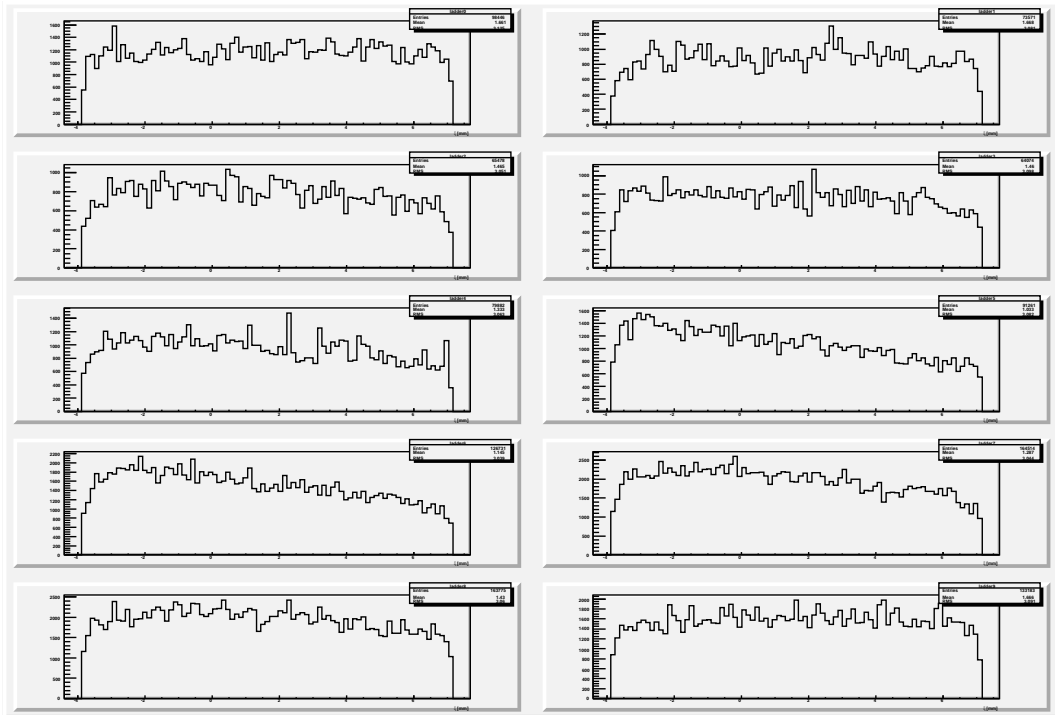


図 C.101: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)

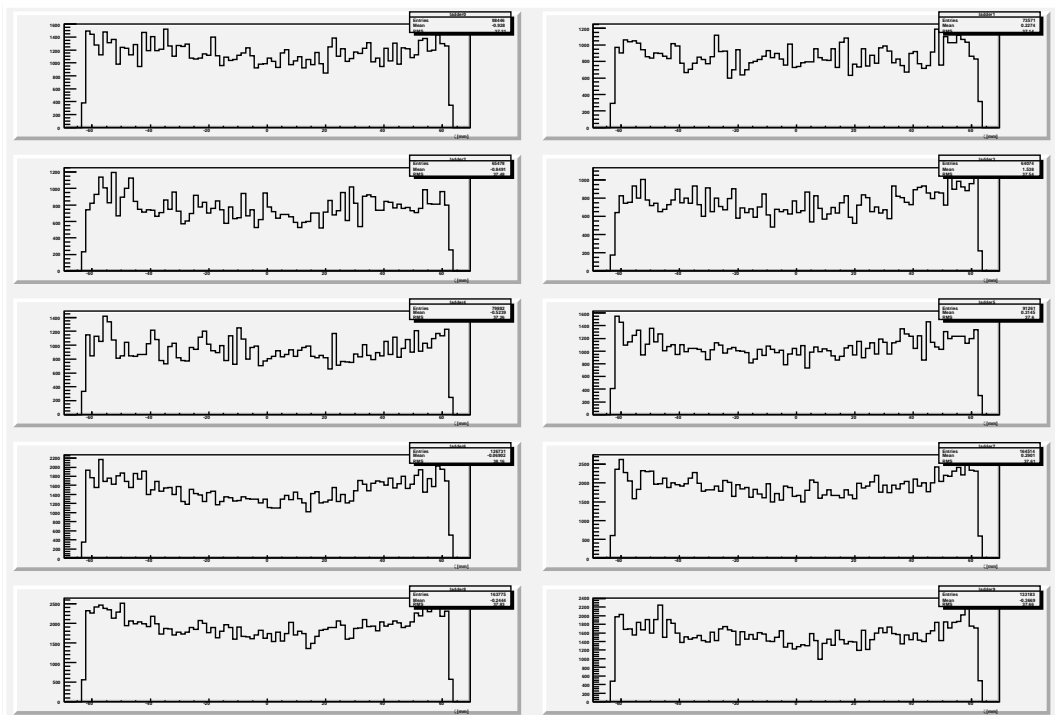


図 C.102: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)

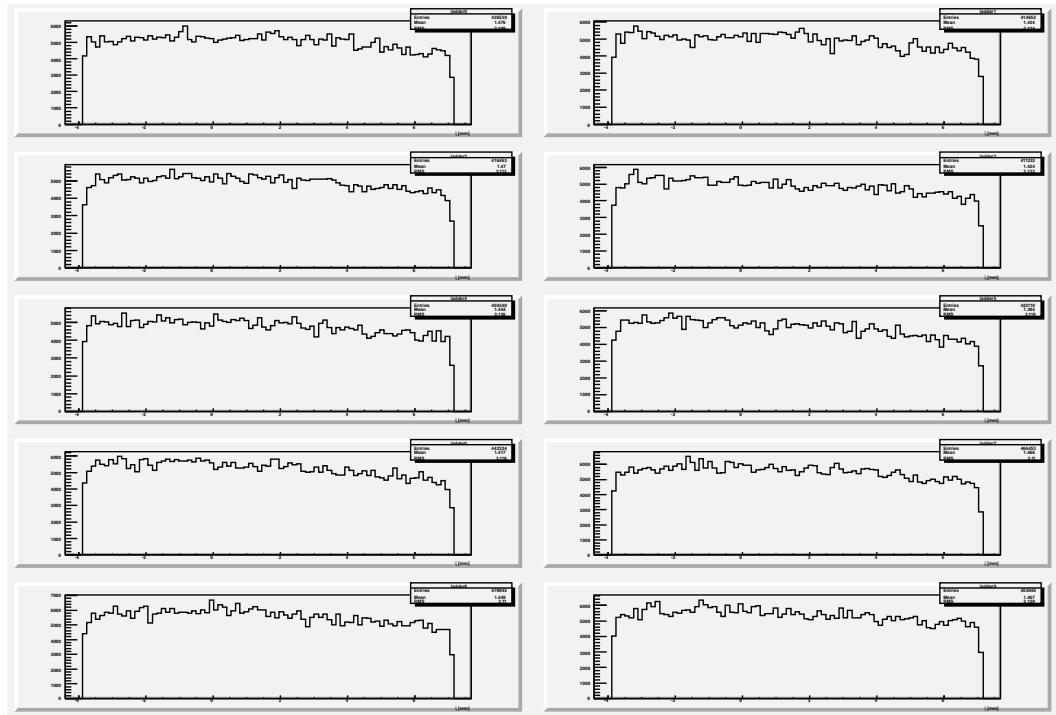


図 C.103: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV)

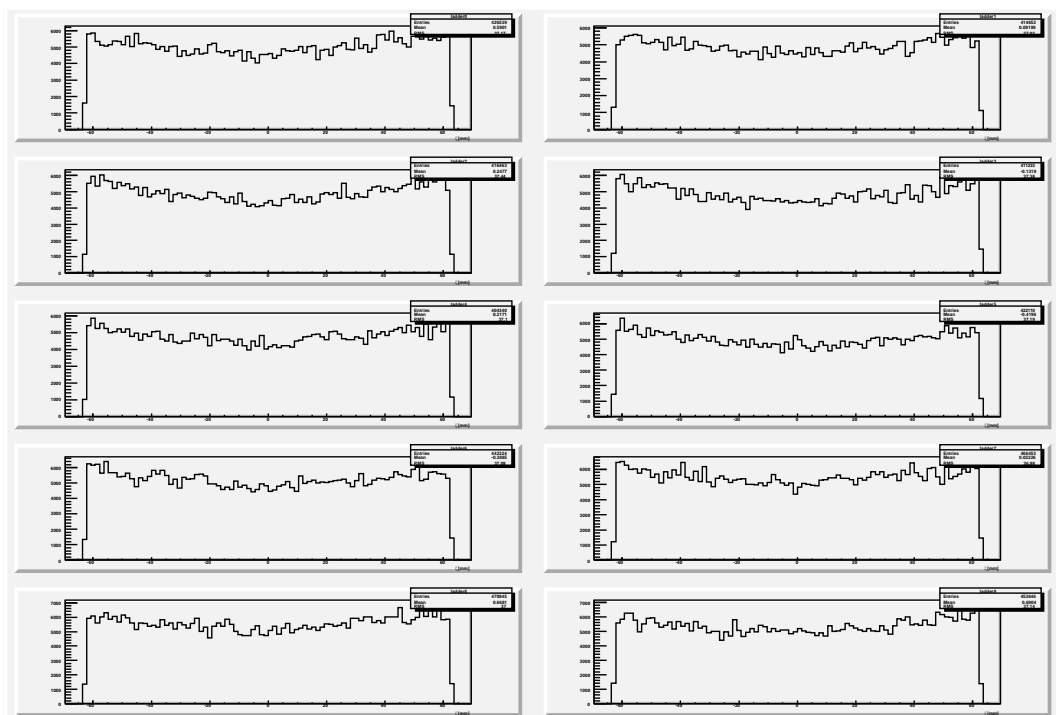


図 C.104: レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)

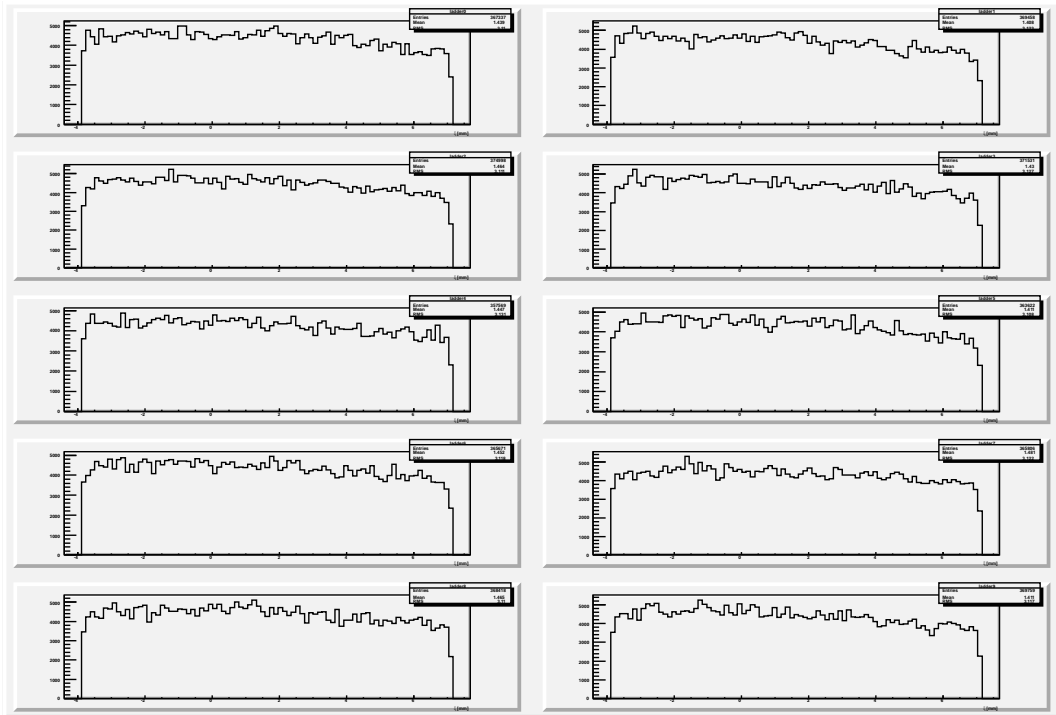


図 C.105: レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)

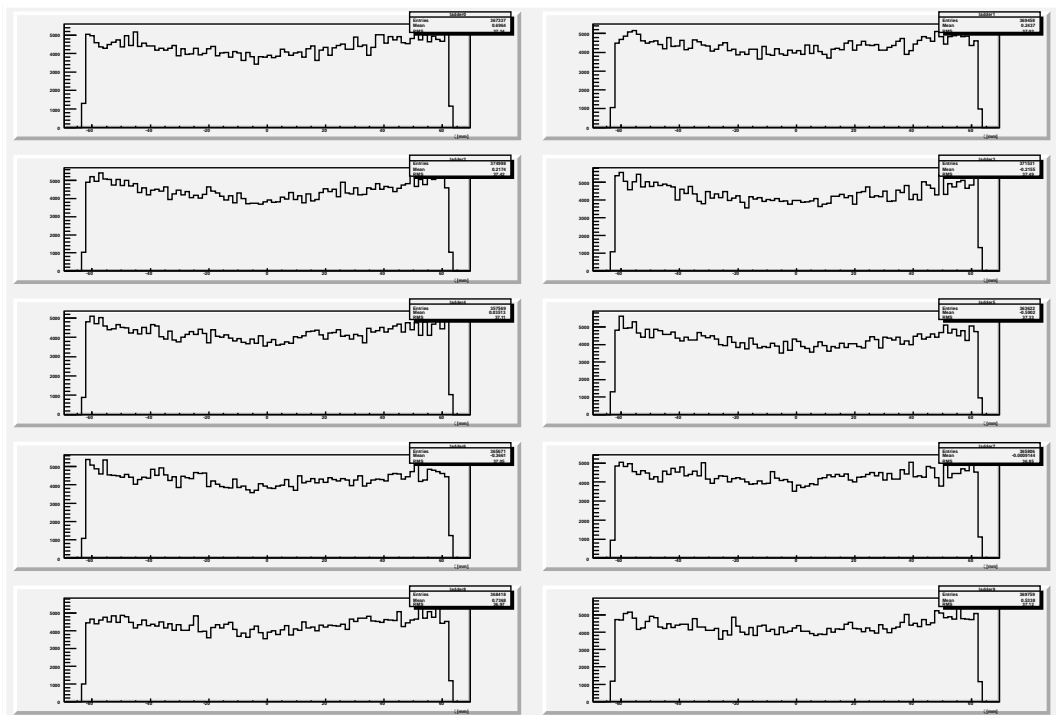


図 C.106: レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)

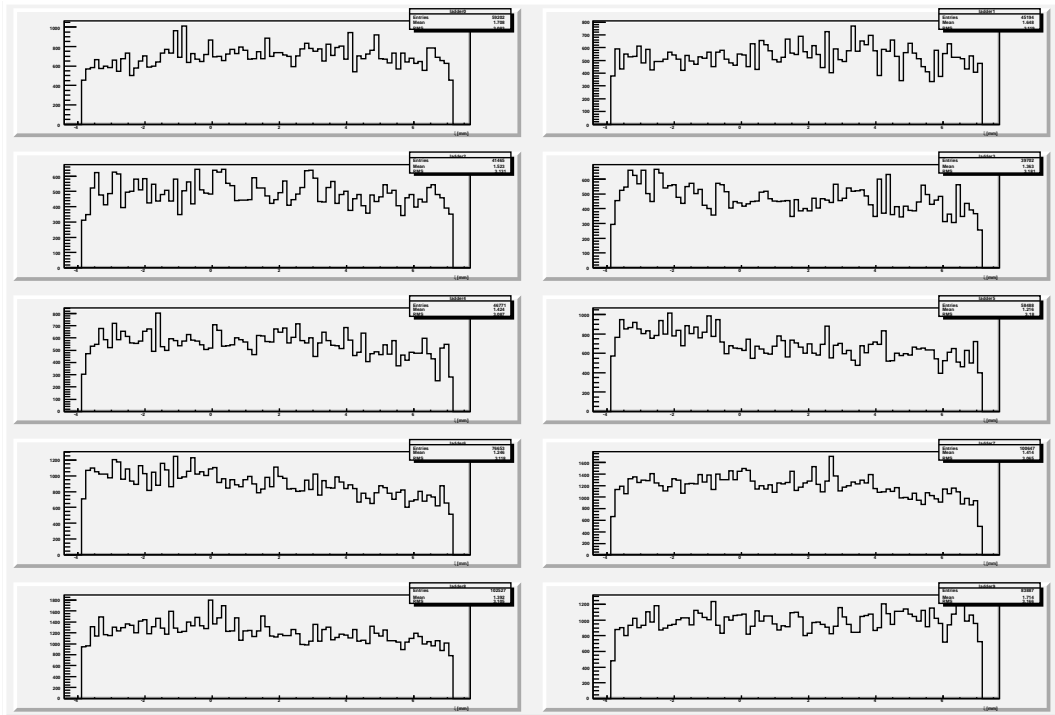


図 C.107: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、反跳ペア)

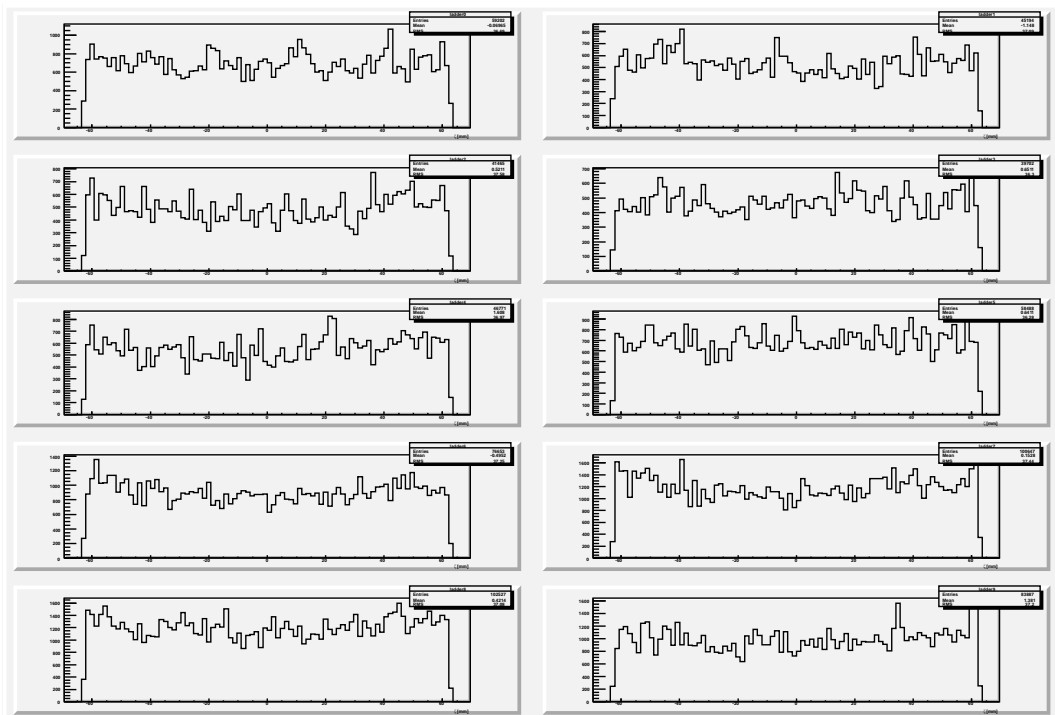


図 C.108: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、反跳ペア)

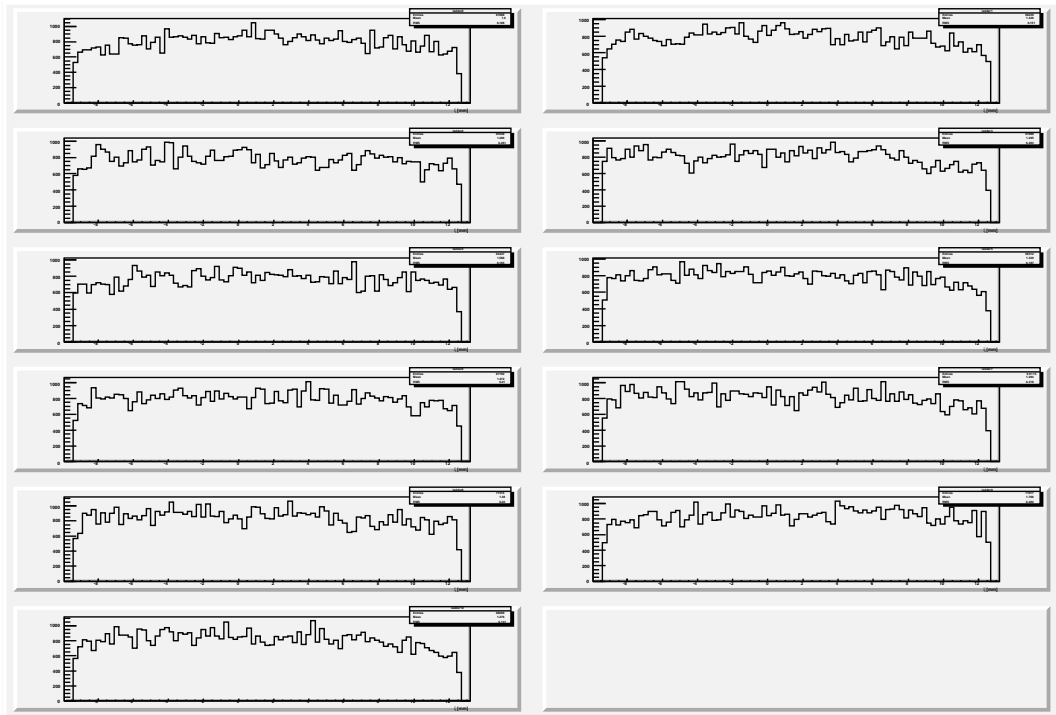


図 C.109: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)

