修士論文

ILCハドロンカロリメータ用検出層の性能向上に 関する研究と大型技術試作機のビーム試験

Study on performance improvement of active layer for ILC hadron calorimeter and beam test of large technological prototype

> 東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 素粒子物理国際研究センター森研究室

> > 35 - 176073

鳥丸 達郎

ILC計画は次世代の電子・陽電子線形加速器計画であり、エネルギーフロンティア加速器として CERN のLHC と相補的に標準模型を超える新物理探索に貢献する世界規模の計画である。

ILCの検出器案の一つである ILD は日本と欧州を中心に研究開発が進められている。中でもハドロン カロリメータはドイツの DESY を中心に試作機の試験が盛んに行われており、すでにデザイン性能を上 回る測定結果が得られている。また、コストも考慮した試作なども行われている。

ILCのハドロンカロリメータはハドロンジェットのエネルギー分解能を向上させるため高精細なデザ インとなっており、検出層のチャンネル数にして合計約800万個ある。そのため実機製作時にコスト削減 が重要な因子になる。1チャンネルは1個のSiPMによる読み出しと反射材で覆われた30×30×3 mm³ のシンチレータタイルのセルユニットから成り、本研究では低コストかつ高性能なプラスチックシンチ レータの開発を試みた。本研究で新たに製作したプラスチックシンチレータの光量は、先行研究と比較 しつつ性能の評価を行い、PVT比の~71%を獲得し実機に搭載するのに必要となる性能として遜色の ない結果を達成した。さらに、タイルのデザインの最適化を容易に行うことができるGeant4によるシ ミュレーションパッケージを構築し、実験データとの比較を行いシミュレーションの正当性を確認した。

DESY を中心とする AHCAL グループは過去最大の AHCAL 大型技術試作機を 2018 年春ごろに完成 させ、同年夏 CERN の SPS にてテストビーム試験を行い、ハドロンイベントに対する応答を調査した。 その過程として、DESY にて検出層の宇宙線試験、ビーム試験を重ね、建設を行ってきた。検出層の各 チャンネルのゲイン、ペデスタルの較正を行ったのち、宇宙線試験とビーム試験による検出層の応答の 比較を行うことで定量的に評価を行った。宇宙線試験の結果として試験されたチャンネルの検出効率が 平均で 92.8 % と十分な性能であることが確認できた。さらに、CERN におけるビーム試験のデータ解 析として補助の検出器を用いたイベント選別と大型技術試作機で得られるエネルギーの補正を行った。 その結果、一つのイベント選別の手法を確立し、適切なウェイトをかけることによりエネルギー分布を 改善することができた。

概要

目 次

第Ⅰ部	序論	4
第1章	ILC	5
1.1	ILC の物理	5
	1.1.1 ILCの性能	5
	1.1.2 250 GeV の ILC 物理	7
1.2	ILC の加速器	7
	1.2.1 超伝導 RF 主線形加速器	8
	1.2.2 電子・陽電子源	8
	1.2.3 ダンピングリング	9
	124 RTML	10
1.3	II.Cの検出器	11
1.0	131 プッシュプル方式	11
	132 ILD	11
	1.3.3 Particle Flow Algorithm (PFA)	15
		10
第2章	AHCAL	18
2.1	AHCAL の全体の構造	18
	2.1.1 吸収層	18
	2.1.2 検出層	19
2.2	HBU	20
2.3	DAQ	23
笋TT - 如	検出層の性能向上の研究)5
		10
第3章	シンチレータ発光量の改善	26
3.1	有機プラスチックシンチレータの成形と発光量	26
	3.1.1 キャスト成形	26
	3.1.2 射出成形	26
3.2	高性能射出成形シンチレータの開発	27
	3.2.1 有機プラスチックシンチレータと発光剤	27
	3.2.2 先行研究	27
	3.2.3 実験装置と実験サンプル	28
	3.2.4 測定方法	32
	3.2.5 結果と考察	33
	3.2.6 さらなる試行と考察	34
第4章	シミュレーションによるセルユニットの最適化	36
4.1	Geant4(GEomerty ANd Tracking)	36
4.2	optical photonの伝播機構	38
	4.2.1 シンチレーション光の発生	38

	4.2.2	MPPC パッケージ	39
	4.2.3	物質間の境界状態.................................	39
	4.2.4	物質の表面状態	39
	4.2.5	反射の種類	40
	4.2.6	吸収長	40
4.3	シミュ	レーション方法	40
4.4	結果と	考察	42

第 III 部 大型技術試作機の試験

 $\mathbf{43}$

2

第5章	大型技術試作機の建設	44
5.1	AHCAL 大型技術試作機	44
5.2	宇宙線試験装置による試験	45
	5.2.1 宇宙線試験装置の性能	45
	5.2.2 実験セットアップ	45
	5.2.3 飛跡選別	48
	5.2.4 較正	48
	5.2.5 アライメント	50
	5.2.6 HBU のチャンネルの応答結果	53
	5.2.7 検出効率	53
5.3	テストビームによる試験	54
	5.3.1 検出層試験完了までの流れ	54
	5.3.2 ビームライン	56
	5.3.3 実験セットアップと方法	56
	5.3.4 電子ビームによる較正結果	58
	5.3.5 宇宙線試験との比較	58
第6章	大型技術試作機のビーム試験	62
6.1	ビームライン	62
6.2	セットアップ	64
6.3	ビームテストで取得したデータの概要................................	66
6.4	Preshower 検出器によるイベント選別	68
	6.4.1 選別の過程	68
	6.4.2 結論	74
	6.4.3 他のビームでの選別結果	75
6.5	Tail Catcher を用いたデータ解析	75
	6.5.1 エネルギー漏れ	77
	6.5.2 エネルギー補正	78

第 IV 部 結論

第7章	現状と展望	85
7.1	現状	85
7.2	シミュレーションを用いたさらなる試み..............................	85
7.3	エネルギー補正の見通し	85

84

第8章	まとめ	90
8.1	シンチレータタイルの開発	90
8.2	AHCAL 大型技術試作機の建設における検出層試験	90
8.3	AHCAL 大型技術試作機のビーム試験	90
第 V 部	付録	95

付 録 A 90 Sr と MIP のエネルギーデポジットの相違

3

96

第I部

序論

第1章 ILC

素粒子物理学において、確固たる地位が確立されていながら未完成であった標準理論は長年 Higgs 粒子の存在を予言していた。そしてついに、2012 年の Counseil Europeen pour la Recherche Nucleaire (CERN、欧州原子核研究機構)での発見により標準理論は完成された。しかしながら、標準理論では説明のつかないニュートリノ振動が揺るがない実験事実として確立しているほか数々の人智を超えた自然現象が観測されており、標準理論を超える新物理に関する研究が盛んに行われている。

新物理研究の一つとして International Linear Collider (ILC、国際リニアコライダー)計画がある。 ILC は CERN の The Large Hadron Collider (LHC) と比肩するエネルギーフロンティア加速器で次世 代の電子・陽電子線形衝突型加速器基幹計画である。2013 年に ILC 技術設計書が完成し、ILC は概略図 として図 1.1 のようなデザインとなった。



図 1.1: ILC の概略図 [1]

1.1 ILCの物理

1.1.1 ILC の性能

ILC は電子と陽電子を線形にそれぞれ加速させ、衝突点で起こった現象を探る次世代の線形衝突型加速器である。

先進的な素粒子物理学の研究を行ってきた LHC であるが、陽子陽子の複合粒子同士の衝突反応を見 るハドロンコライダーであるために全エネルギーの一部が主反応を起こす粒子以外の構成粒子に持って 行かれてしまう。そのため、非常に多い背景事象が発生し(図 1.2 の左)調べたい信号の解析が困難と なる。一方、ILC は電子と陽電子の素粒子同士の対消滅衝突反応であるため、以下のような特徴を持つ。

- 背景事象の少ないクリーンな環境で解析可能
- 四元運動量保存則が適用可能
- すべての崩壊モードの解析を行い新粒子探索に最適
- 特定の粒子生成断面積の閾値精密測定



図 1.2: 左: ATLAS 実験の $WH \rightarrow l\nu bb$ の信号 [7]。 右: ILD シミュレーションによる ILC の $e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow e^+e^-h$ の信号 [8]。ATLAS 実験に比べ ILC は背景事象が非常に少ないクリーンな環境であること がわかる。

また、線形加速器ならではの特徴がいくつか挙げられる。線形であるために単純に加速部分を拡張す るだけでエネルギーを増加させることが可能でエネルギー拡張性に優れている。ビーム構造が5 Hz の パルス、バンチ*間隔が554 ns と衝突のタイミングが既知であるためにトリガーなしで全てのデータを 得ることができる。最後に、ビーム偏極の調整が全エネルギーを通して可能であるという強力な特徴を 持ち、衝突粒子のヘリシティを調整して測定したい反応の生成率の向上(図 1.4 の中央 $e^-e^+ \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_e h$) や背景事象の抑制(図 1.3)を可能とする。



図 1.3: 偏極の調整によって WW 融合反応が抑制され超対称性ミューオンの信号が見えるようになる様 子を示したシミュレーション結果 [6]。

1.1.2 250 GeVのILC 物理

ILC の第一フェーズとして重心系エネルギー 250 GeV で稼働を始める。これは図 1.5 に示してあるように重心系エネルギー $\sqrt{s} = 250$ GeV で $e^+e^- \rightarrow Zh$ 随伴生成過程の断面積がピークを迎え、LHC での Higgs 粒子発見を受けてその性質を調査するのが急務である今、Higgs ファクトリーとしての役割を 持ち精密測定に最適であるからである。



図 1.4: 主な Higgs 粒子生成過程。左から $e^+e^- \rightarrow Zh$ 、 $e^+e^- \rightarrow \bar{\nu}_e\nu_eh$ 、 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-h$ 。



図 1.5: Higgs 粒子の生成過程の断面積。左:ビーム偏極は P(e⁻, e⁺) = (-0.8, 0.3) を仮定している [2]。 右:ビーム偏極はなし [5]。

Higgs 随伴生成過程 $(e^+e^- \rightarrow Zh)$ は、Higgs 粒子の質量精密測定に非常に強力な反応である。Z ボソンは長年の研究により性質をよく知っているので、Z ボソンのフェルミオン対への崩壊を正確に再構成し四元運動量保存則を適用することで Higgs 粒子の反跳質量 M_{recoil} を以下のように求められる。

$$M_{\rm recoil}^2 = (\sqrt{s} - E_{ff})^2 - |\vec{p}_{ff}|^2 \tag{1.1}$$

ここで *E*_{ff} と *p*_{ff} はそれぞれフェルミオン対のエネルギーと運動量である。このように運動学的に求めら れた質量計算は、Higgs 粒子から崩壊した粒子を再構成して直接測定するより精度が高く、また、Higgs 粒子の崩壊の不定性を無視できる利点がある。この Higgs 粒子の精密測定により結合定数の同定を行い、 標準理論を超える新物理発見に迫る。

表 1.1 に 250 GeV の Higgs 粒子精密測定以降の ILC の稼働計画と目指す物理を示しておく。

1.2 ILCの加速器

ILCの加速器の役割は、大まかには電子源、陽電子源で衝突粒子を発生させダンピングリングでビームを絞り主線形加速器で加速させることである。

$E_{\rm cm}$	積分ルミノシティ	信号事象	測定目的		
$250~{\rm GeV}$	$500 {\rm ~fb^{-1}}$	$e^+e^- \rightarrow Zh$	Higgs 精密測定		
$350~{\rm GeV}$	$200 {\rm ~fb^{-1}}$	$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$	トップクォーク精密測定		
		$e^+e^- \to Zh$	Higgs の統計増加		
		$e^+e^- \rightarrow \nu \bar{\nu} h$	hWW 結合の精密測定の開始		
$500~{\rm GeV}$	$5500 {\rm ~fb^{-1}}$	$e^+e^- \to f\bar{f}$	Z* の探索		
		$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}h$	トップ湯川結合		
		$e^+e^- \to Zhh$	Higgs 自己結合		
		$e^+e^- \rightarrow \tilde{\chi}\tilde{\chi}, \tilde{\tau}\tilde{\tau}$	超対称性粒子探索		
		$e^+e^- \rightarrow AH, H^+H^-$	拡張 Higgs 模型		

表 1.1: ILC のシナリオ [12]

1.2.1 超伝導 RF 主線形加速器

ILCの主線形加速器には粒子が15 GeV の状態から運搬されて、図1.6 のクライオモジュールと呼ばれる2Kで運転する高純度ニオブ製の超伝導加速空洞に平均で加速勾配31.5 MV/m での強電場をかけ最終的に欲しいエネルギーまで加速させる。マイクロ波を流すことで粒子が1セルを通過すると同時に位相が反転して加速し続ける。



図 1.6: 超伝導加速空洞 [2]

1.2.2 電子·陽電子源

電子源

偏極電子は、GaAsに偏極したレーザーを照射することで生成され、90%偏極された電子のバンチト レインが直流高電圧電子銃(DC銃)から供給される。常伝導の環境でバンチ化し76 MeVまで加速さ せ、エネルギーコリメータによりバンチのエネルギーを揃え、次に ILC クライオモジュールで5 GeV までビームが加速される。そして、超伝導ソレノイドコイルで電子のスピンが垂直に揃えられ、最後に ビームのエネルギーの広がりを圧縮したのちにダンピングリングに運ばれる。図 1.7 が電子源のレイア ウトである。