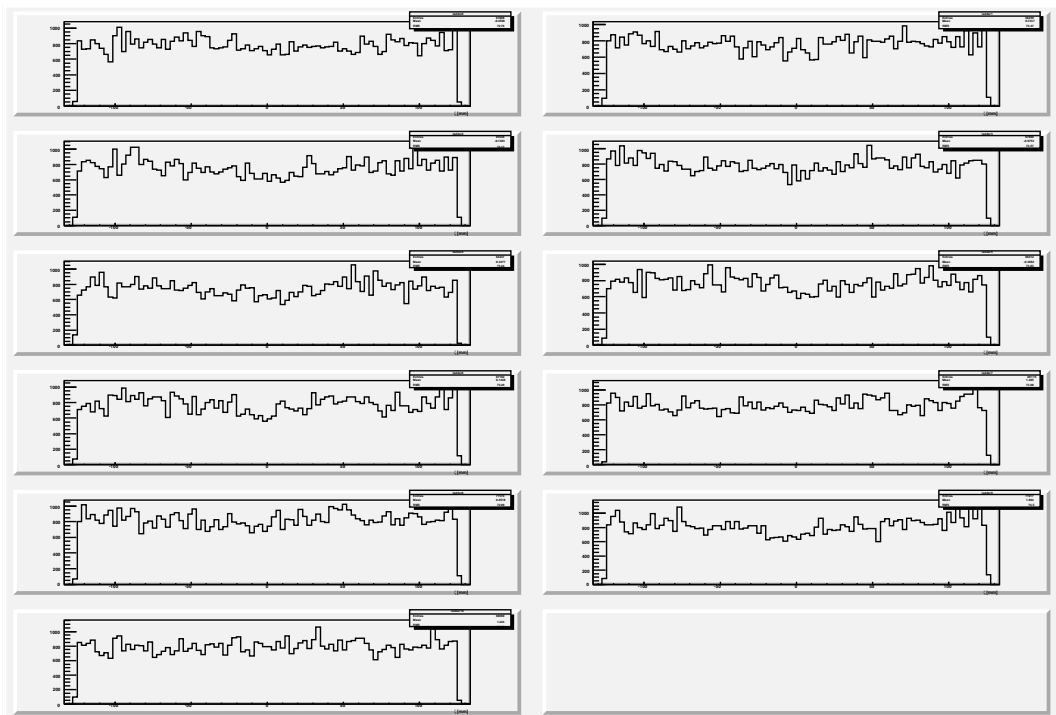


図 C.110: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)

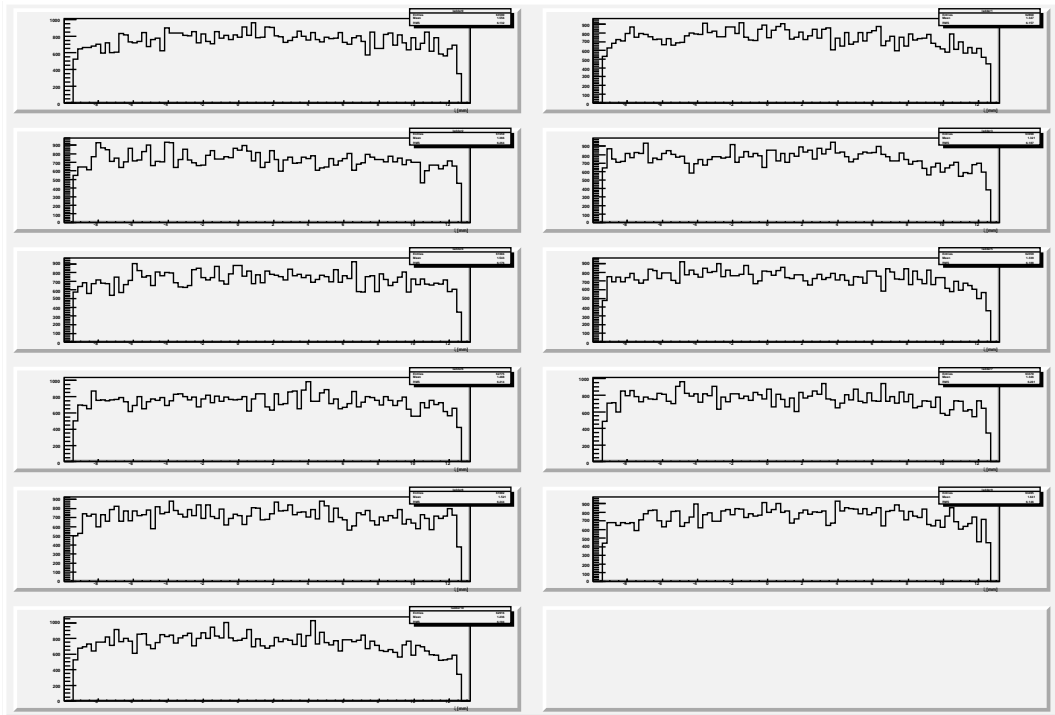


図 C.111: レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、直接ペア)

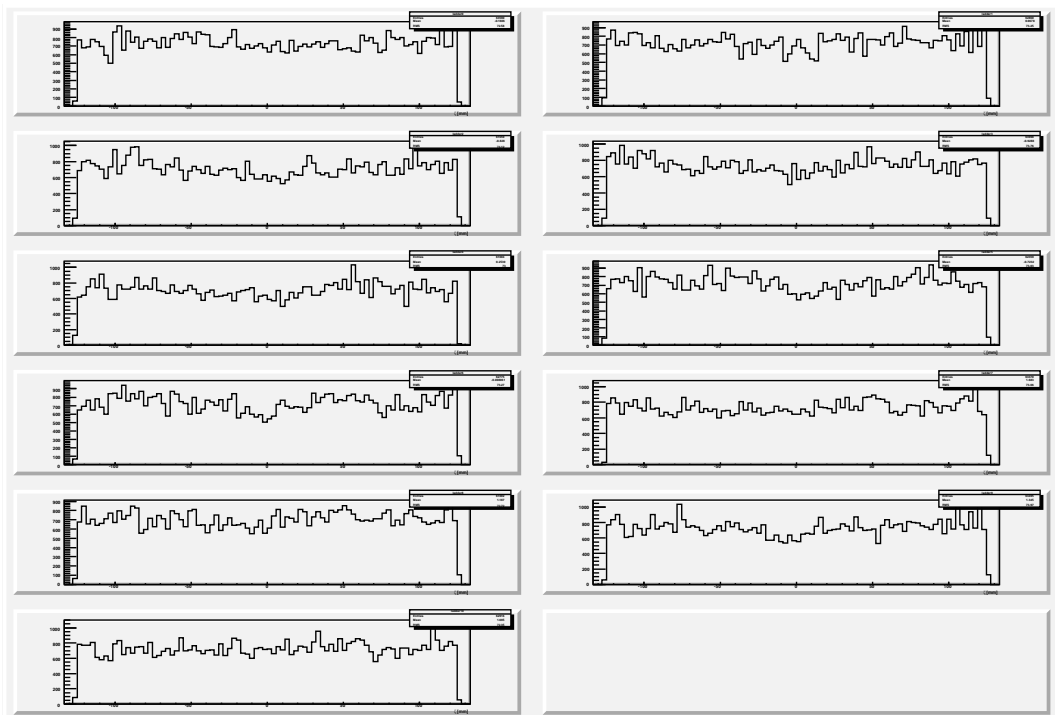


図 C.112: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)

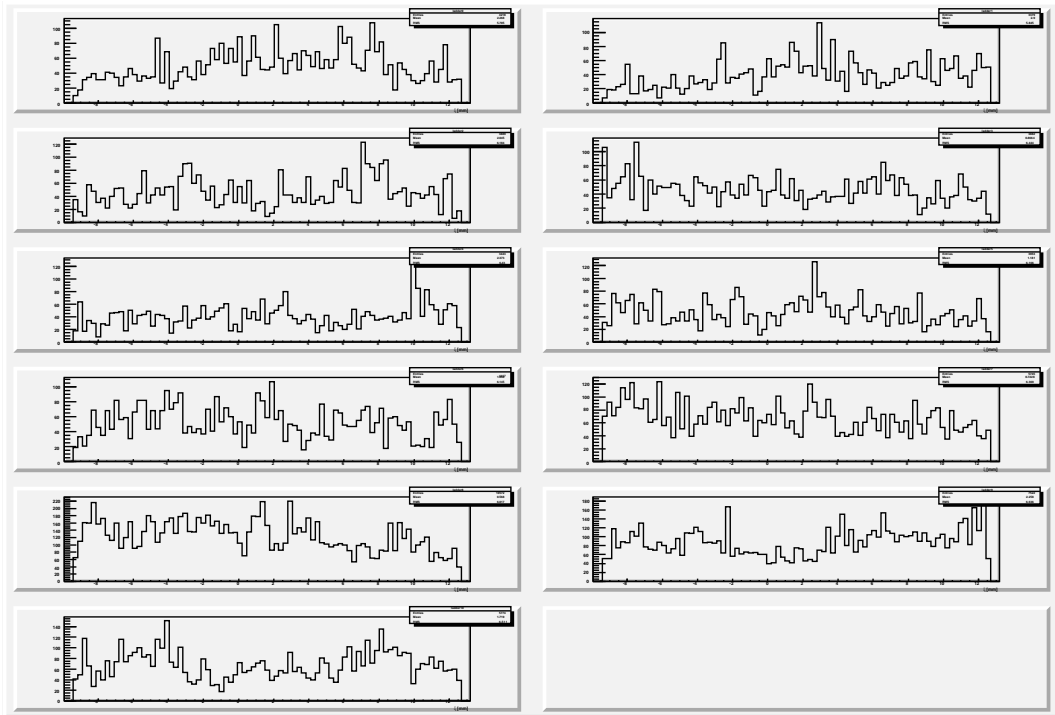


図 C.113: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)

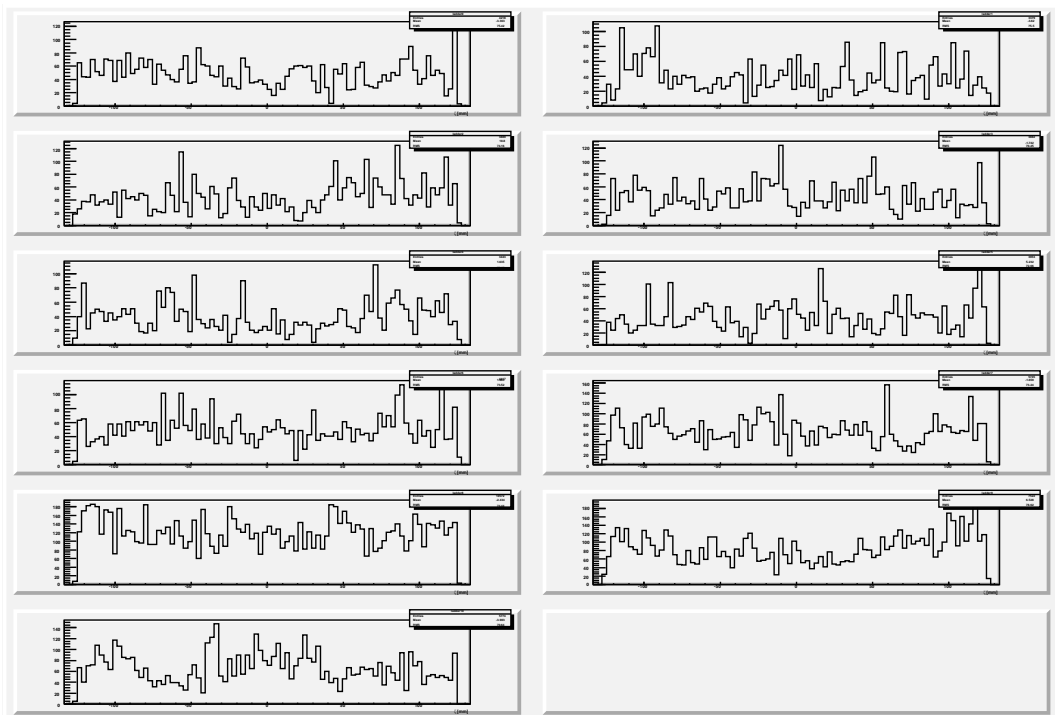


図 C.114: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)

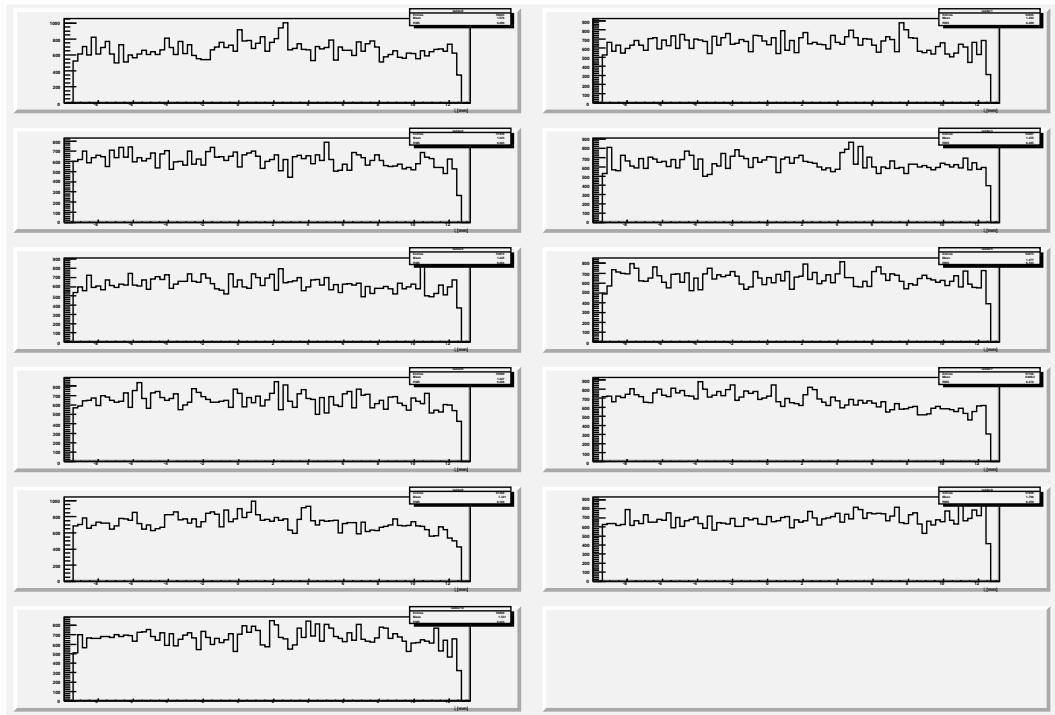


図 C.115: レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)

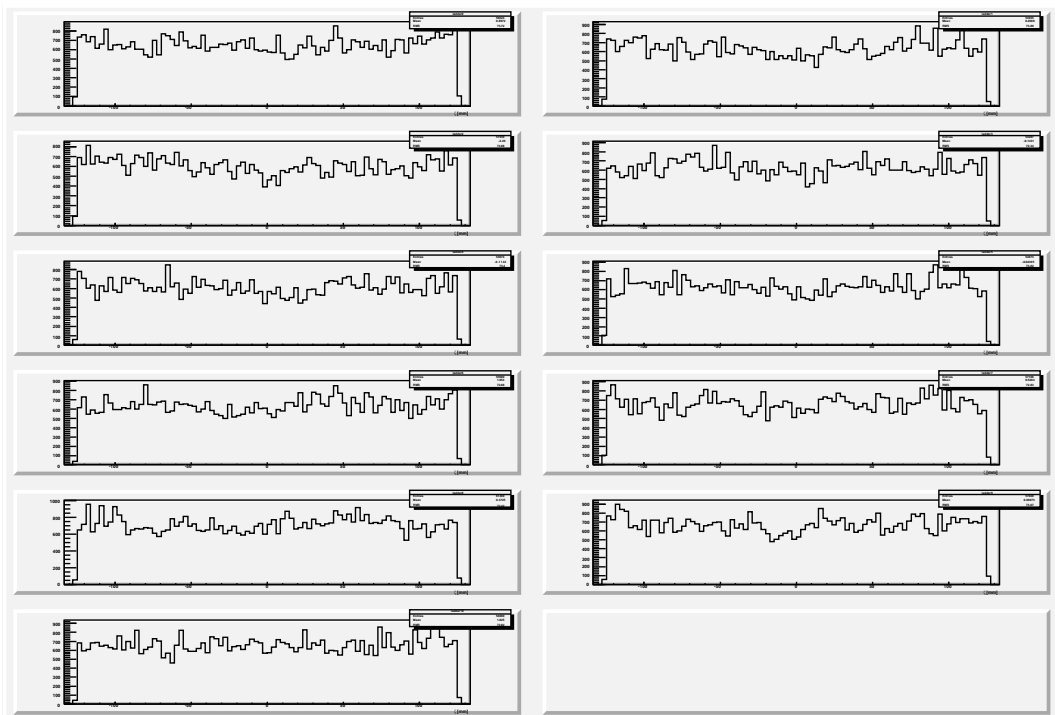


図 C.116: レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV)

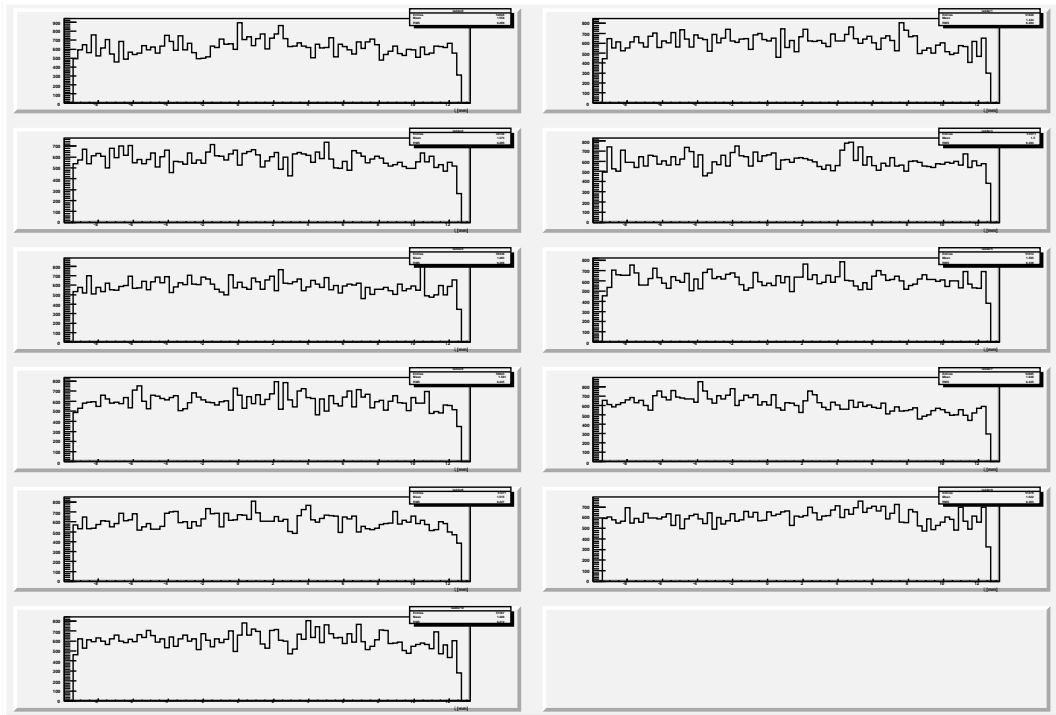


図 C.117: レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)

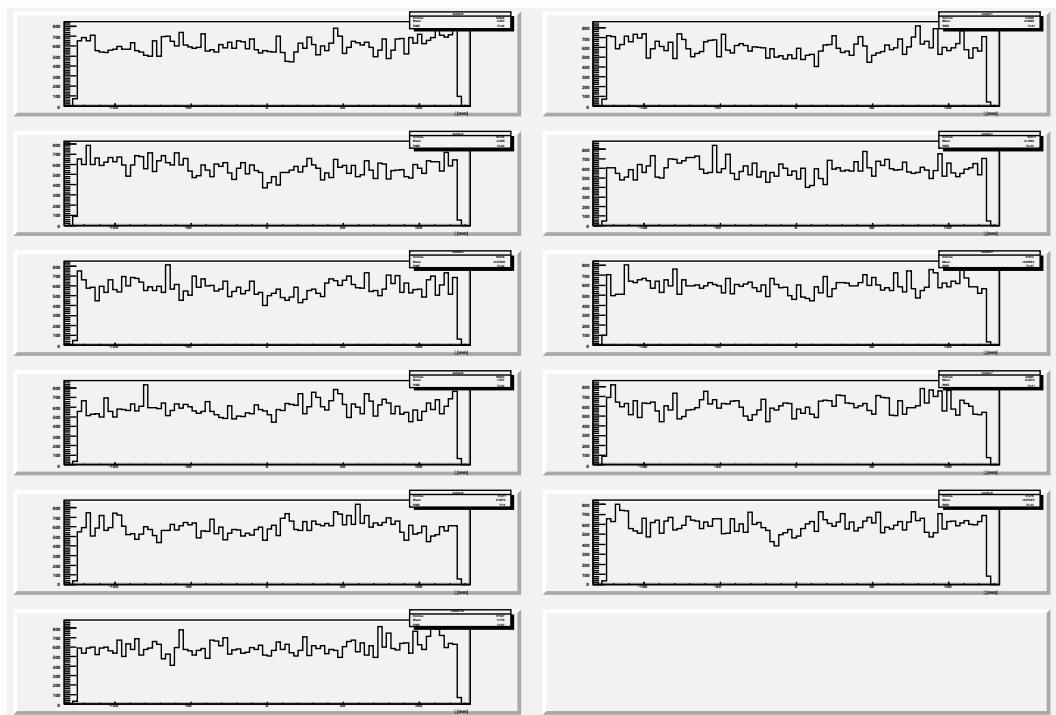


図 C.118: レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)