陽電子源

陽電子は光子による電子陽電子対生成から収集する。主線形加速器によって加速された電子ビームは、 電子軌道を螺旋状にして円偏光放射光を得る超伝導ヘリカルアンジュレータに運ばれ 10 - 30 MeV の放



図 1.7: 偏極電子源 [3]

射光を放射する。放射光は回転する厚さ 0.4X₀[†]のチタン合金製標的に当たり電子陽電子対生成する。こ れを 125 MeV まで加速させ磁場をかけて陽電子のみ回収する。さらに 400 MeV まで加速させ電子と同 様 ILC クライオモジュールで 5 GeV まで加速させ超伝導ソレノイドコイルでスピンを垂直にし、エネ ルギー圧縮を行ってダンピングリングに運ばれる。基本設計では偏極率 30 % がデザインされているが、 アンジュレータのアップグレードにより将来的に 60 % に向上させることも計画している。図 1.8 が陽電 子源のレイアウトである。



図 1.8: 陽電子源 [3]

1.2.3 ダンピングリング

ダンピングリングは電子と陽電子のビームのエミッタンス[‡]を低くすること、すなわちビームを絞るこ とである。図 1.10 のような形状であり、直線部分は 712 m ありさらなるエミッタンス低減を行う wiggler 磁石、円弧部分で制動放射でエネルギー損失した分を補償する RF 加速空洞等の装置が配置され、円弧 部分は直径 579 m ある。ダンピングリングを周回するたびにビームのエミッタンスを小さくすることが できる。パルス間隔 200 ms の間に低エミッタンスのビームを作ったり、全バンチを一時的に蓄えたり (ILC は最大 ~ 2600)、ビームの出し入れを 1 バンチごと高速キッカーで弾いてバンチ輸送したりする。 ダンピングリングは図 1.9 の ILC 中心部分に配置される。

[†]放射長。入射光子に対して、電子陽電子対生成が54%の確率で生成する物質長。

[‡]ビームの位置と運動量の六次元位相空間で定義されるビームの"質"を表す量であり、すなわちビームの広がり度合いを 意味する。



図 1.9: ILC 中心部分 [3]



図 1.10: ダンピングリング概略図 [3]

1.2.4 RTML

ダンピングリングから弾き出された低エミッタンスのバンチは、Ring To Main Linac (RTML) シス テムによって線形加速器へ輸送される。RTML は以下の装置からなり、図 1.11 のように配置される。

- Electron (Positron) Long-Transfer-Line (ELTL (PLTL))
 ~ 15 km 長の 5 GeV 粒子輸送導管。
- Electron (Positron) Ring-To-Line beamline (ERTL (PRTL))
 ベータトロン・エネルギーコリメータシステム。ダンピングリングから主線形加速器へのビームの輸送導管。
- Electron (Positron) TURN-around beamline (ETURN (PTURN))
 ビームの向きの変換。ELTL の終端でバンチの位置の誤差を検出し、ESPIN の終端においてその バンチを弾き出す。
- Electron (Positron) SPIN-rotation system (ESPIN (PSPIN))
 ダンピングリングで上下向きにあった電子・陽電子のスピンの向きを任意の方向に向ける。
- Electron (Positron) Bunch Compressor (EBC1 (PBC1), EBC2 (PBC2))
 ビームバンチ長を数 mm から数百 µ m まで圧縮する。



図 1.11: 電子側の RTML[3]

1.3 ILCの検出器

ILCの検出器案は2つある。Silicon Detector(SiD、図 1.13)は低コストでコンパクト、5 T の強磁 場をかけるシリコン半導体飛跡検出器を採用している。また、1 バンチ同士の交差時のタイムスタンプ を行い、さらに高精細カロリメータが粒子同定解析に最適化されているのも特徴の一つである。一方、 International Large Detector(ILD、図 1.12)は優れたエネルギー・運動量分解能を誇り、高性能な粒子 識別のための dE/dx 測定を可能にする TPC を飛跡検出器として採用している。ILD も粒子同定解析に 適した高精細なデザインとなっている。いずれもジェットのエネルギー分解能 $\sigma_E/E = 30$ [%]/ $\sqrt{E$ [GeV] という ILC の目標を達成するためのデザインである。ILD は日本と欧州を中心に、SiD はアメリカを中 心に研究開発が進められている。ここでは、プッシュプル方式について触れた後 ILD に注目して解説 し、以後本研究の主題である ILD のハドロンカロリメータに関する研究開発の現状の一部について示し ていく。



図 1.12: ILD 検出器外観イメージ [1]

図 1.13: SiD 検出器外観イメージ [1]

1.3.1 プッシュプル方式

ILC では2つの実験が1ヶ所の衝突点を共有するためにプッシュプル方式を採用している(図1.14)。 データ取得を行う検出器は相互作用点に押し出され、一方の検出器はその間相互作用点外に引き出しメ ンテナンスを行うというものである。検出器の出し引きを行う時間間隔としては、両実験で期待されて いる結果を出すためのデータを取得できるのに十分な長さであり、ILC 積分ルミノシティが最大になる ように行われる。

1.3.2 ILD

ILD は日本と欧州を中心に研究開発が進められている ILC 用多目的検出器であり、後述の Particle Flow Algorithm (PFA) と呼ばれる検出器のヒット情報から粒子の再構成を行うアルゴリズムに最適な デザインである。ILD の断面図は図 1.15 のようになっており、以下の検出器から構成され、ここでは衝 突点に近い検出器の順番で示していく。

飛跡検出系

高精細カロリメータ系と共に 3.5 T のソレノイド強磁場中にある飛跡検出系は、既知である磁場の強 さから荷電粒子の曲率半径を求めることができ運動量を算出する。



図 1.14: プッシュプル方式 [1]



図 1.15: ILD の断面図 [4]

• 崩壞点検出器

ILD の中で、最も衝突点に近く、粒子の崩壊位置を測定する検出器である。粒子の特定を行うに あたり Dメソンや Bメソンといった短寿命な粒子の崩壊点再構成はかなり重要であり、高い分解 能が必要となる。崩壊点分解能を表すためにインパクトパラメータという 2 つの再構成された飛 跡の崩壊点の距離が用いられ、ILD 崩壊点検出器が目指す分解能は以下の式で表され、比較的高 い水準のものである。

$$\sigma_b < 5 \oplus \frac{10}{p \sin^{\frac{3}{2}} \theta} [\mu \mathrm{m}] \tag{1.2}$$

ここで、*p*は運動量、*θ*は粒子の進行方向とビーム軸との角度を表す。また、この水準をクリアするために ILD 崩壊点検出器は以下の条件を満たすものを課している。

- 相互作用点に対して 3 µm 以下の位置分解能
- 各層 0.15 %X₀ 以下の厚み
- 第一層は半径~1.6 cm
- 2-3%以下のピクセル占有率§
- シリコン飛跡検出器

飛跡検出器系のシリコン部分は、the Silicon Inner Tracker (SIT)、the Silicon External Tracker (SET)、End cap component behind the endplate of the TPC (ETD)、the Forward Tracker (FTD)の4つから構成される。

FTD は飛跡検出器の内層の前方領域、SIT・SET・ETD は TPC を囲むように配置され(図 1.16)、 正確な粒子の位置を与えてくれることで運動量分解能を高めたり、崩壊点検出器と TPC、TPC と カロリメータの接続を補助してくれたりする。これらの系を用いることで飛跡を特に TPC と相互 修正をすることができる。また、時間情報を取得しタイムスタンプすることで TPC のみでは飛跡 再構成に時間がかかるため不可能であった飛跡のバンチ識別を可能にする。

• Time Projection Chamber (TPC)

TPC は ILD の中心的な飛跡検出器であり、3 次元 (*r*, *φ*, *z*) 的に飛跡を再構成する。動作原理としては、通過した荷電粒子が封入されているガスと反応して電離し発生した陽イオンと電子が、TPC 内にかけられている一様電場によりエンドプレートまでドリフトし (*r*, *φ*) 面に飛跡を残すというも

[§]全ピクセル数に対する応答があったピクセル数の比。これが低いほど飛跡再構成の精度が増す。



図 1.16: 左:シリコン検出器系を表した断面図 右:シリコン検出器系の3次元概略図 [4]

のである。さらに、陽イオンと電子のドリフト速度とエンドプレートで検出した時間から z 方向 のドリフト距離が計算できるので結果として 3 次元の飛跡を再構成できる。図 1.17 は TPC のエ ンドプレートの拡大図と全体のレイアウトである。



図 1.17: 左: TPC の概念図 右: TPC のエンドプレート [4]

カロリメータ系

カロリメータは物質中での相互作用によってシャワー化された高エネルギー粒子を検出しエネルギー を測定するものである。ILDでは、低コスト、大型化の容易さ、高精細なデザインを考慮してサンプリ ング型カロリメータを採用している。これは効率的にシャワーを起こす物質量の大きい吸収層と通過す る粒子のエネルギー測定を行う検出層が交互に配置して入射粒子のエネルギーの一部を検出層でサンプ リングするという方式である。また、後述する PFA に最適化するために検出層はピクセル状に細分化さ れた高精細なデザインとなっていて、これによりシャワーの形状の高い水準のパターン識別性能を実現 できる。

ILD カロリメータは内側から Electromagnetic CALorimeter (ECAL、電磁カロリメータ)、Hadron CALorimeter (HCAL、ハドロンカロリメータ)と配置される。ECAL は光子の特定とそれらのエネル ギー測定を、HCAL は中性ハドロンのエネルギーを測定する。前方方向には、Luminosity CALorimeter (LumiCal) 、Beam CALorimeter (BeamCal) 、Luminosity Hadron CALorimeter (LHCAL) が置かれる。

• ECAL

一般的に光子や電子、陽電子のエネルギーを測定する。光子や電子は物質と電磁相互作用を起 こすため、相互作用長が短く奥行きの短い密な形状の電磁シャワーを生成する。ILC が目標とす るエネルギー分解能を達成するためにこの ECAL が高いエネルギー分解能を得られなければなら ない。しかしながら光子や電子以外にも中性ハドロンでも ECAL 内でその半数がシャワーが発生 し始めるため、精密なパターン識別によって粒子の区別をするために高精細なデザインとなって いる。また、吸収層の材質として鉄などに比べて物質量の大きいタングステンを採用し、形成さ れるシャワーをコンパクトにすることにより、シャワーの重複を防ぐことができる。

検出層技術としてピクセル型シリコン半導体検出器を用いる SiECAL とストリップ状のプラス チックシンチレータと SiPM を用いる ScECAL が提案されているが、いずれもピクセルサイズは 5.0 × 5.0 mm² の高精細なものである。図 1.18 のように、シリコン検出器 SET・ETD と HCAL に挟まれるように配置される。



図 1.18: ECAL(青色)[4]

• HCAL

中性ハドロンのエネルギー測定を行う。ハドロンは物質中の原子核と強い相互作用を起こすこと でシャワー化するが、反応断面積が小さいため奥行き方向に長い疎な形状となる。そのため HCAL はハドロンシャワー全体をカバーするために吸収層の厚みが大きなものを使用し、ハドロンに対 する相互作用長 10X₀ ~ 16.8 cm と比較的短い鉄を使用する。また、シャワーが発達途中には多く の軽いハドロン等の二次粒子が生成されるため、エネルギー分解能がかなり悪い。

検出層のデザイン案は2つある。セルサイズ 10 × 10 mm²、チャンネルの応答の有無のみを読 み出すデジタル式の Semi-Digital HCAL (SDHCAL) があり、ガスによる検出を行い候補として Registive Plate Chamber (RPC) · Gas Electron Multipliers (GEM) · Micromegas がある。もう 一つは、セルサイズ 30 × 30 mm²、アナログ信号を読み出す AHCAL であり、シンチレータによ る検出方法である。いずれも検出層・吸収層ユニット 48 層からなる。

• 前方検出器

ビーム付近の検出器群であり、前方付近に飛来する粒子の測定を行いエネルギー損失を補償する。図 1.19 のように配置される。

– LumiCal

ルミノシティの測定を行い、計算には Bhabha 散乱が使用される。理論的に断面積は正確 に計算できて、ルミノシティL は以下の式で計算される。

$$L = N_B / \sigma_B \tag{1.3}$$

ここで、 σ_B は極角付近で積分された全断面積、 N_B はその領域に侵入したイベント数である。 LumiCal により、重心エネルギー 500 GeV で 10^{-3} fb⁻¹ 程度の精度のルミノシティを測定で きる。また、背景事象を減らすはたらきも持つ。

– BeamCal

バンチ衝突ごとの瞬間ルミノシティの測定や超対称性理論で予言されている稀イベントを 検出するための2光子イベントのveto、ビームパイプ上の磁石を守るための後方散乱を減ら すといった役割がある。

- LHCAL

前方方向の HCAL であり、電磁シャワーとハドロンシャワーの分離の補助を行ったり ILD 検出器の密封性を高めるはたらきがある。



図 1.19: 前方検出器 [4]