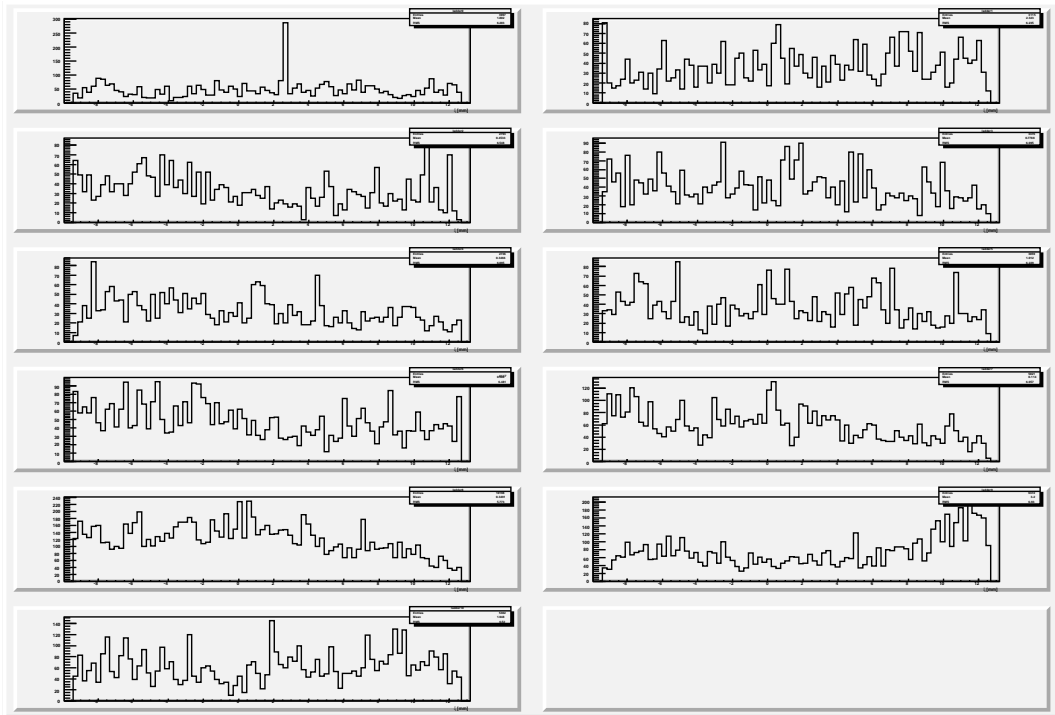


図 C.119: レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、反跳ペア)

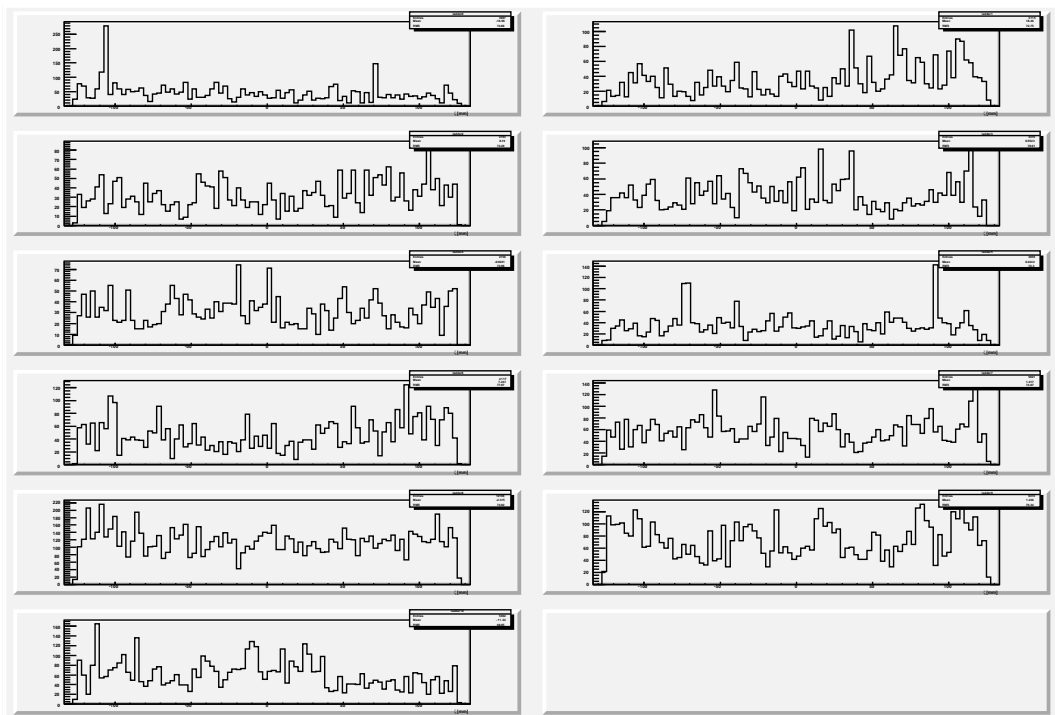


図 C.120: レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)

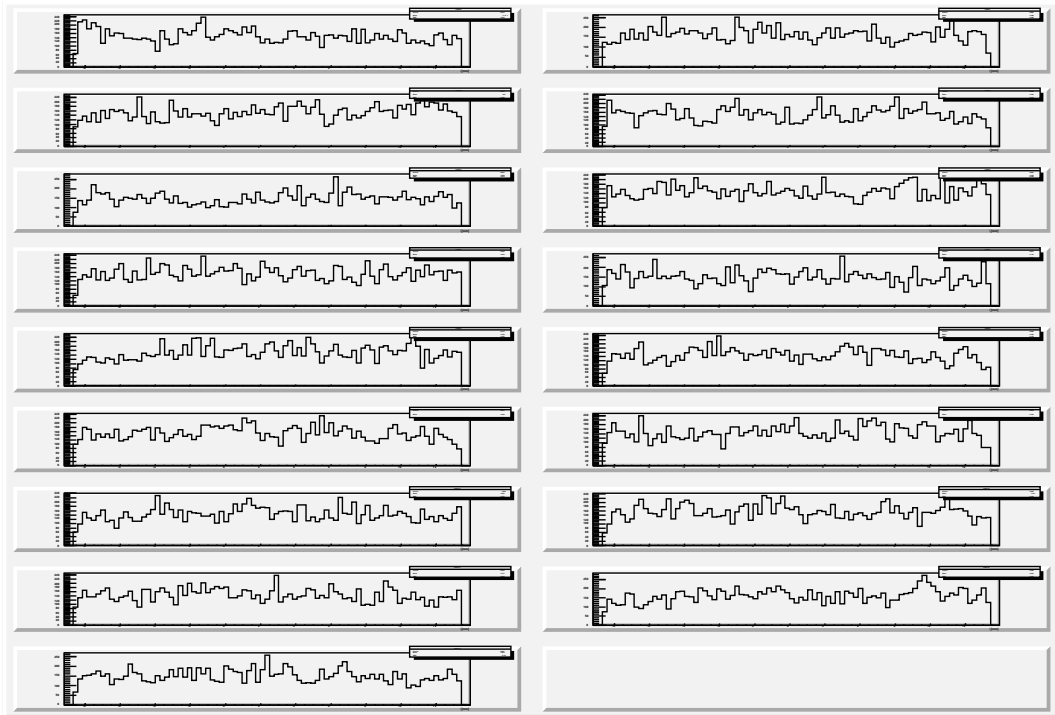


図 C.121: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)

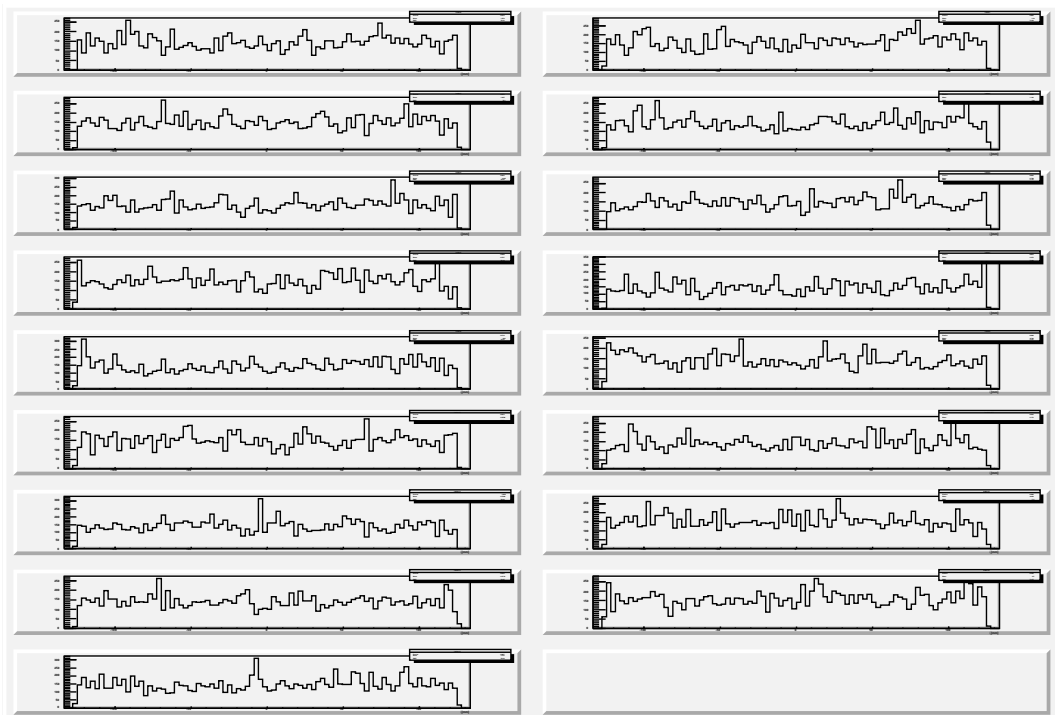


図 C.122: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)

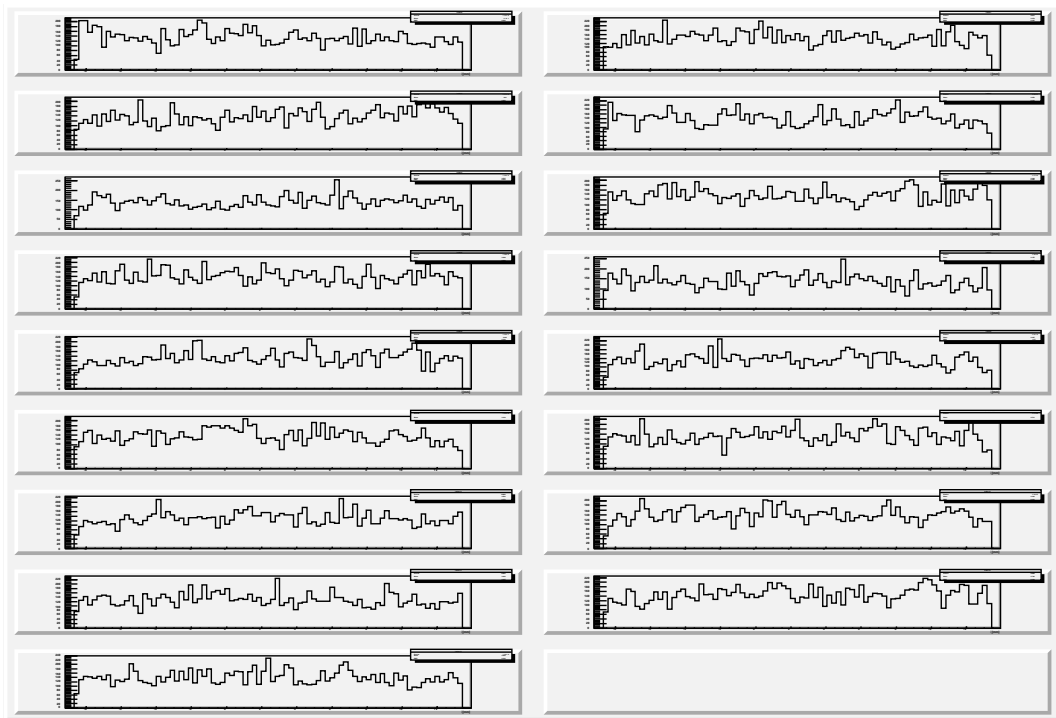


図 C.123: レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、直接ペア)

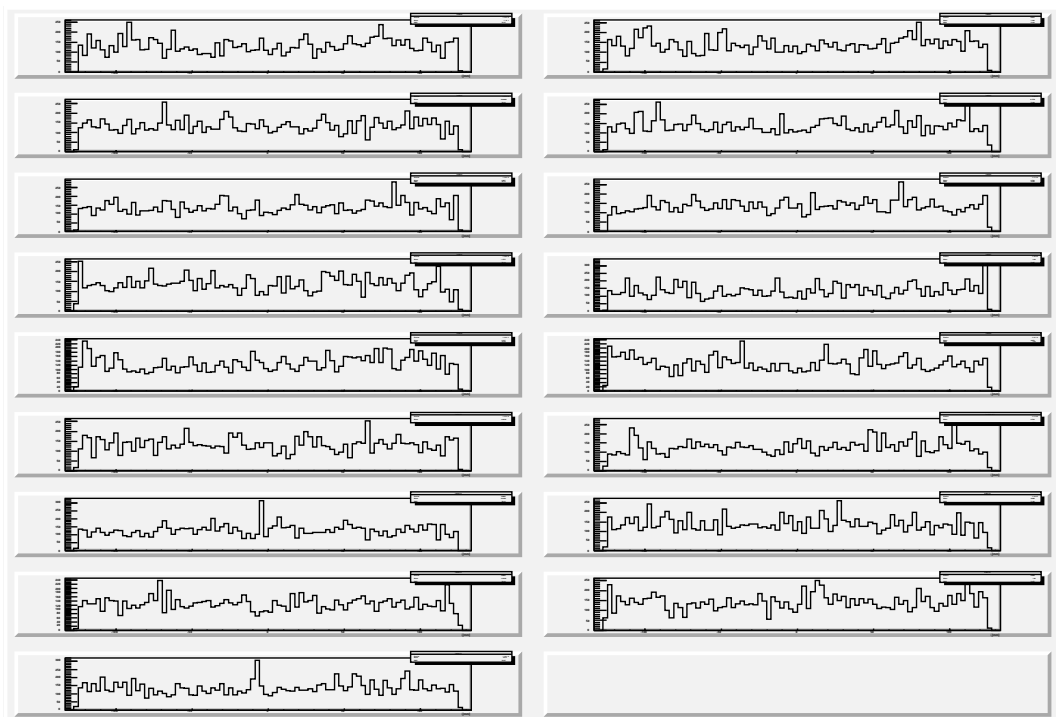


図 C.124: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)

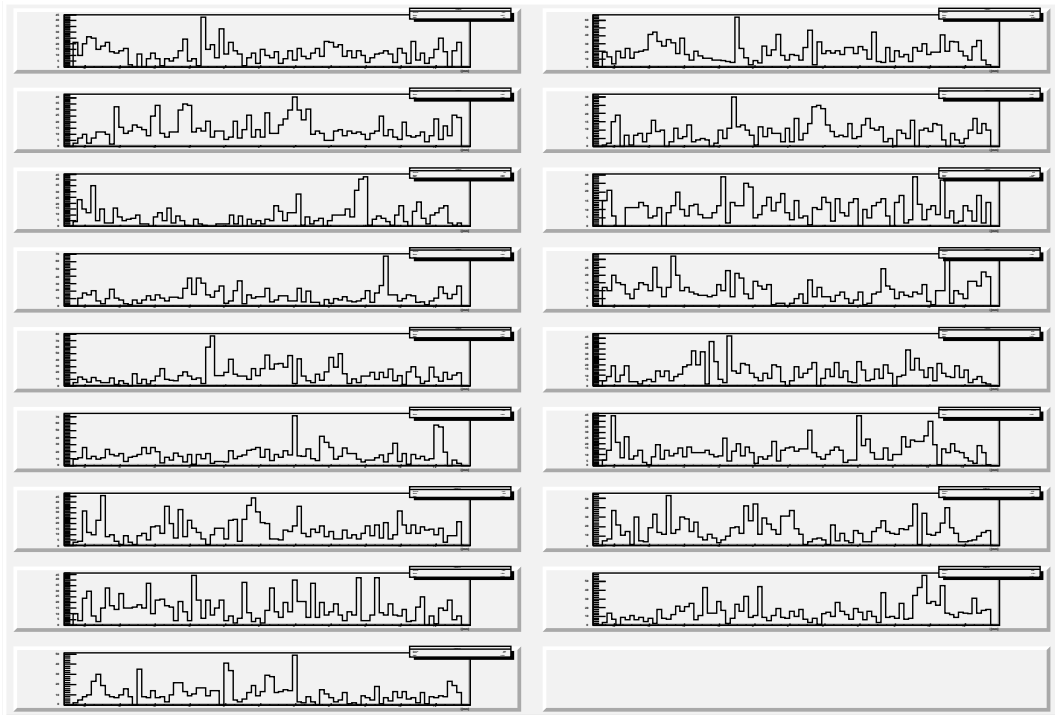


図 C.125: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)

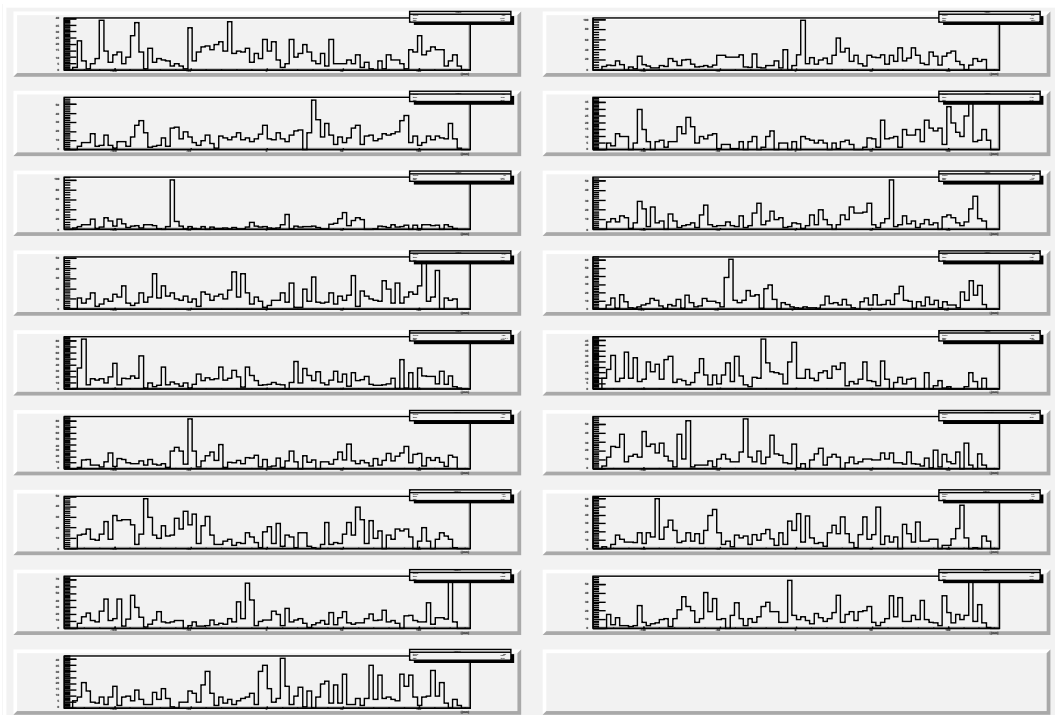


図 C.126: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)