リターンヨーク/ミューオン検出器

ILDのミューオン検出系はソレノイドコイルの外側に置かれ、ミューオンイベントの特定やカロリメー タからのエネルギーの漏れを回収する Tail Catcher としてはたらく。ミューオン検出器とソレノイドコ イル内のカロリメータを併用することでジェットエネルギー分解能がよくなる(図 1.21)。構造として は図 1.20 のように、シンチレータを用いた検出層と磁場の漏洩を防ぐリターンヨーク用の鉄とのバウム クーヘン構造である。

1.3.3 Particle Flow Algorithm (PFA)

衝突点から発生した粒子全てを追跡し同定していく ILC では、ジェットのクラスター分離は必須であ る。表 1.2 にまとめてあるように、飛跡検出器が最も分解能が高く、HCAL が最も悪いが、カロリメー タでも高い粒子識別の性能を得るために高精細な検出器デザインとなっている。ここで、ILC が目指す ジェットエネルギー分解能は 30 [%]/√*E*[GeV] である。検出器の性能を向上させるだけではこの分解能 を達成することは難しく、ILC では PFA と呼ばれる手法により検出器全体の分解能を向上させる。

PFA は、飛来した粒子をその性質で同定するのに適した検出器を充てがって検出するというアルゴリズムである。図 1.22 のように従来の検出器ではカロリメータで荷電ハドロンと中性ハドロンを区別せず



図 1.20: ミューオン検出器系 [1]



図 1.21: パイオンを照射してミューオン検出器系の 有無によるエネルギー分解能の変化 [4]

表	1.2:	検出器こ	とのエ	ネルキ-	-分解能

粒子の種類	<i>E_{jet}</i> 中の割合 [%]	検出器	エネルギー分解能 σ_E/E
荷電粒子	64	飛跡検出器	$\leq 1 \; [\%] / \sqrt{E[\text{GeV}]}$
光子	25	ECAL	$15 \ [\%]/\sqrt{E[{ m GeV}]}$
中性ハドロン	10	HCAL	55 [%]/ $\sqrt{E[\text{GeV}]}$
ニュートリノ	1	検出不可	

に測定していた。荷電粒子の大半は荷電ハドロンであるため、従来の方法では大量の荷電ハドロンもカ ロリメータに侵入してくるのでジェットエネルギー分解能はかなり悪い。一方 PFA では、荷電粒子のエ ネルギー測定は飛跡検出器で行い、光子、中性ハドロンのエネルギー測定はそれぞれ ECAL、HCAL で 行う。カロリメータにおける荷電粒子のエネルギー付与を正しく取り除くために高精細な読み出しによ る精度の高い粒子分離が必要となる。ジェットエネルギー分解能が < 3.5 % であると W や Z、H ボソ ン由来のハドロン崩壊を効果的に分離することができるが、PFA 適用により 40 GeV 以上のジェットに 関してジェットエネルギー分解能が 3.7 % であるというシミュレーション結果が出ている(図 1.23)。加 えて、低い運動量のために荷電粒子がカロリメータに到達することができなかったり、上述したように ECAL の半ばからシャワーが発達し始めるハドロンもあるため優れた飛跡・パターン識別が必要である。



図 1.22: 左: 従来の検出器 右: PFA を用いた検出器 [9]



図 1.23: |cos θ|[¶]に対するジェットエネルギー分解能 [4]

第2章 AHCAL

AHCAL は鉄とシンチレータタイルからなるサンプリング型カロリメータであり、PFA を適用した ILD では中性ハドロンのエネルギー測定を行う。本章では、本論文の研究対象である AHCAL の動作原 理、構造を紹介する。

2.1 AHCAL の全体の構造

AHCALは上述した通り、高いエネルギージェット分解能と正確な粒子同定のための3次元的イベント 再構成を実現するための高精細ハドロンカロリメータである。検出層の1チャンネルのプラスチックシ ンチレータタイルは30×30×3 mm³であり、合計8×10⁶ 個程度必要となる。読み出しは後述する Hcal Base Unit (HBU)と呼ばれるモジュールに搭載されている有効受光面サイズ 1.3×1.3 mm² の Silicon PhotoMultiplier (SiPM)により行われる。図 2.1 の1個のバレルは検出層と吸収層が交互に積み重なっ た48 層構造で、これが図 2.2 のように 32 個 ECAL の外側に配置される。AHCAL は衝突点から飛来し てきた粒子を効率よく検出するために、特にデッドスペースの最小化とソレノイドコイルに納まる最大 の厚みになるように設計されている。



図 2.1: AHCAL 検出層 [4]



図 2.2: AHCAL のバレル構造 (緑色)[14]

2.1.1 吸収層

吸収層は鉄製であり、これは鉄のハドロン相互作用長が $\lambda_I = 17$ cm、電磁放射長が $X_0 = 1.8$ cm で あり、限られたスペースで適切な総数を設定することで優れたエネルギーサンプリングを行えるからで ある。この優れたエネルギーサンプリングにより、ハドロンシャワー中の電磁相互作用を引き起こした

クラスタ部分のみのエネルギー測定やシャワーの形状に関する幾何的な分解能測定、さらには粒子分別、 エネルギーに対する加重といった事項にフィードバックを与えられる。

2.1.2 検出層

AHCAL の高精細な検出層では粒子のエネルギーと位置を測定する。シミュレーションにより PFA 再 構成のためのパラメータの最適化が行われ、厚みと平面方向のセルサイズを決定した。厚みは高エネル ギージェットのエネルギー分解能やソレノイドコイルの大きさに関連し、平面方向のサイズは粒子分別 や HCAL 全体のコスト的な問題、チャンネル数に関連がある。図 2.3 がシミュレーション結果であり、 最善のエネルギー分解能を達成するのに必要なタイルサイズが 30 × 30 mm² であることがわかった。



図 2.3: セルサイズと PFA を適用したジェットエネルギー分解能の関係 [4]

シンチレータタイルの SiPM 読み出し方法としてさまざまなものが研究されているが、基準設計では タイル中心部の dimple と呼ばれるくぼみに SiPM を置くものが採用されている(図 2.4)。各タイルは 反射材が巻かれている。チャンネル数は約 800 万と膨大であるため、タイルの包装、HBU への糊づけ、 設置の工程を自動化する開発が進められている。



図 2.4: 標準の中心読み出し型 [23]。右端のタイルは反射材が包まれた状態。

SiPM は HBU に半田付けされており、データ取得にはいくつかの制御ボードによって管理される。さらに、各チャンネルに LED が設置されており、全てのチャンネルを同時に較正することが可能である。

2.2 HBU

HBU(図 2.5)は AHCAL の大量のチャンネルを読み出すモジュールである。各 HBU では 144 個の チャンネルを 4 個の ASIC (SPIROC) で管理し、このユニットを flexlead と呼ばれる HBU と DAQ モ ジュール間のコネクタで接続することで AHCAL 検出層 1 層あたり 18 ユニットを 1 枚の DAQ インター フェースモジュールで操作できる。図 2.1 のように、HBU スラブの片側末端に各層の DAQ モジュール がまとめられている。HBU の DAQ ハードウェアの階層構造としては、図 2.10 のようになっている。

以下では、HBUに搭載されている装置のスペックとともに複数のHBUを並列して操作するための制 御ボードを示していく。



図 2.5: HBU[23]

\mathbf{SiPM}

SiPM は光検出器であり、1つ1つがガイガーモードでアバラン シェフォトダイオードとして動作するピクセルが高密度に配列し、数 千から数万のピクセル数からなる。応答があったピクセルの数に比 例した大きさの振幅のアナログ信号を生成する。AHCAL で使用さ れる標準の SiPM は浜松ホトニクスの Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) である。第5章以降で示す AHCAL 大型技術試作機に使 用された MPPC は、図 2.6 のような型番 S13360-1325PE、受光面 $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$ ピクセルピッチ 25 μ m のモデルである。SiPM は以 下のような利点、欠点を持つ。



- 利点
 - 入射光子数に応じて離散的に信号を観測できる優れたフォ
 トンカウンティング(図 2.7)
 - 磁場に対する不感性
 - 優れた時間分解能

図 2.6: MPPC[20]

- 低電圧で動作
- コンパクトで安価
- 高い増倍率
- 欠点
 - 感度領域の拡大化が難しい
 - 増倍率の温度依存
 - ノイズ(入射光子に無関係なダークシグナル、入射光子に付随するクロストークとアフター パルス)
 - 放射線耐性が高くない
 - 同時に大量の光子が入射することによるサチュレーション



図 2.7: MPPC で検出した信号 [20]。主信号のあとにうっすらとアフターパルスと思われる信号が見える。

ASIC

SiPM の読み出しは HBU上の Application Specific Integrated Circuit (ASIC) で管理され、1 個の ASIC で 36 チャンネルを制御する。 AHCAL の HBU では Omega 社の Silicon PM Integrated Read-Out Chip (SPIROC) が使用され、1 個の SPIROC で 36 チャンネルの SiPM からの信号を読み出す。図 2.8 は SPIROC2b と呼ばれる型の もので、SPIROC は以下のような特徴を持つ。

- 電荷計測を行うための 12-bit ADC と時間測定するための 12bit TDC
- 1 個の SPIROC に、取得した ADC と TDC を格納するための 16 個のメモリーセルが搭載(16 イベント分を記録できる)



図 2.8: PCB に設置された SPIROC[10]

21

• high-gain、low-gain 增幅器 (図 2.9)

- チャンネルごとの波高分別器
- 小電力で作動*し、薄いデザイン



図 2.9: 自動トリガーモードで出力される ADC の振る舞い [10]。SPIROC は較正目的で使用される high gain モードと SiPM の大きな信号を測定する low gain モードの 2 つの gain モードがある。fast shaper によって成形された信号の大きさをあらかじめ設定した閾値に従って比較し、自動的に high gain か low gain を選ぶ。

POWER

Power board (POWER) はその名の通り、SiPM やASIC に電圧を供給する。許容損失を減らすため温 度管理が可能な構造になっており、また power pulsing を行うための並列コンデンサも配置されている。

CALIB

CALIBration board (CALIB) はデバイスの較正を管理する制御ボードである。

DIF

Detector InterFace (DIF) は検出層一層全ての ASIC と DAQ を行うエレキとの間の FPGA インター フェースである。ASIC から送られてきたデータを読み出し LDA に送る。

^{*}ILC での稼働の際、想定している電力消費は SiPM にかける電圧も含めて 1 チャンネルあたり 25 µW である。さらに、 電力を節約するためバンチトレインのタイミングに従って ASIC の電源の on-off を繰り返す power-pulsing を採用している。 power-pulsing により、冷却機構はインターフェースボードのみで必要となる。

CIB

Central Interface board (CIB) は DAQ インターフェースモジュールである DIF、CALIB、POWER をまとめて管理する。図 2.1 のように各層の長手方向の 6 つの HBU 間は flexlead で接続され、2 列の 6 つの HBU 同士は Side Interface Boards (SIBs) を経由して接続される。

LDA

Link/Data Aggregator (LDA) は、大量のチャンネルを制御するのに適した DAQ システムであり、 DIF からのデータを収集、パケットに統合し DAQ PC や CCC へ送る。

\mathbf{CCC}

Clock and Control Card (CCC) は、全ての装置 (LDA/DIF/ASIC) に共通の時間情報を与え、全て の DIF を同期させる。spill level に応じたデータ取得と全ての DIF にスタートストップコマンドを送っ たり、SiPM のノイズ抑制を行うトリガー validation を与えたりする。



図 2.10: DAQ ハードウェアの階層構造

2.3 DAQ

ILCのビームの構造は図 2.11 のように 5 Hz でバンチトレインが繰り返され、1 つのトレインには 554 ns 間隔でバンチが 1312 個含まれている。バンチトレインの長さは時間にして 727 μs であるため、5 Hz の周期でバンチトレイン通過時の約 2 ms の間にデータ読み出し・送出を行い、残り 198 ms は休止し、これを繰り返す。これを Read Out Cycle (ROC) と言う。SPIROC は ILC モード、testbeam モードと 呼ばれる時間情報の管理の方法が 2 つ存在し、違いはデータ取得時の時間情報の一つ Bunch Crossing ID (BXID) の時間幅が異なることであり、前者は 200 ns、後者は 4 μs である。以降では、testbeam モードの場合を示していく。

図 2.11 と図 2.12 の "Acquisition" は同じ意味である。あるチャンネルで信号を取得すると、SPIROC の fast shaper によって信号の成形が行われる。成形された信号がある閾値を超えると、次に slow shaper で成形される。成形された信号はあらかじめ設定した時間後に TDC とともにホールドされる。SPIROC は信号が検出された BXID 終了時にホールドした ADC と TDC の 36 チャンネル全ての値をメモリセル に記録する。SPIROC の 16 個のメモリーセルがすべて埋まると、HBU の取得したデータは LDA、CCC 送られデータ取得を終了しデータの読み出しを始める。



図 2.11: ILC のビーム構造と ROC。各種パラメータは [11] を参照した。



図 2.12: HBU の DAQ の流れ

第II部

検出層の性能向上の研究

第3章 シンチレータ発光量の改善

ILD に搭載するハドロンカロリメータのチャンネル数は 800 万を超えるため、実機製作にあたっては 量産性を考慮しなければならない。この章では量産性に優れた高性能なシンチレータの開発を行った。