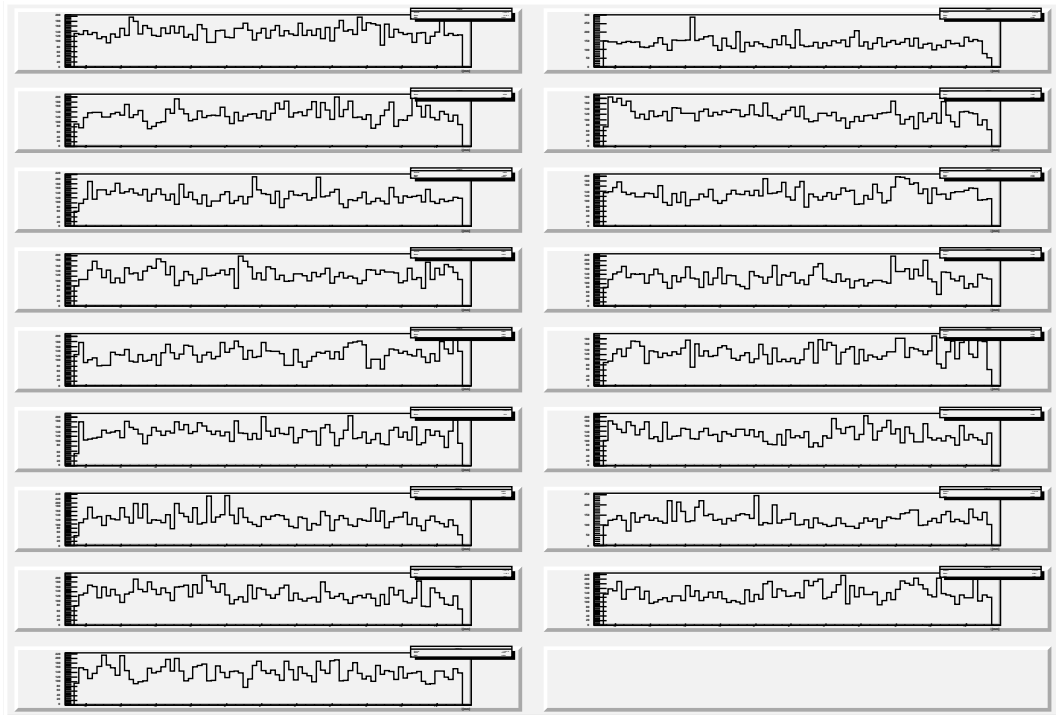


図 C.127: レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV)

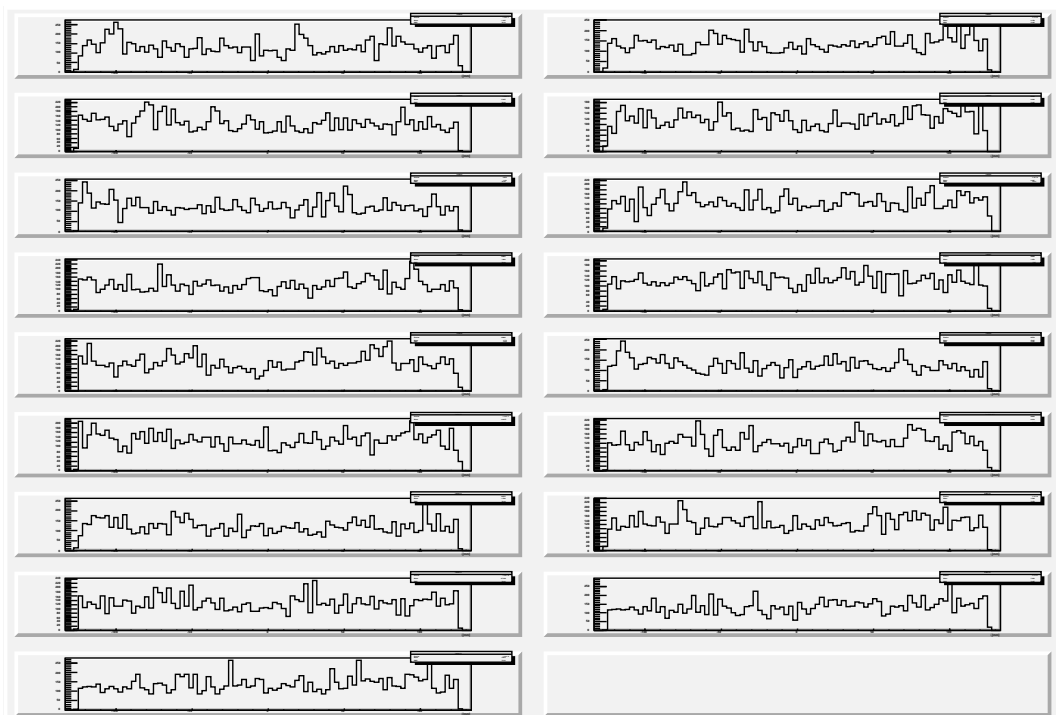


図 C.128: レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV)

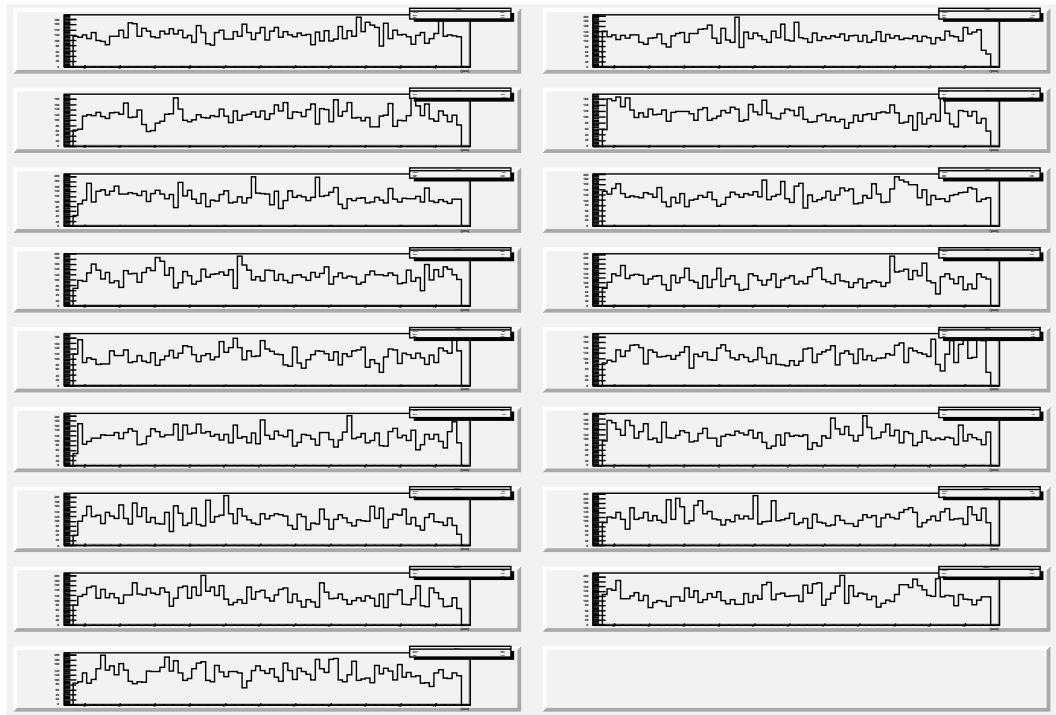


図 C.129: レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)

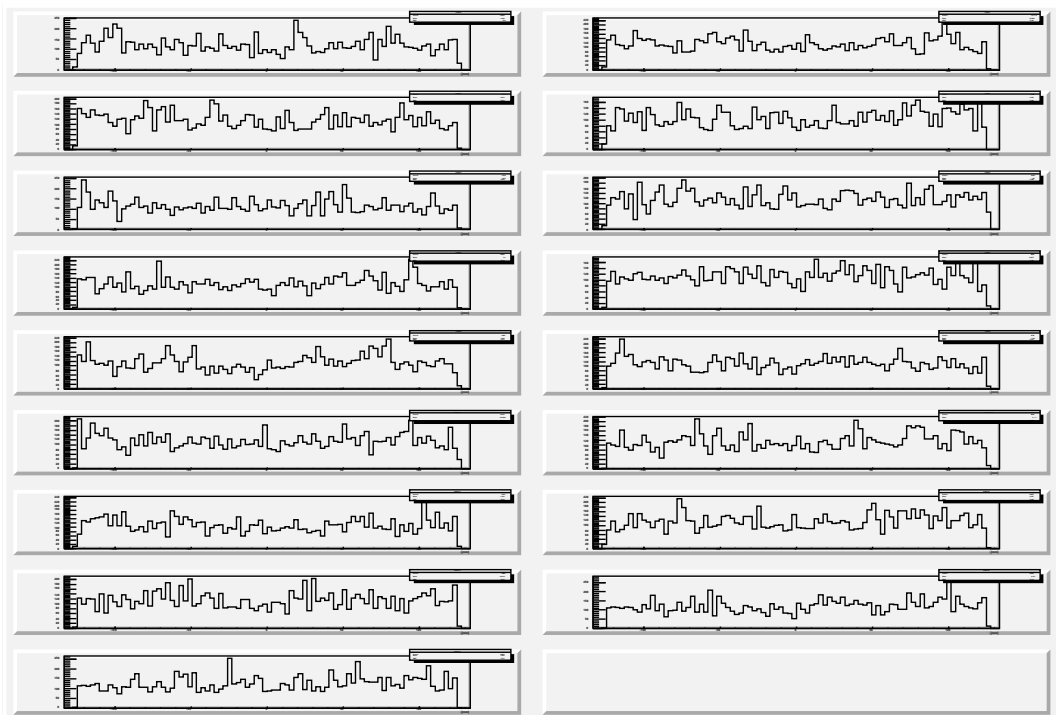


図 C.130: レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、直接ペア)

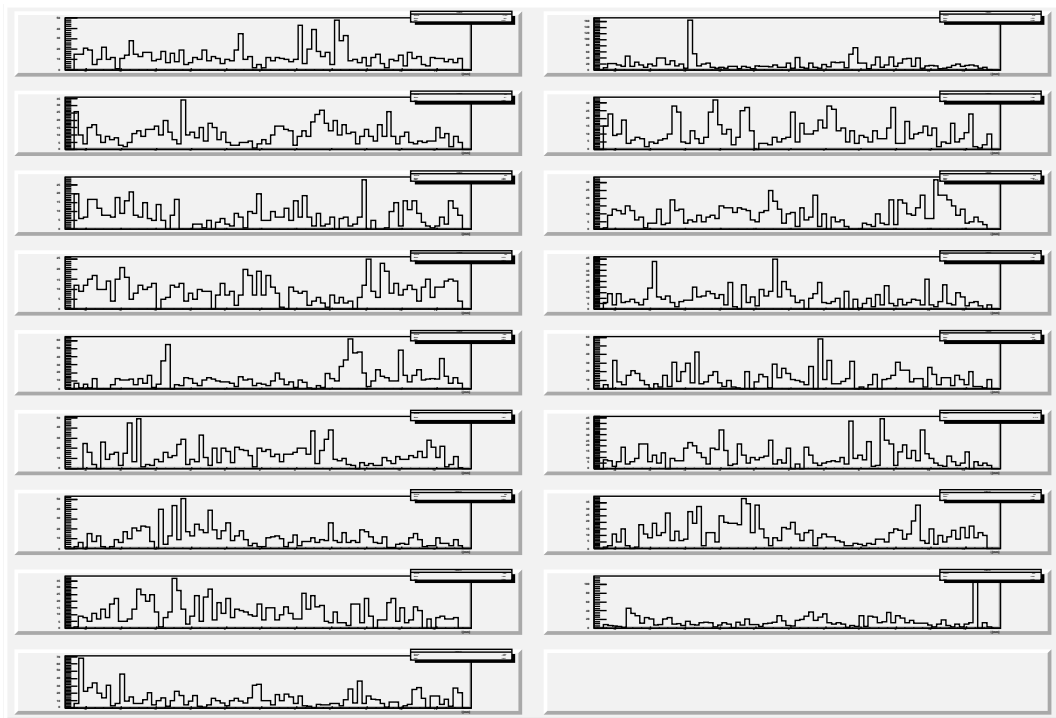


図 C.131: レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (500 GeV、反跳ペア)

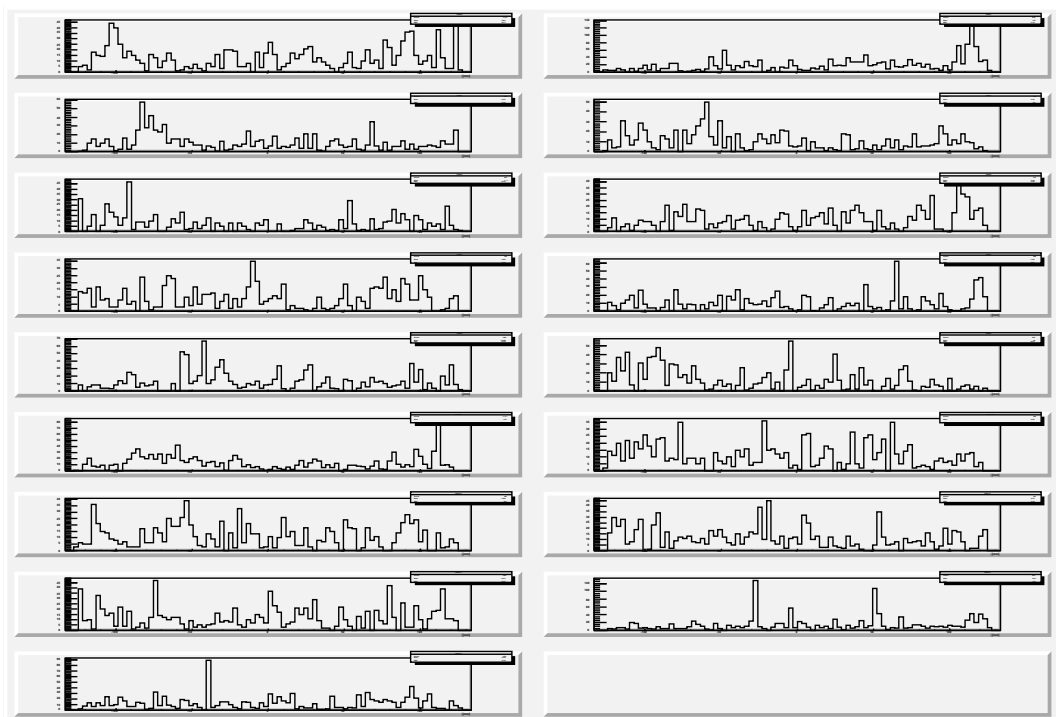


図 C.132: レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (500 GeV、反跳ペア)

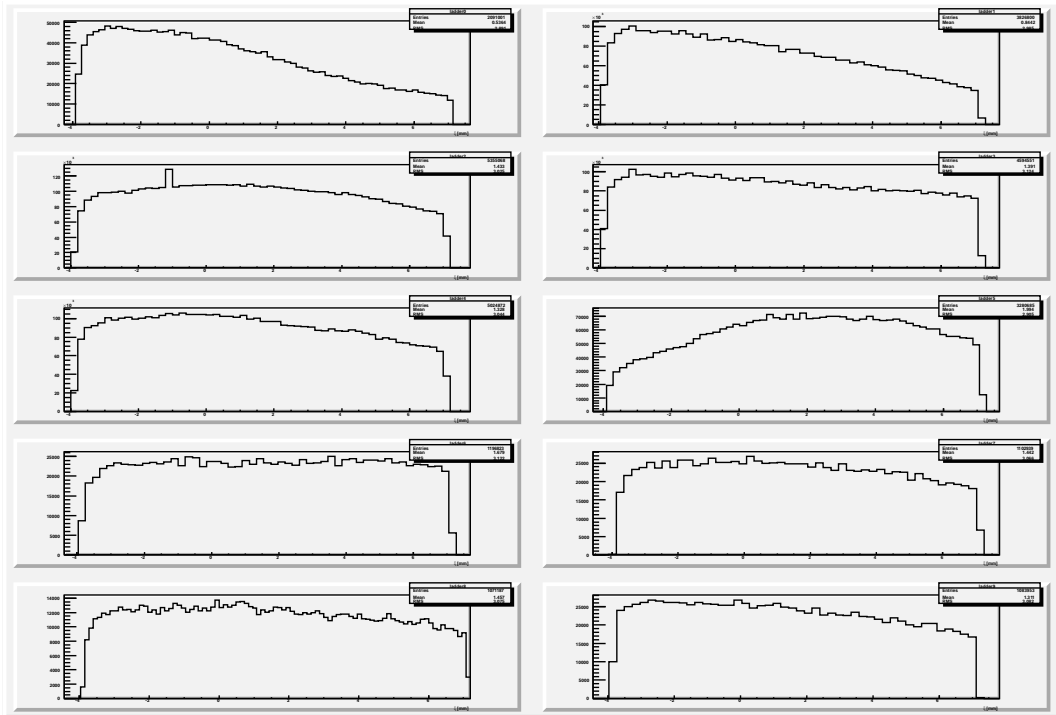


図 C.133: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV)

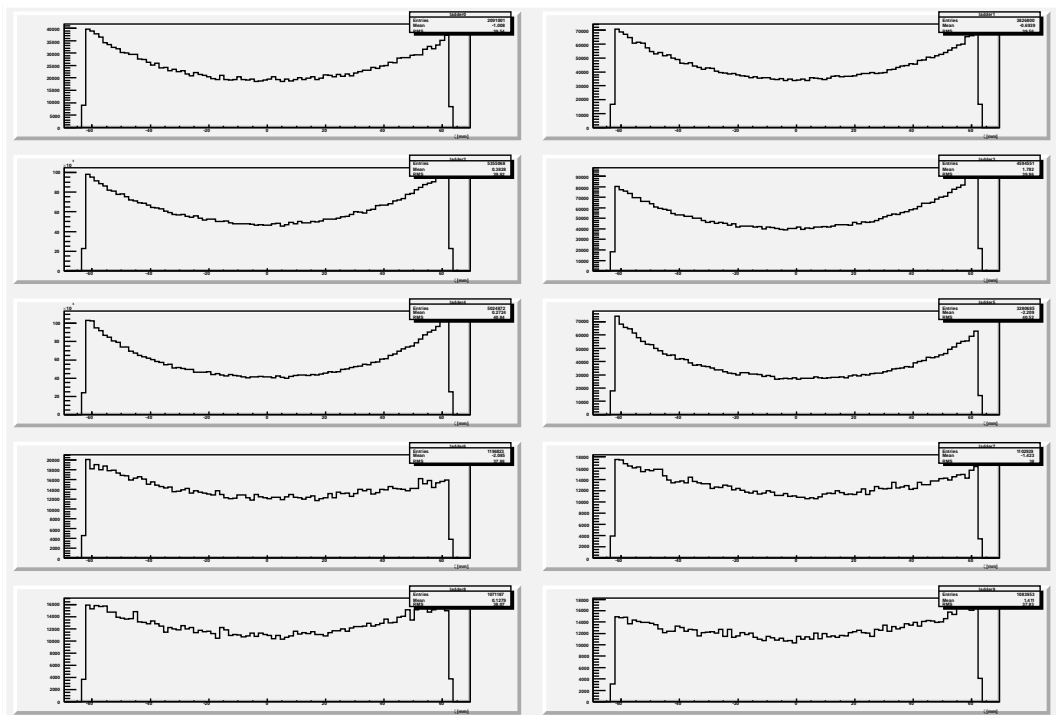


図 C.134: レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV)