3.1 有機プラスチックシンチレータの成形と発光量

有機プラスチックシンチレータは、ベースとなるプラスチックに有機シンチレーション物質を添加し 固めたもので、特徴として無機シンチレータに比べておよそ 100 倍速い減衰時間を持っている。そのた めに、高計数率測定などに用いられる。成形方法としては幾つかあり、ここでは主要な 2 種類の成形方 法とその特徴を述べる。

3.1.1 キャスト成形

液状の単量体や初期縮合物を型に流し込み、重合剤を加えることで重合反応により硬化させる方法で ある。比較的低温でつくりあげ、かつ圧力をかけずに製作される。ベース物質として代表的なものとし て Polyvinyl toluene (PVT) がある。一般的に市販されているプラシチックシンチレータのほとんどは この製法が採用されており、以下のような特徴を持つ。

● 利点

1. 低温で仕上げるため、透明度が高く光量に優れている。

2. 先行研究で AHCAL に用いるのには十分な光量であることがわかっている。

• 欠点

1. 後述の射出成形に比べ、高価である。

- 2. 重合反応という化学的な工程を経るため、作成に時間がかかる。
- 3. AHCAL のシンチレータタイルを製作するためには切削加工が必要である。

本製法は、AHCAL 実機の 800 万個のタイルの大量生産には適さない。

3.1.2 射出成形

ベースプラスチックのペレットと発光材を混ぜたものを高温、高圧で金型に押し出し成形する方法で ある。ベースプラスチックとして代表的なものに Polystyrene (PS) がある。射出成形は以下の特徴を 持つ。

• 利点

- 1. 希望する形状の金型を作成すれば機械加工が不要である。
- 2. キャスト成形に比べ、短時間で製作できる。
- 3. キャスト成形に比べ、安価である。
- 欠点

1. 高温での処理により、材料の光学的特徴や発光量が低下する。

3.2 高性能射出成形シンチレータの開発

実機のAHCALにおいては大量のプラスチックシンチレータを製作しなければならないため、量産性に 適した製法である射出成形を検討している。一方で、射出成形によるシンチレータはキャスト成形による PVT シンチレータに比べて光量が劣る問題がある。本研究では射出成形による製作するシンチレータの 光量を改善するために発光材の種類と濃度の最適化を試みた。今回、射出成形プラスチックシンチレータ として、PS ベースに発光剤として 2,5-Diphenyloxazole (PPO、図 3.1)、1,4-Bis (5-phenyl-2-oxazolyl) benzene (POPOP、図 3.2)を溶かし込んだものを使用した。一般的に、シンチレータの光量研究を行う 際は、よく研究し尽くされた材質のシンチレータとの光量比でサンプルの光量を評価する。ここでは参 照サンプルとして、キャスト成形プラスチックシンチレータである PVT の市販のシンチレータ EJ-212 (Eljen Technology) [16]を使用した。



図 3.1: PPO の構造式



図 3.2: POPOP の構造式

3.2.1 有機プラスチックシンチレータと発光剤

PS ベースのプラスチックシンチレータのシンチレーション光の発光波長領域は、半導体光センサや 光電子増倍管の検出できる波長領域より低くほとんど一致していない。したがって、発光材を添加する ことで発光波長を高い方に変換させ光センサの感度領域に合わせるということが行われている。図 3.3 は PS ベースに 3 種類の第一波長変換材を用意して 2.0 %加えた 3 種類のシンチレータの発光スペクトル と、さらに第二波長変換材 POPOP を 0.02 %加えた場合の発光スペクトルである。図 3.7 に見るように 2 種類の発光材を添加した場合のスペクトルは、SiPM の感度領域とほぼ一致していることがわかる。



図 3.3: 発光スペクトル [18] (a): POPOP なし (b): POPOP あり

3.2.2 先行研究

PS ベースのプラスチックシンチレータの発光量に関して、発光剤の種類・濃度の依存性に言及する先 行研究 [18] が行われた。[18] と我々のプラスチックシンチレータの製作方法の大きな違いは成形方法で ある。[18] では、普通射出成形で製作される組み合わせ、PS ベースに二種の発光材から構成されるシン チレータをキャスト成形(熱重合反応)により製作され、製作過程における最高温度は 85 ℃である。

[18] では、有機シンチレータの中で最も発光量が高いアントラセンの光量比で各サンプルの光量を評価 している。第一波長変換剤として PPO、p-Terphenyl (p-TP)、2-(4-tert-Butylphenyl) -5-(4-biphenyl) -1,3,4-oxadiazole (b-PBD)、第二波長変換剤として POPOP、1,4-bis (2-Methylstyryl) benzene (Bis-MSB)、1,4-Bis (4-methylstyryl) benzene (Me-MSB)、9,10-Diphenylanthracene (DPA)を用意し、光 量が最適になる発光剤の組み合わせと濃度を探求した。その結果、PPOを2.0%、POPOPを0.02%添 加したプラスチックシンチレータがアントラセンの光量比で74.3%を達成した(図 3.4)。ここで、PVT はアントラセンの光量に対して約 65%程度であることが知られている [15][16]。実験結果をアントラセ ン比に代わり、PVT 比に換算すると114%になり得ることがわかる。



図 3.4: POPOP の濃度を 0.02 %に固定したときの PPO の濃度変化に対するアントラセン光量比 [18]

3.2.3 実験装置と実験サンプル

タイルのデザイン

現在 AHCAL に用いられるシンチレータのタイルの基準デザインでは、図 3.5 のような 30 × 30 × 3 mm³ のタイル中心に dimple と呼ばれるくぼみに SiPM を配置する。このデザインでは、発光量がタイル内の粒子入射位置にほとんど依存しないことがわかっている [17]。各セルユニットは反射材で覆うことで SiPM の受光量を増加させ隣接するセルへの光漏れは小さいと考えられている。

反射材

上述のように SiPM までなるべく多くのシンチレーション光を輸送するため、各タイルを反射材で覆った(図 3.6)。使用した反射材は 3M 社の ESR シリーズ ESR2 で、ポリエステル製で厚みが 32 μm である。可視光領域において 98 %以上の反射率を持つ [19]。



図 3.5: 1 ユニット読み出し基板に敷き詰められた標準的なデザインのタイル

測定に用いたサンプル

サンプルの作成は株式会社ジーテックの協力を得て行った。製作工程としては、タイルより大きな既存の型に射出成形した板を製作し、そこから 30 mm 角タイルを切り出し、dimple を機械加工した。dimple は半径 4.5 mm の球状のドリルでタイル表面から深さ 1.2 mm 削って生成された。

先行研究に倣い、実験サンプルは第一波長変換剤として PPO、第二波長変換剤として POPOP 添加 したプラスチックシンチレータを用意した。本研究では、表 3.1 にまとめられているように POPOP の 濃度を 0.02 %に固定し、PPO の濃度を 1.5 - 3.0 %で調製したサンプルを用いた。