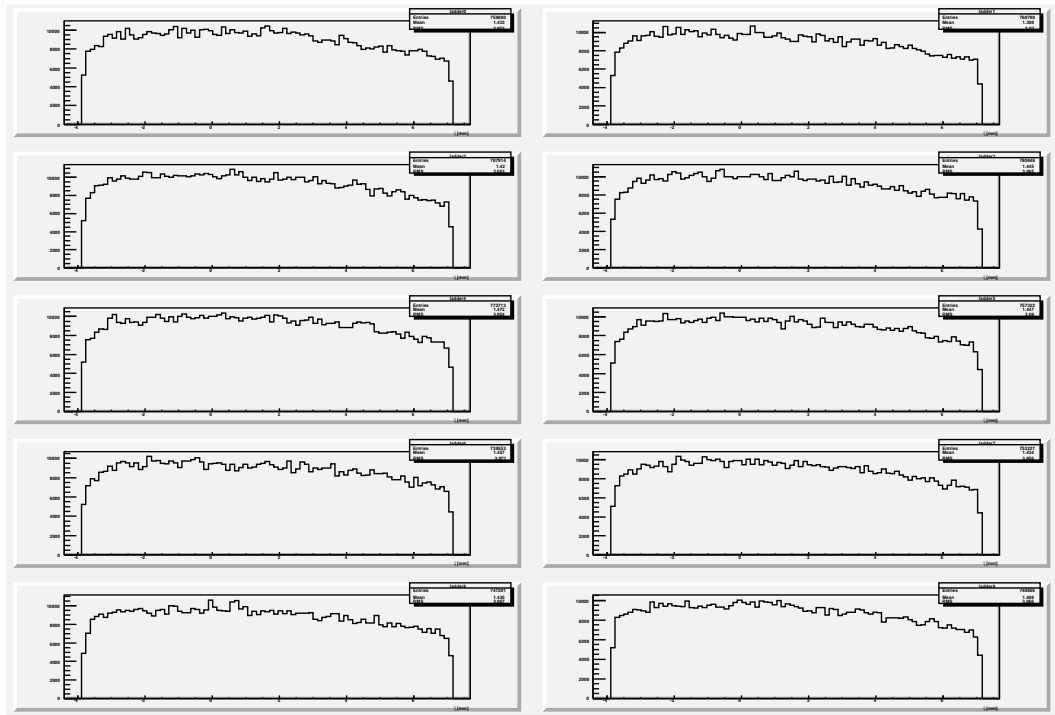


図 C.135: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

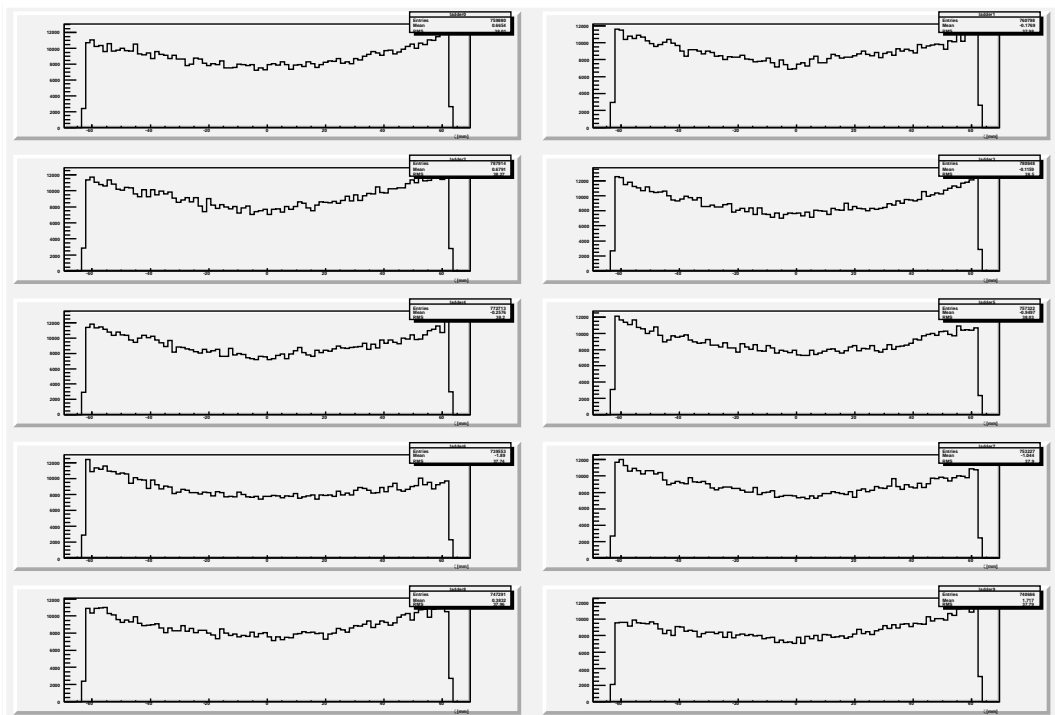


図 C.136: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

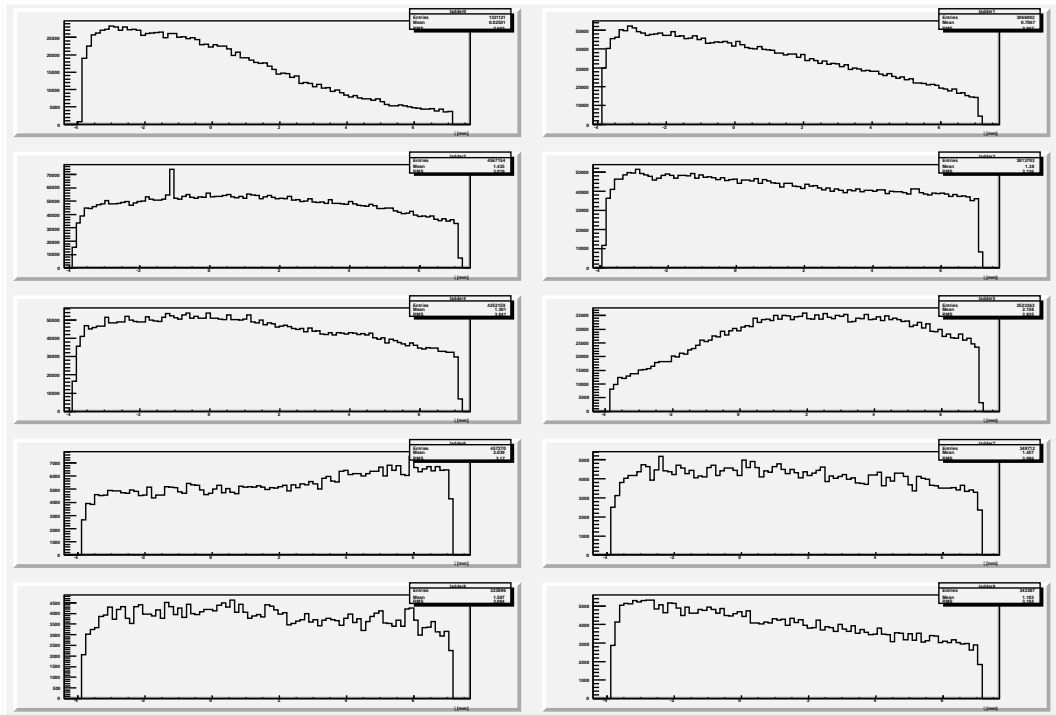


図 C.137: レイヤー 0 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

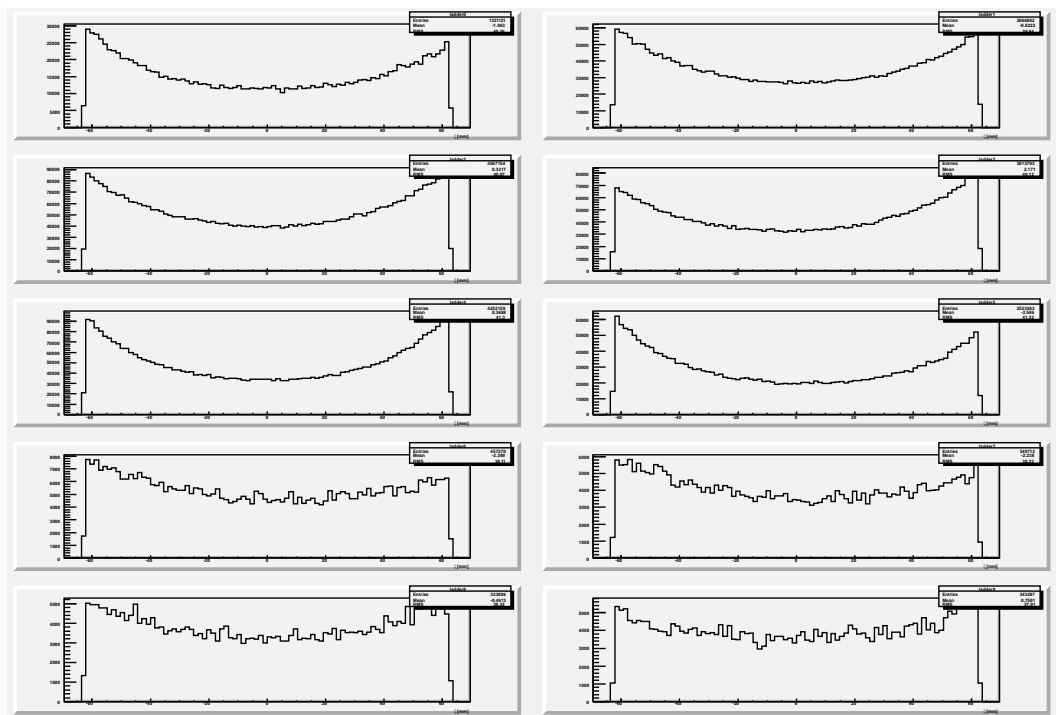


図 C.138: レイヤー 0 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

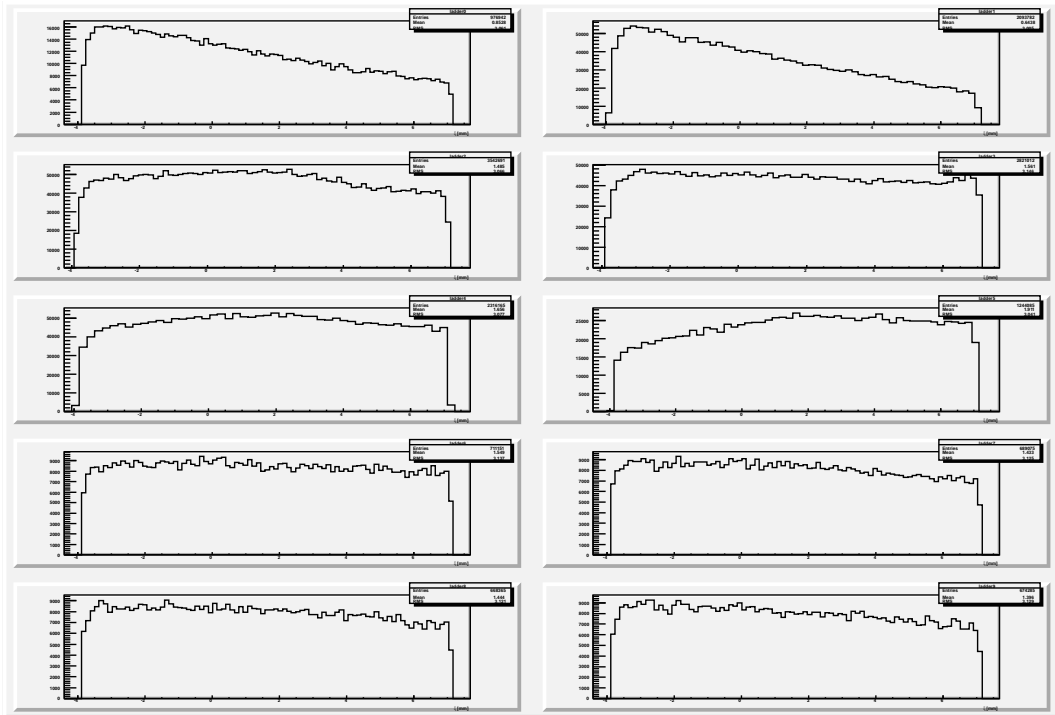


図 C.139: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV)

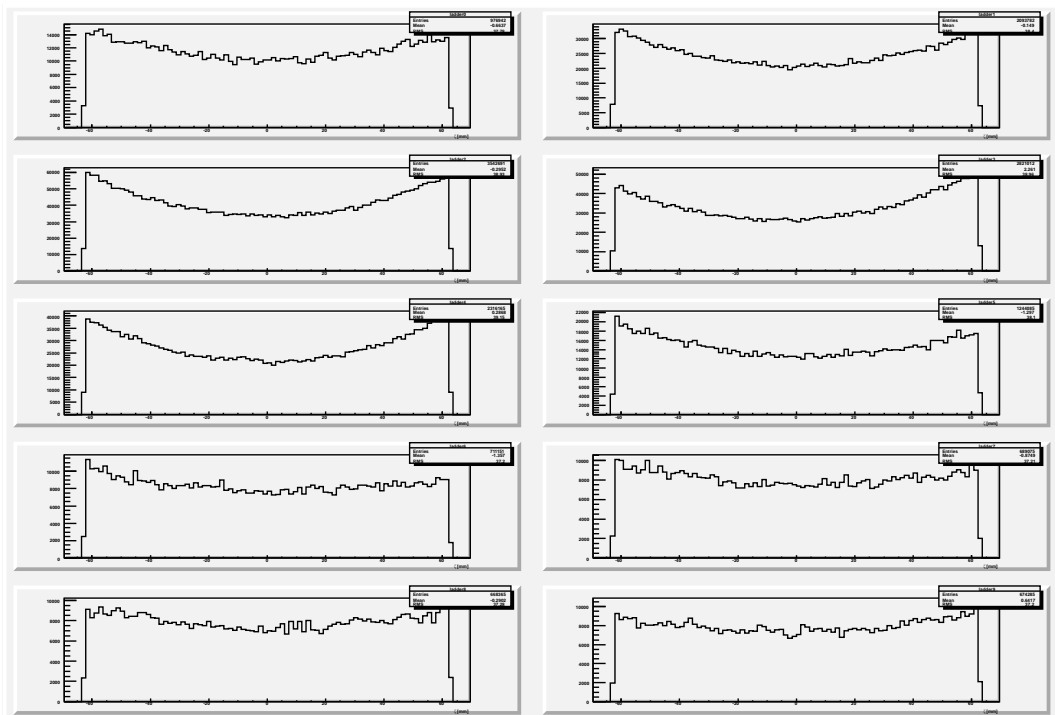


図 C.140: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV)

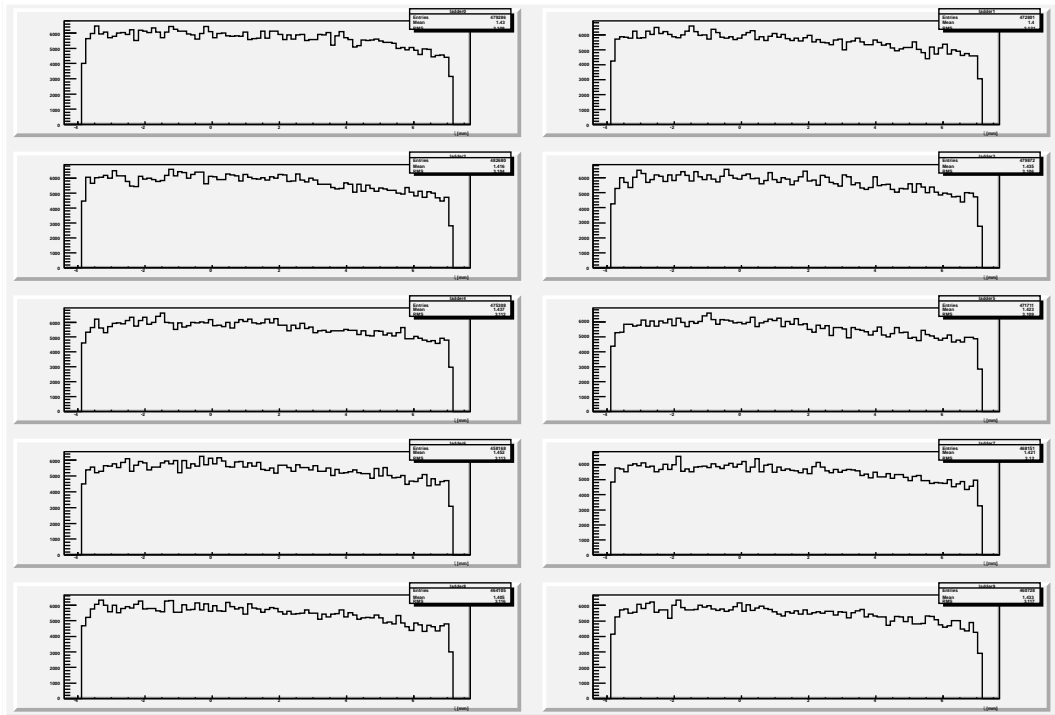


図 C.141: レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

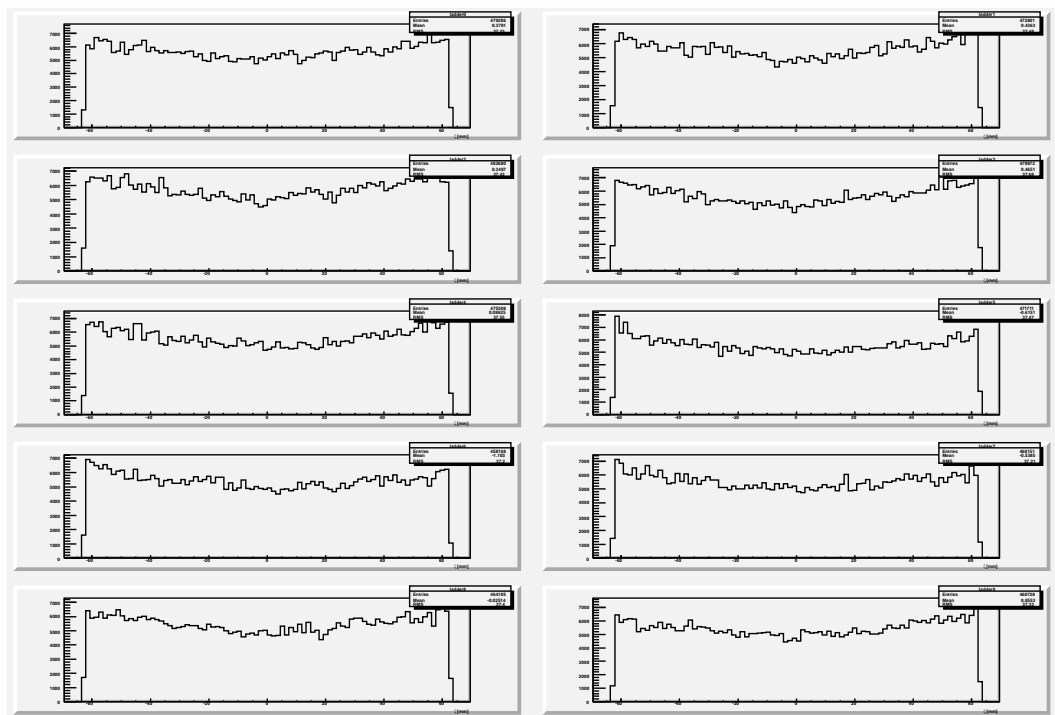


図 C.142: レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

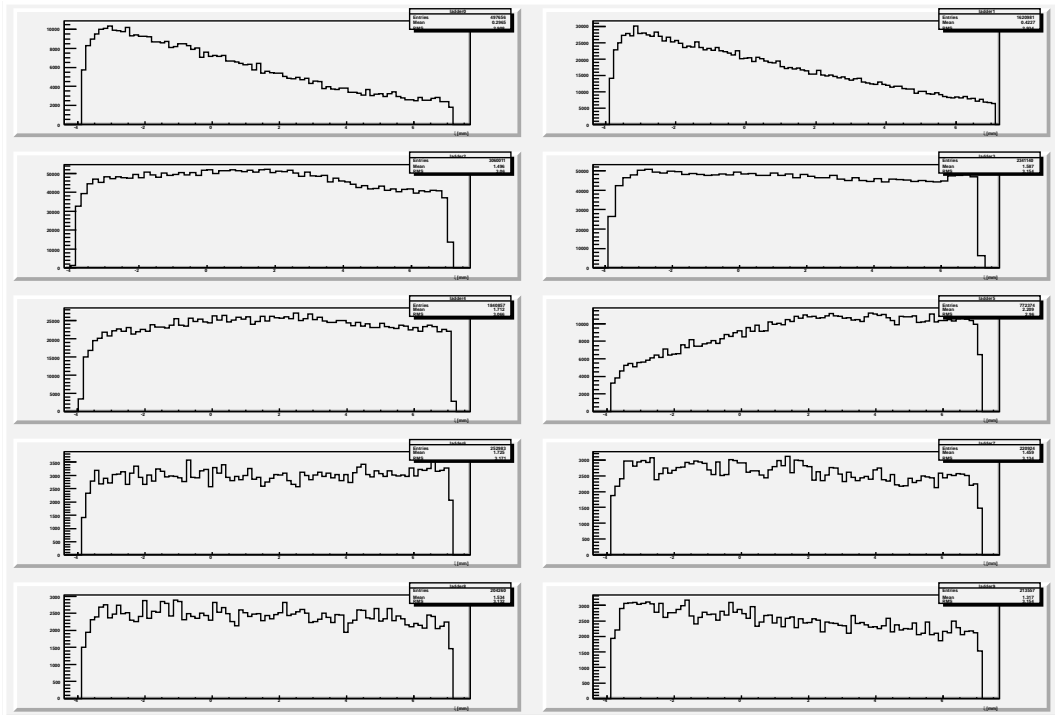


図 C.143: レイヤー 1 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

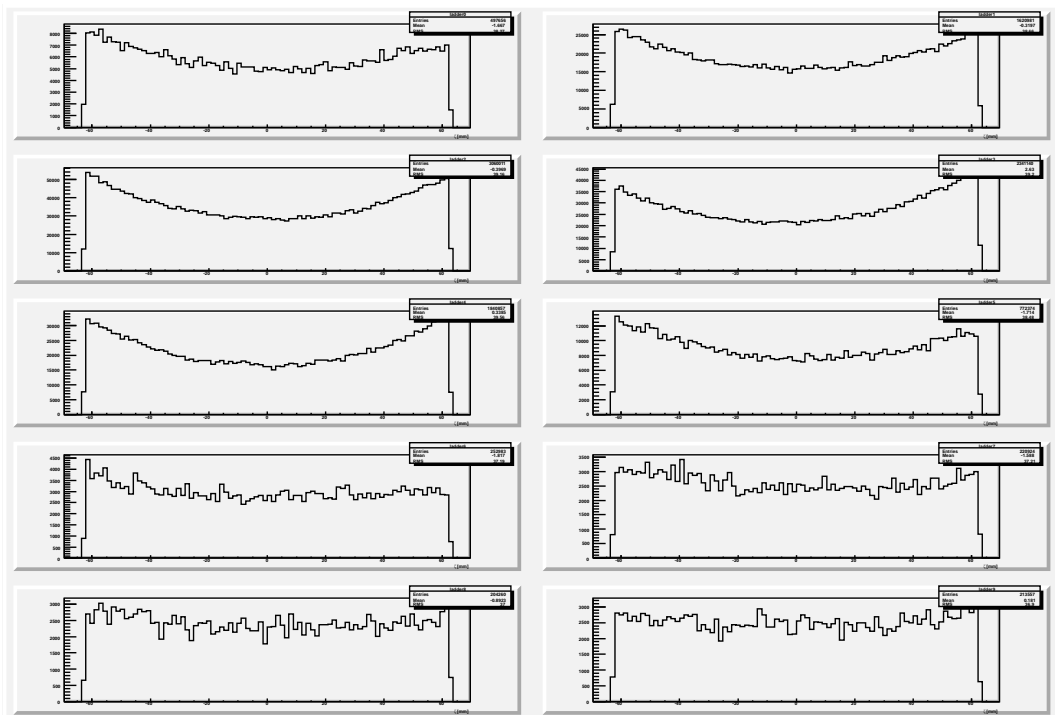


図 C.144: レイヤー 1 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

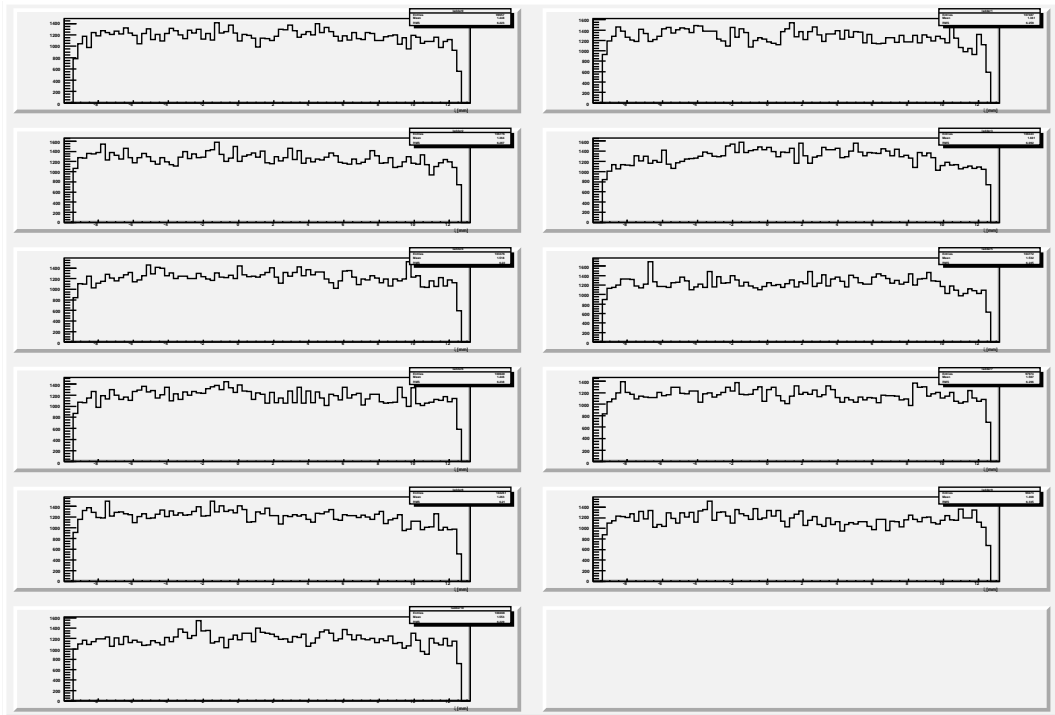


図 C.145: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV)

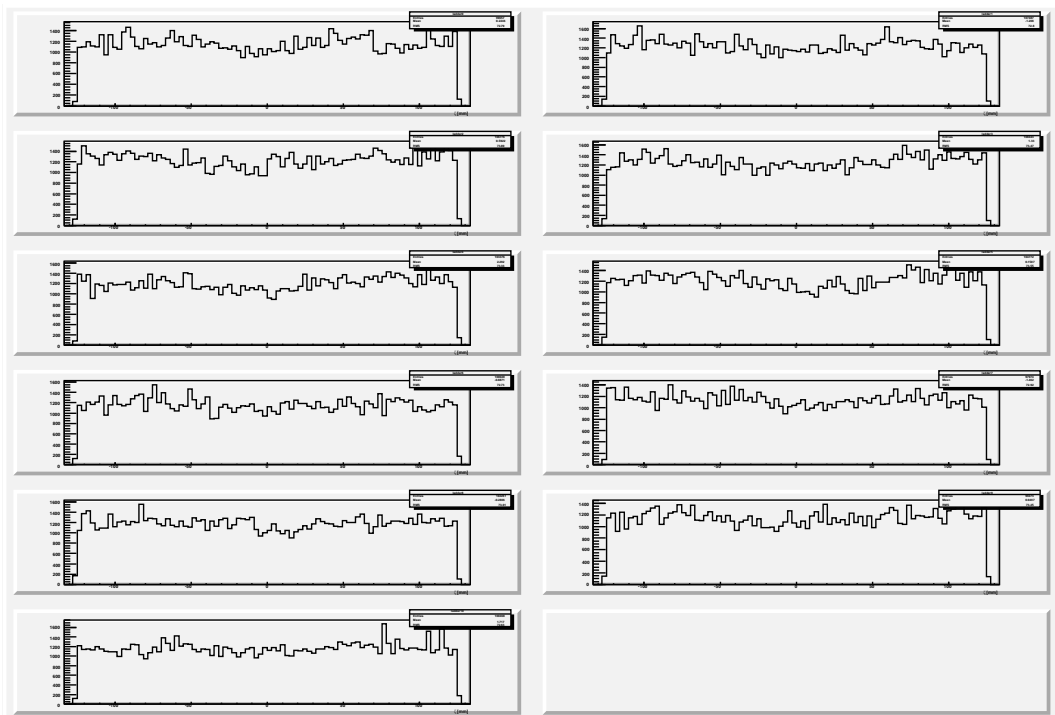


図 C.146: レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV)

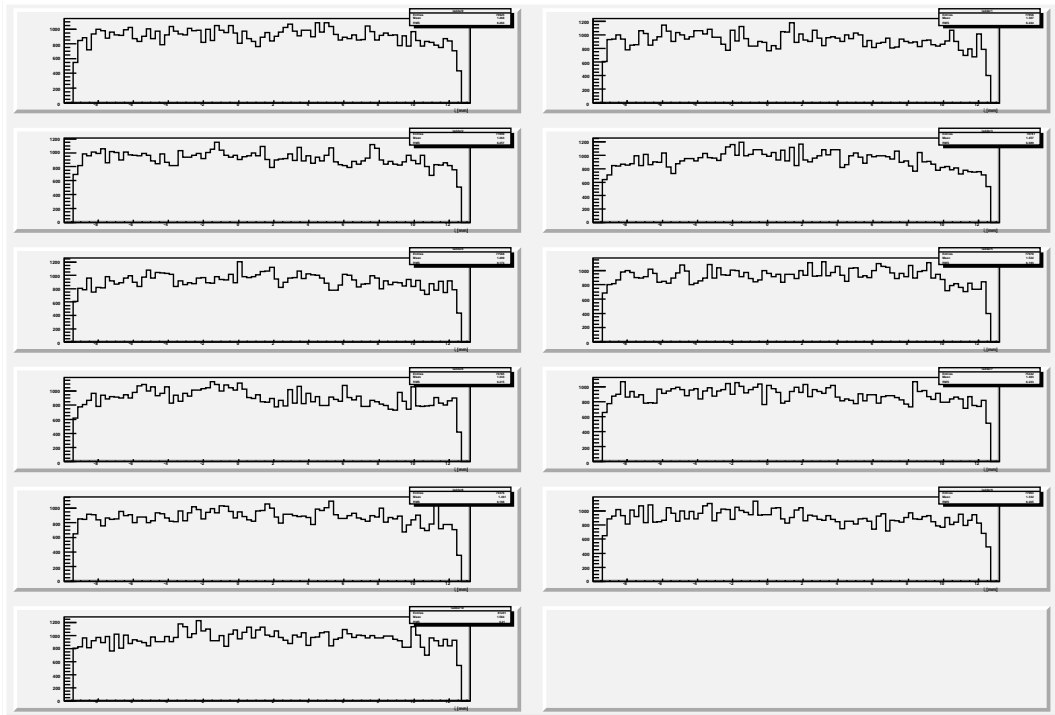


図 C.147: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

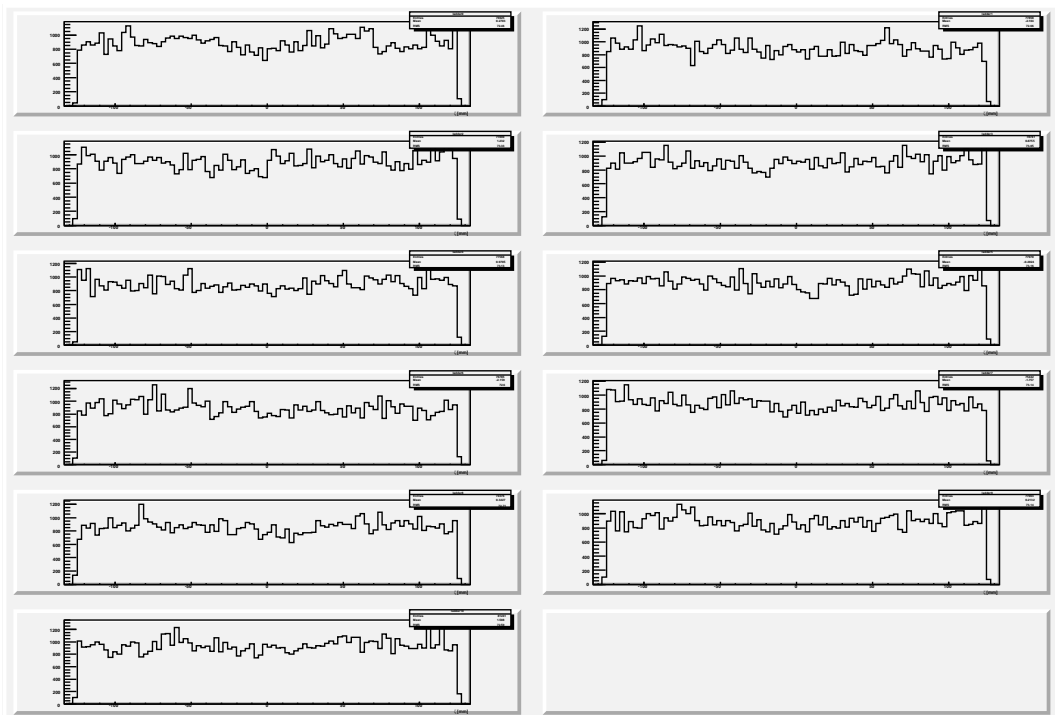


図 C.148: レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

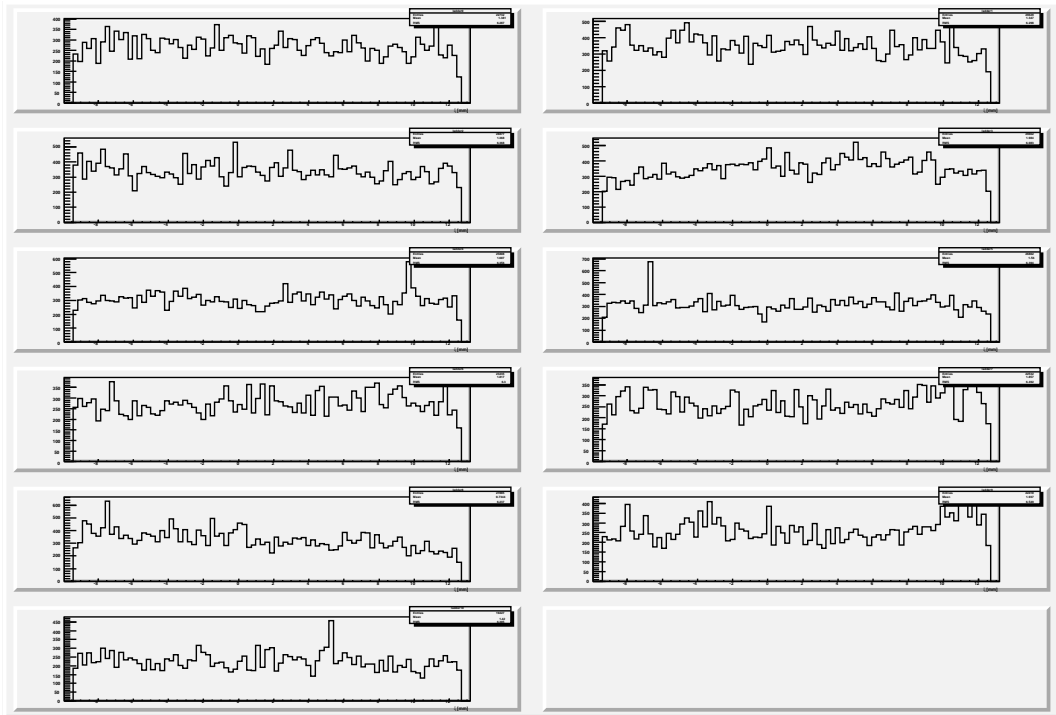


図 C.149: レイヤー 2 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

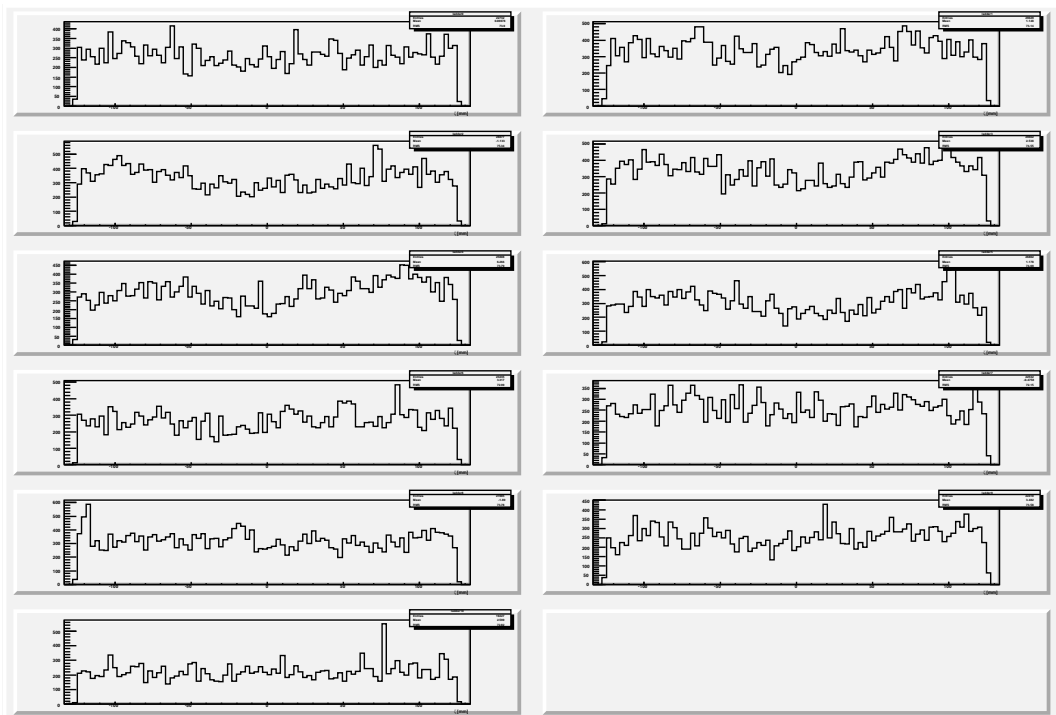


図 C.150: レイヤー 2 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

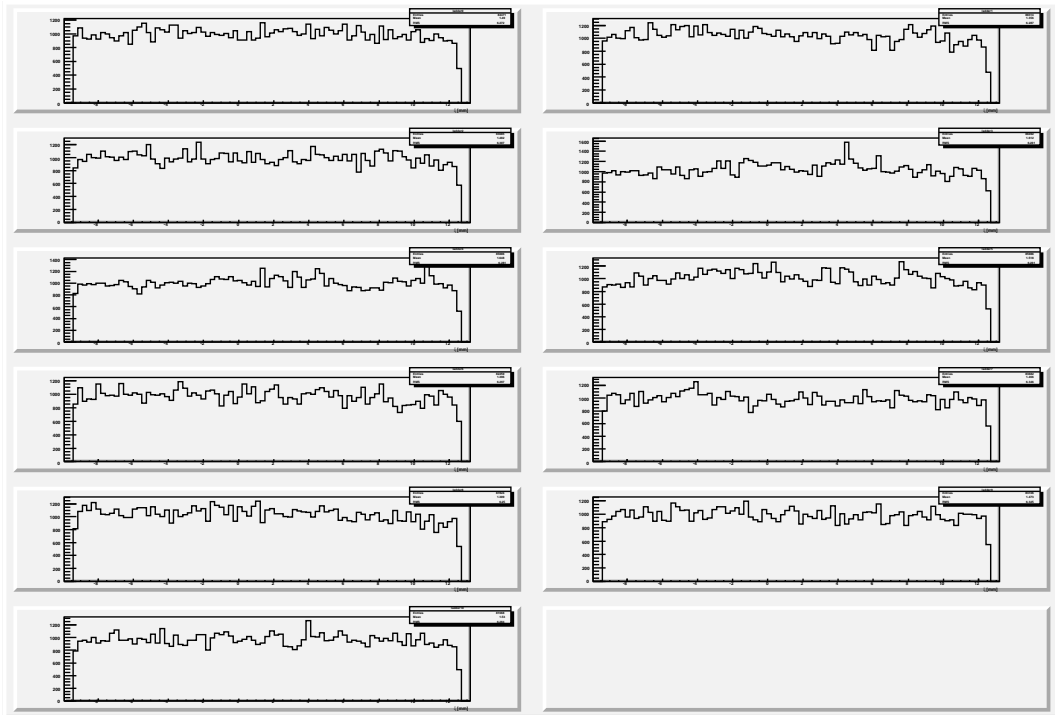


図 C.151: レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV)

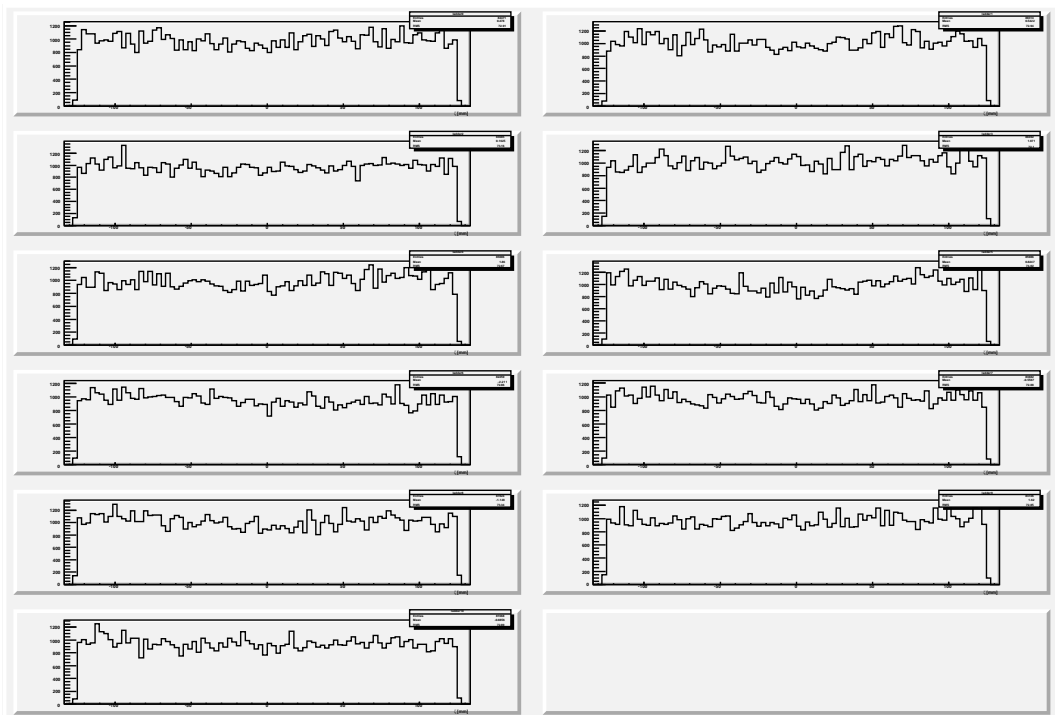


図 C.152: レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV)

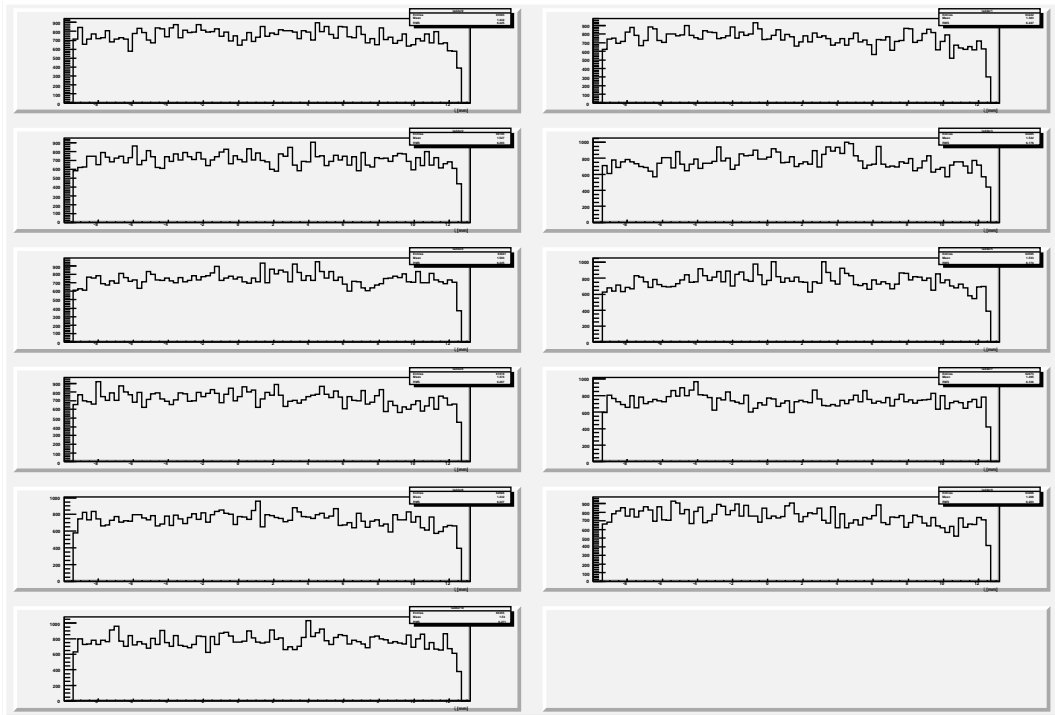


図 C.153: レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

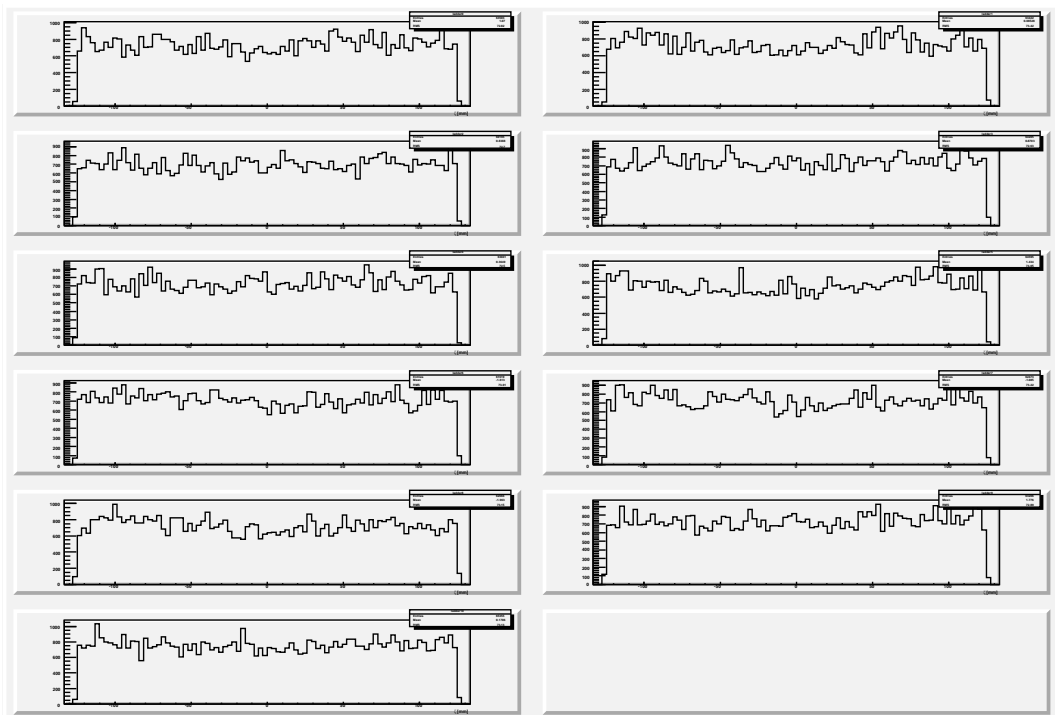


図 C.154: レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

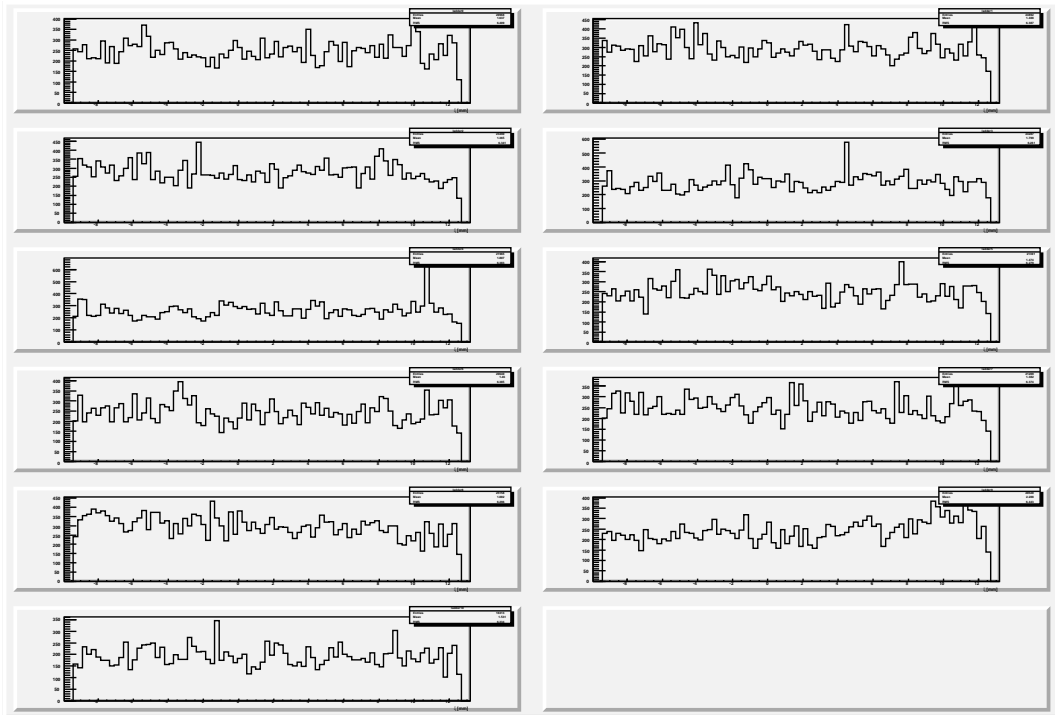


図 C.155: レイヤー 3 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

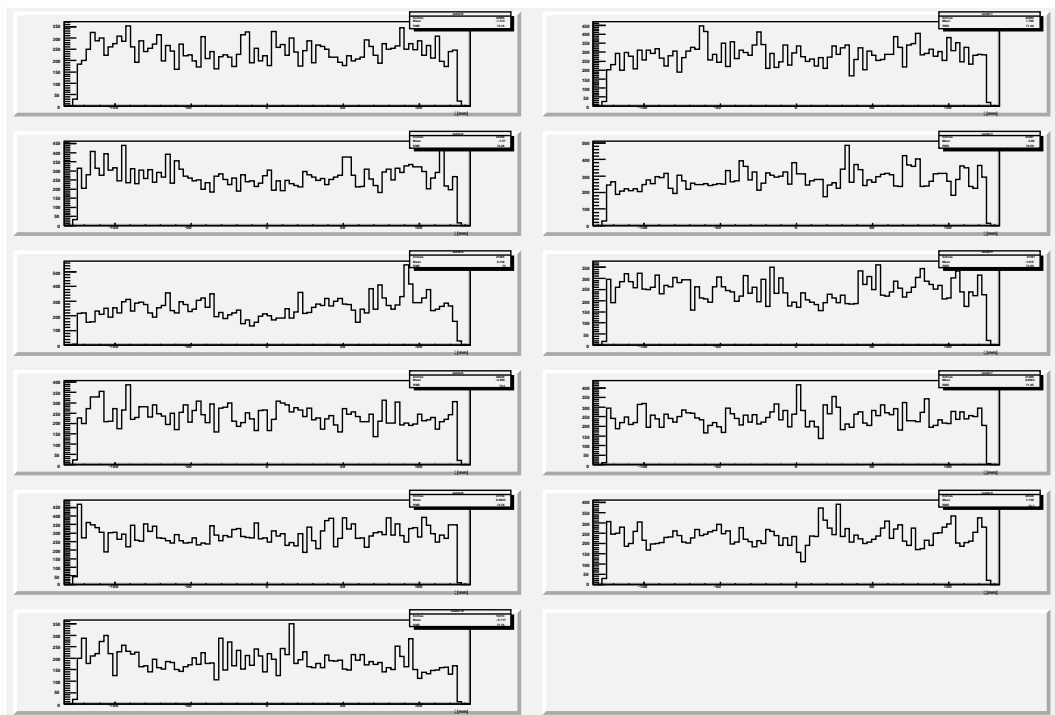


図 C.156: レイヤー 3 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

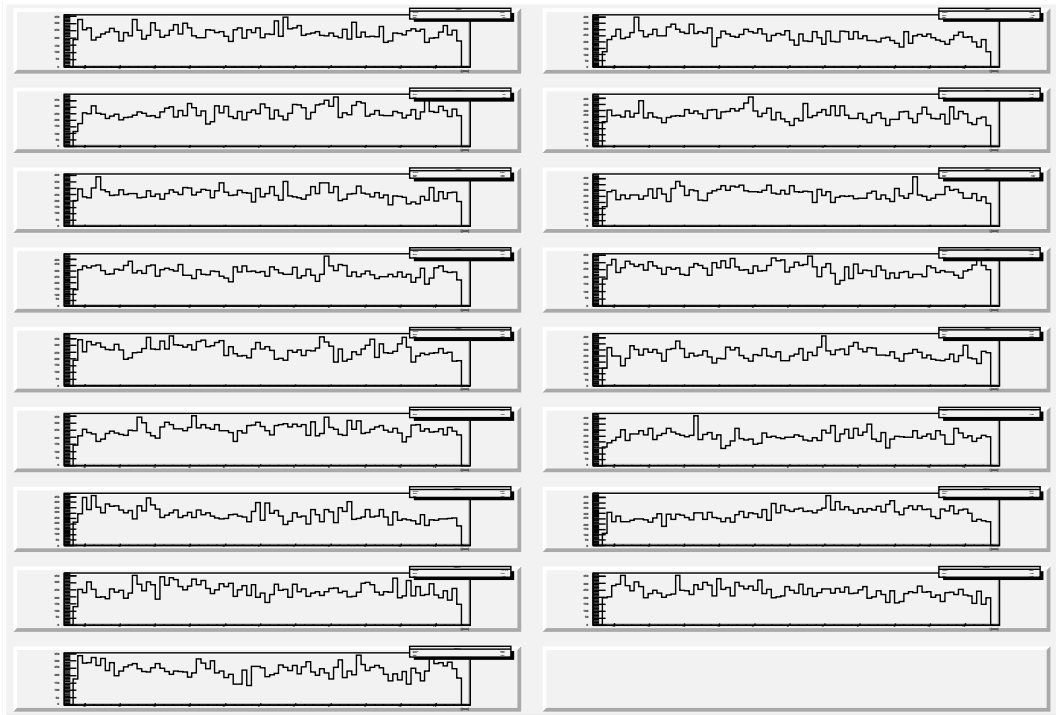


図 C.157: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV)

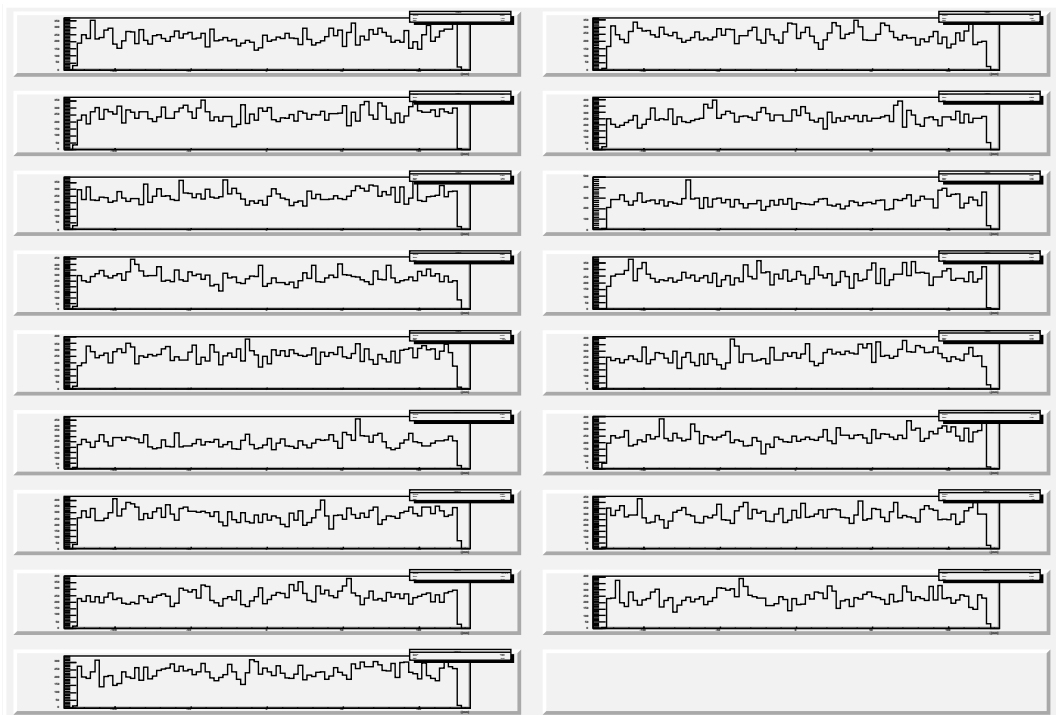


図 C.158: レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV)

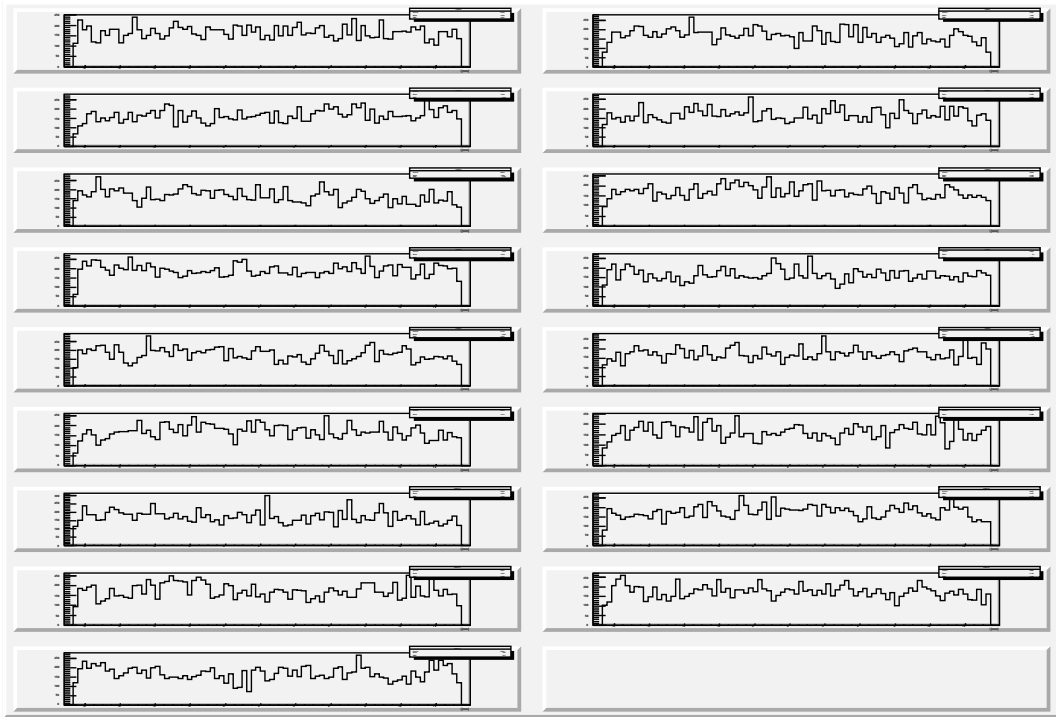


図 C.159: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

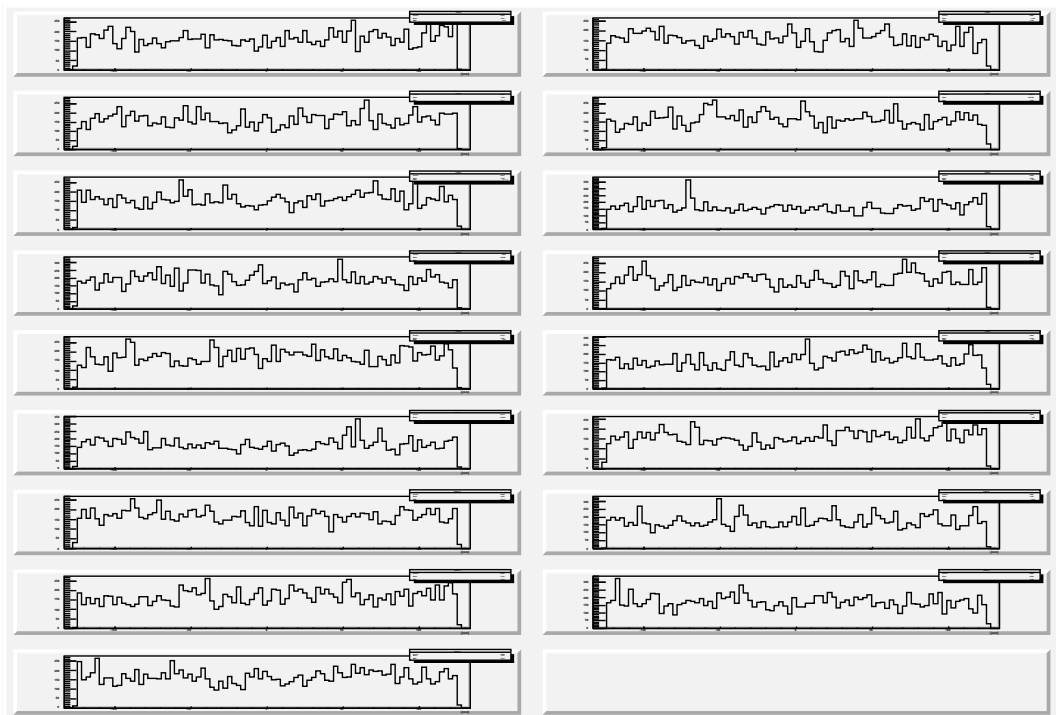


図 C.160: レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

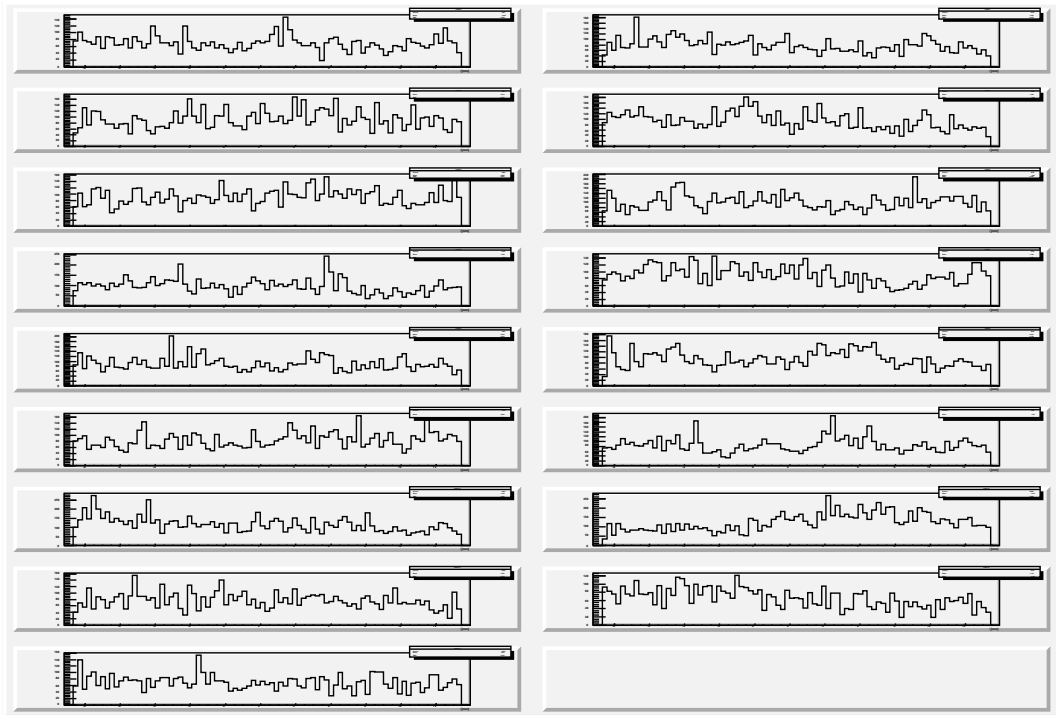


図 C.161: レイヤー 4 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

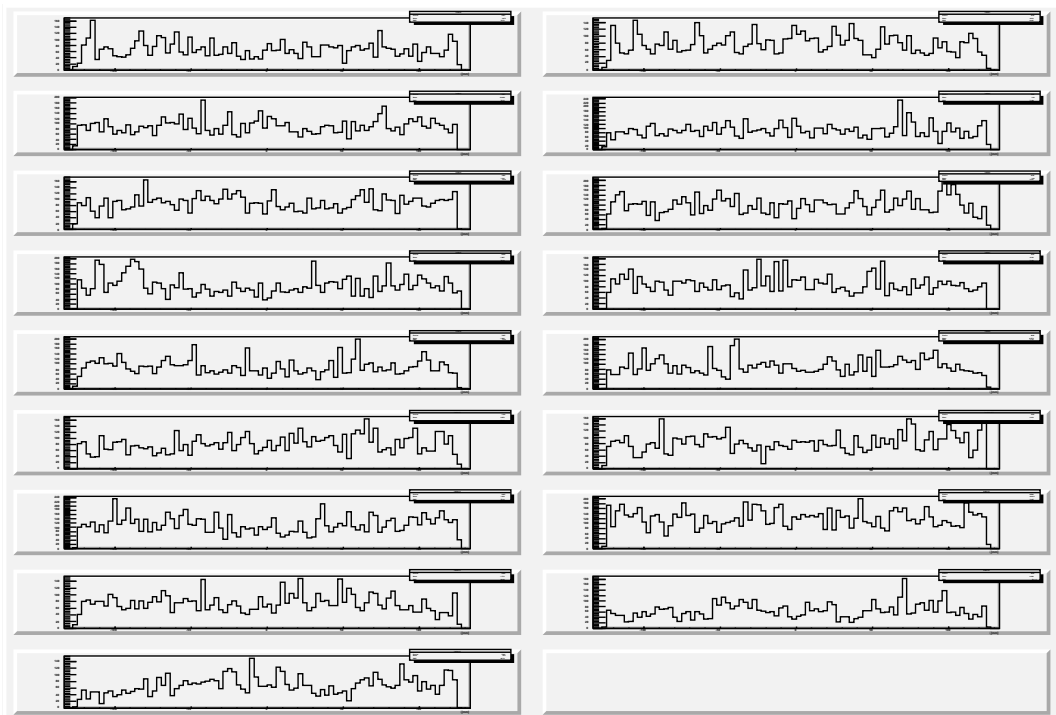


図 C.162: レイヤー 4 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

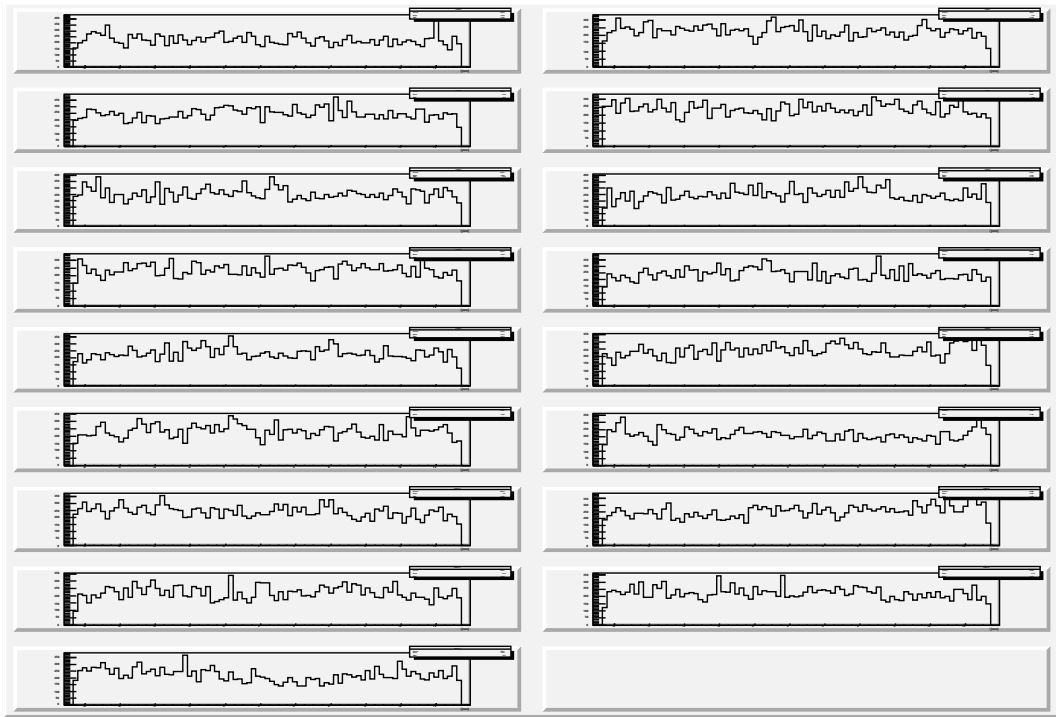


図 C.163: レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV)

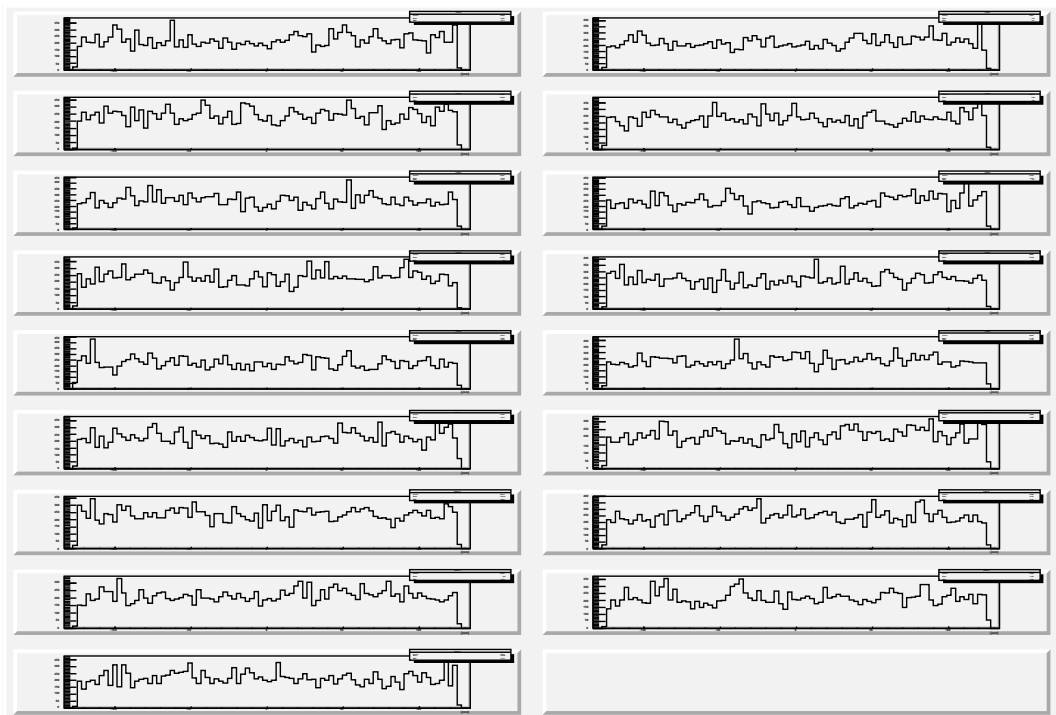


図 C.164: レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV)

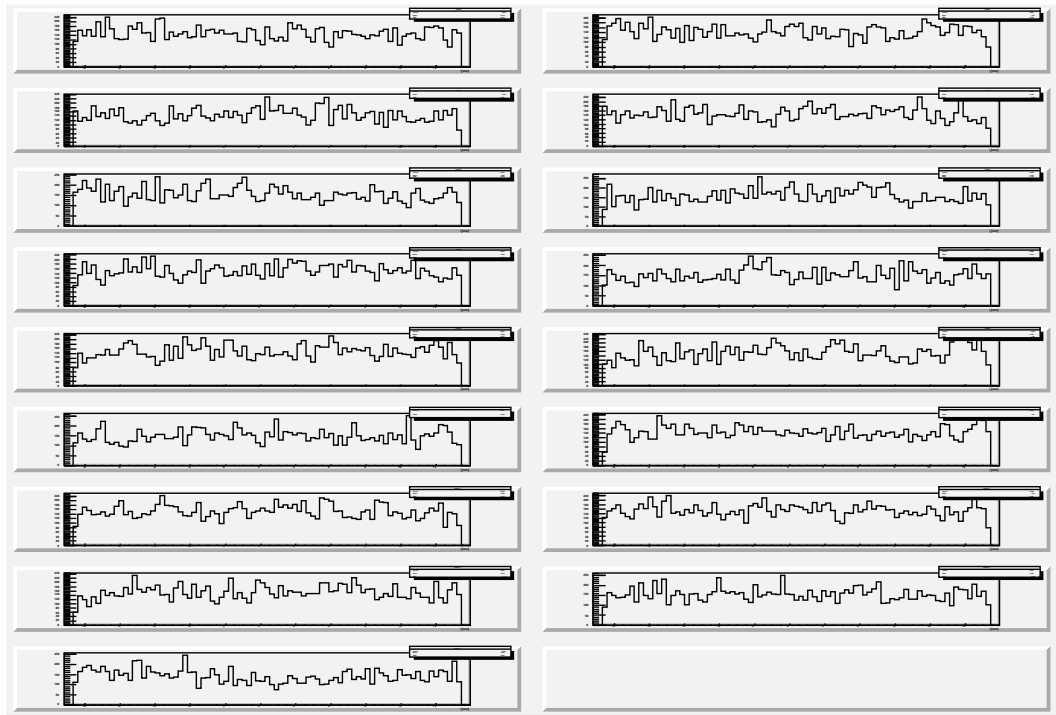


図 C.165: レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

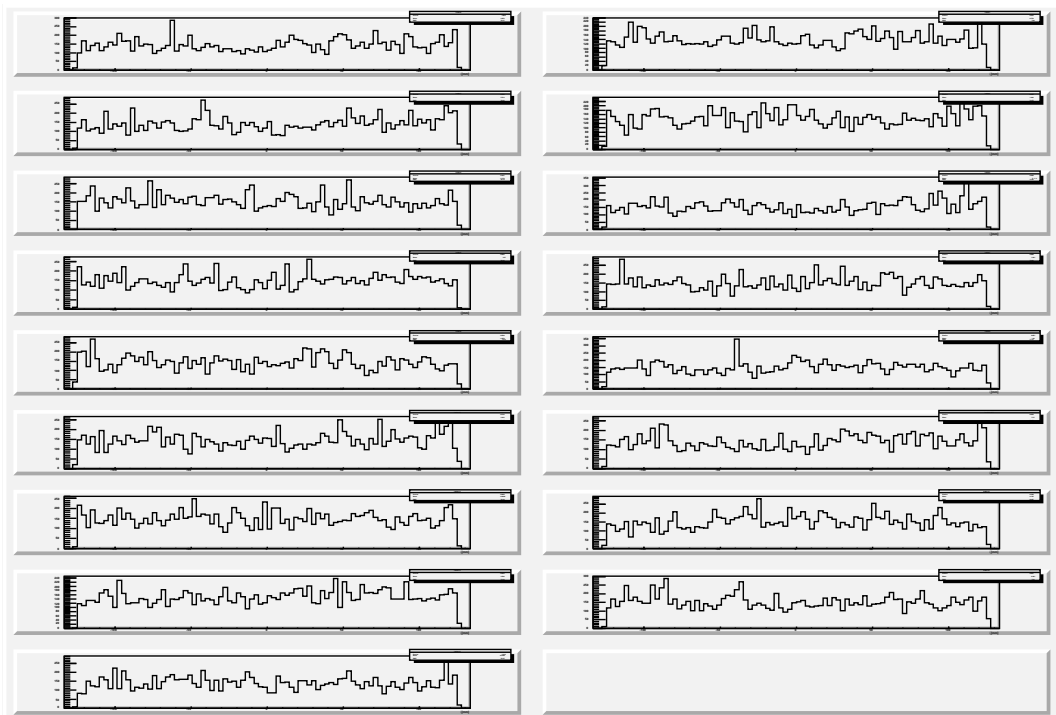


図 C.166: レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、直接ペア)

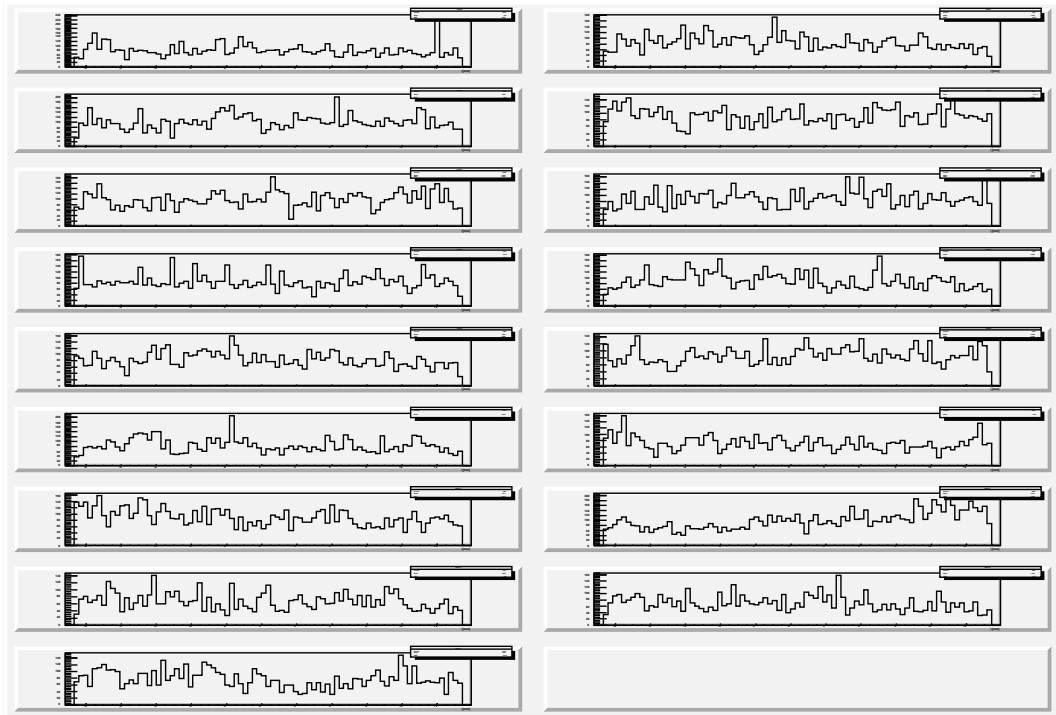


図 C.167: レイヤー 5 の各ラダーの ξ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

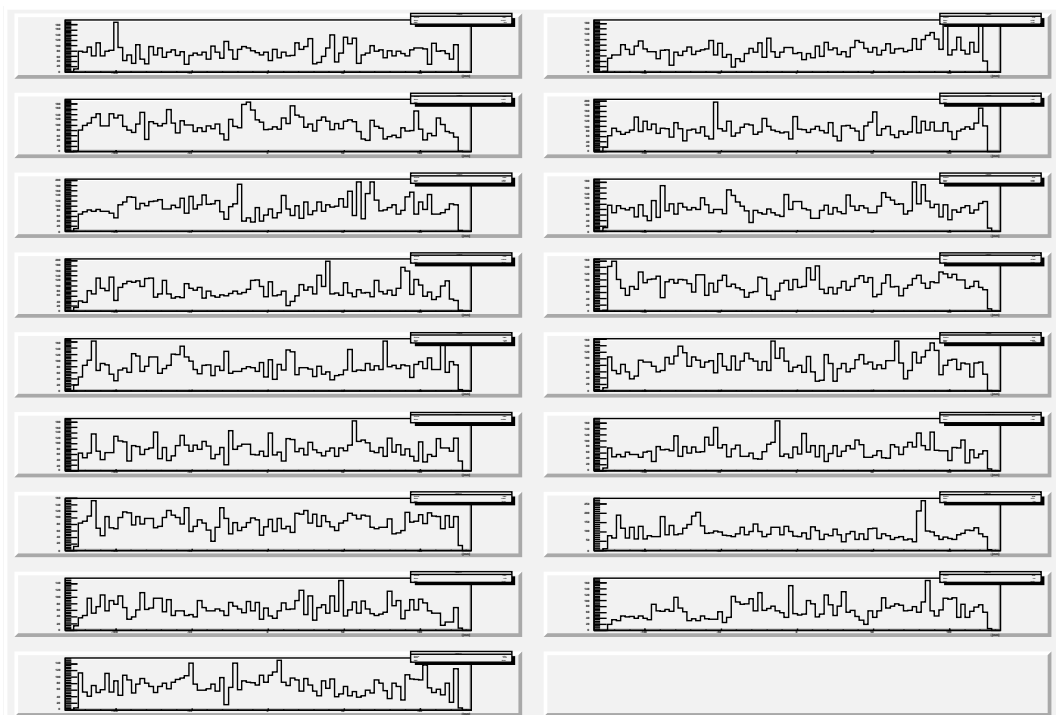


図 C.168: レイヤー 5 の各ラダーの ζ 分布 (1000 GeV、反跳ペア)

謝辞

本研究に助力していただいた方々に感謝の意を表したいと思います。

KEK の宮本さんはこの研究活動において最も協力して頂きました。毎週のテレビ会議では的確なアドバイスを、またメールでの質問にいつもお応えして頂きました。その度に自分の中の崩壊点検出器の見方が広がるのを実感していました。また修士一年の頃、ILCSOFT の使い方が良く分かっていなかった時に KEK に直接お伺いした時も、まどろっこしい自分に辛抱強く教えていただきました。自分の研究者としてのキャリアについて、シミュレーションを続けるか、ハードウェアの研究に移行するか相談もして頂きました。修士論文も大晦日、正月休みにも関わらず添削していただきました。

KEK の杉本さんはテレビ会議で特にハードウェアの視点からのシミュレーションに対するアドバイスを頂きました。発表練習もいつも見ていただきました。

現在、九州大の末原さんには FPCCD 試作機のビームテストの DAQ プログラムにおいて助力して頂きました。また洗練されたプログラミングの技を教えてくださいました。フレーバータグの性能評価においてはメールで良く質問し、的確なアドバイスを頂きました。

スタッフの石川さんには研究方針についてよく相談させて頂きました。学振の書類を書いた時も拙い文章の添削をしていただきました。スライドの作成のアドバイスを頂いたり、発表練習にいつも付き合ってくださいました。また、研究者としての立ち振舞いについて多くを学ばせてもらいました。研究室の博士の方々の博士論文の添削でお忙しい中、修士論文の添削もしていただきました。

佐貫先生には素粒子物理学の輪講をしていただきました。また、様々な分野の先生方との飲み会を主催していただき、その中で視野を広げることができました。

スタッフの長嶺さんにはテレビ会議システムの調子が悪い時にいつも助けていただきました。中々解決できないパソコンのトラブルも、いつも解決していただきました。

D3 の齊藤さんには ILC の物理や実験に関する基礎的なことについて良く質問させていただきました。院生、研究者としての生き方や、方針についても相談していただきました。

D2 の釜井さんには FPCCDDigitizer、FPCCDClustering の思想、考え方を教えてくださいました。メールや電話でも研究の相談にお応えしていただきました。

D2 の加藤さんには FPCCD のハードウェアとしての基本を教えてくださいました。研究のことや、外国人の方への英語でのメールの書き方についても良く相談していただきました。

同期の堀口君、篠田君にはお互いの研究について話や質問をしたり、将来について

話したり、時には励まし合いました。お陰で寂しい思いはしないで済んだと思っています。

山本先生にはこの研究テーマを与えてもらいました。グループミーティングでは研究に対する鋭い指摘を頂きました。そして毎回の学会への旅費の補助は大変ありがたいことだったと思います。

最後に、研究が中々上手くいかない時にも自分をいつも応援し続けてくれた両親に心から感謝しています。ありがとうございました。

参考文献

- [1] ILC Technical Design Report Volume 1 - Executive Summary,
<http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>, 2012.
- [2] ILC Technical Design Report Volume 3 - Accelerator,
<http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>, 2012.
- [3] ILC Technical Design Report Volume 4 - Detectors,
<http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>, 2012.
- [4] 齊藤智之、修士論文「国際リニアコライダのための崩壊点検出器用高精細 CCD の読み出しシステムの研究開発」東北大学 (2011)
- [5] 山本歩、修士論文「ILC 実験におけるヒッグスポータルモデルでのヒッグス-暗黒物質結合定数の測定精度の評価」東北大学 (2013)
- [6] ILD 日本グループ、「ILD 測定器開発プロポーザル」、(2009)
- [7] LCFIPlus, <https://confluence.slac.stanford.edu/display/ilc/LCFIPlus>
- [8] Boosted Decision Trees in the TMVA package in ROOT,
http://root.cern.ch/root/html/doc/TMVA_MethodBDT.html
- [9] David Griffiths, "Introduction to Elementary Particles" WILEY-VCH, 2008.
- [10] ILC Technical Design Report Volume 2 - Physics,
<http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>, 2012.
- [11] ILCSoft, <http://ilcsoft.desy.de/portal>
- [12] Mokka, http://ilcsoft.desy.de/portal/software_packages/mokka/
- [13] Geant4, <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- [14] Kohei Yoshida, Daisuke Kamai, Akiya Miyamoto, Yasuhiro Sugimoto, Yosuke Takubo, Hitoshi Yamamoto, "Simulation Study of FPCCD Vertex Detector", arXiv:1006.3421,
- [15] 釜井大輔、修士論文「国際リニアコライダにおける高精細 CCD 崩壊点検出器のためのシミュレーション研究」東北大学 (2012)

-
- [16] N.I. Chernov, G.A. Ososkov, "Effective Algorithms For Circle Fitting", Computer Physics Communications 33(1984), 329-333
- [17] Keisuke Fujii, The ACFA-Sim-J Group, "Extended Kalman Filter", <http://www-jlc.kek.jp/subg/offl/kaltest/doc/ReferenceManual.pdf>
- [18] Guinea Pig, <http://www-sldnt.slac.stanford.edu/snowmass/Software/GuineaPig/>
- [19] Physsim, <http://www-jlc.kek.jp/subg/offl/physsim/>
- [20] Particle Data Group, particle listings, GAUGE AND HIGGS BOSONS, <http://pdg.lbl.gov/2013/listings/rpp2013-list-z-boson.pdf>
- [21] Thomas Krämer, Track Parameters in LCIO, <http://www-flc.desy.de/lcnotes/notes/LC-DET-2006-004.pdf>, 2006.