また、光量比較に用いる PVT ベースのプラスチックシンチレータは後述する SiPM の検出効率が最 大になるような波長付近に発光波長のピークをもつ EJ-212 を採用し、PS ベースシンチレータと同じタ イルのデザインに加工した。これは、キャスト成形されたシンチレータであり、全面が加工研磨されて いる。

		PPO			
	濃度	1.5~%	2.0~%	2.5~%	3.0 %
POPOP	0.05~%	9	9	9	9

表 3.1: シンチレータに添加した発光材の濃度と	サン	/プル	数
---------------------------	----	-----	---



図 3.6: 測定に用いた PS ベースのシンチレータタイル 左:反射材なし 右:反射材あり

\mathbf{SiPM}

シンチレーション光の検出に用いる SiPM は浜松ホトニクス社製の MPPC を使用した。MPPC のスペックとしては、以下の通りである。

- 型番: S12571-025P (受光面: 1.0 × 1.0 mm²、表面実装型)
- 感度波長領域: 320 900 nm (最大感度波長: 450 nm)

EJ-212 の発光波長分布のピークは、図 3.8 のように MPPC の検出効率が最大になる波長とおおよそ 一致していることがわかる。





図 3.8: EJ-212 の発光波長分布 [16]

図 3.7: MPPC の光子検出効率 (PDE) の波長依存 性 [20]

DAQ

DAQには、Domino Ring Sampling Chip (DRS) という高速波形デジタイザーを用いた [22]。DRS は Paul Scherrer Institute (PSI) で開発され、 MEG 実験などで使用されている。図 3.9 は DRS の動作原 理を表す概念図であり、動作プロセスは次の通りである。電圧をサンプルするセルが 1024 個内蔵されて おり、入力された信号はインバータ遅延鎖を周回し、コンデンサーに電荷が蓄積される。トリガー信号 が入力されると、蓄積されていた電荷はシフトレジスターを通して順番に出力されていく。サンプリン グ速度は 5 GSPS まで可能であり、その場合 200 ps ごとのサンプリングで 200 ns の時間幅の波形を出 力できる。今回の測定では、1.6 GSPS のサンプリング速度で 640 ns のタイムウィンドウでの読み出し を行った。

今回の測定では、PSIで開発された SiPM 用の小型アンプ、PSI アンプ(図 3.10)を用いて信号の増幅を行った。

セットアップ

MPPC は図 3.11 のようにプリント基板に半田付けされている。マウントされた MPPC がタイルの中 央 Dimple 部分にくるようアクリル製のフレームとアルミ製のスペーサーを用いてタイルを固定した。





図 3.9: DRS の概念図 [21]

図 3.10: PSI アンプ

β線を照射するため⁹⁰Sr 放射線源を用いた。 β線をタイルの一点に照射するため、図 3.12 のように $\phi = 1.0 \text{ mm}^*$ のコリメータを用いて β線を絞り、コリメータの鉛直線上の位置に固定したトリガーカウ ンタでトリガーをかけた。

トリガーカウンタとして、5 mm 立方のプラスチックシンチレータ (EJ-212) の底面に受光面 3 mm 角 の MPPC (S12572-025C) をオプティカルセメントで接着したものを用いている。



図 3.11: プリント基板[†]にはんだ付けされた MPPC



図 3.12: 測定セットアップ

^{*}建築分野では ϕ は直径を意味する。ここでも直径の意。 [†]Printed Circuit Board (PCB)

3.2.4 測定方法

図 3.13、図 3.14 にセットアップの概略図と全体を俯瞰した様子を示す。セットアップは MPPC のブ レイクダウン電圧が温度依存であることを考慮し恒温槽の中 (23 ℃) に設置され、外部からの光を遮断 するためさらに暗幕で覆った。



図 3.13: セットアップの概略図



図 3.14: セットアップ全体図。右下の装置はトリガーカウンター。

測定対象として、PS ベースの4種類の発光材濃度セットのサンプ ルをそれぞれ9個ずつと、EJ-212を5個用意し、それらの発光量を 調べた。また、いくつかの同一サンプルに対して複数回測定し、再 現性の確認も行った。さらに、測定箇所は図 3.15 のようにタイルの 一点であるためタイル内の発光材の均一性を確認するため、いくつ かの同一のタイルに対し、90度回転させていくことで計4箇所測定 した。

図 3.16 は DRS によって得られた信号の波形である。-260 ns から 立ち上がる波形がトリガーされたシンチレーション光による信号で ある。この図において、横軸は時間、縦軸は電圧を意味しており電圧 は電流と線形な関係にあるので、この信号を時間積分すると MPPC が得た総チャージを求めることができる。このようにして得られた チャージの分布は図 3.17 のようになる。高速の荷電粒子が物質中を 通過するとクーロン相互作用により一定のエネルギーを損失し、そ



図 3.15: *β*線の照射位置

のような粒子は Minimum Ionization Particle[‡] (MIP) と呼ばれ、そのエネルギーデポジットはエネル ギー損失の高い方に尾を引く非対称なランダウ分布に従うことが知られている。さらに、シンチレータ に落ちたエネルギーのうち、MPPCにフォトンとして検出される確率や測定誤差を考慮して、検出され る信号の分布はランダウ関数にガウス関数をたたみ込んだ関数を用いてフィットすることができる。得 られた分布にこの関数をフィットして得られたピーク値をサンプルの光量の代表値として評価した。

上記の方法で求めたチャージ分布のピーク値は MPPC の増幅率(ゲイン)に依存するため、ゲインに 依存しない純粋な光量を得るため1光電子分に相当するチャージを求める必要がある。そこで、ランダ ムに発生するダークシグナルを利用する。図 3.16 において、-400 ns 付近に見える波形がそれであると 思われ、ここでは、シンチレーション光の直前までの -640 ns - -300 ns の区間をダークシグナル解析範 囲として利用し、この区間を時間積分することで1光電子分のチャージを求めた。シンチレーション光 直後を解析範囲としないのは、シンチレーション光由来のアフターパルスの影響を受けるからである。 結果として、図 3.18 のようなダークシグナルのチャージ分布を得た。0 付近のピークはペデスタルと呼 ばれるもので、ベースライン付近のノイズのばらつき由来のものである。これと1光電子分のチャージ のピークをマルチガウス関数でフィットし、ピーク間距離を求めることで1光電子分のチャージを計算 した。



図 3.16: DRS で得られる信号の波形



3.2.5 結果と考察

図 3.19 に、PPO の濃度変化に対する発光量の変化を示す。各点は各濃度に 9 個のサンプルから得られる発光量の平均値であり、誤差はこの 9 つの値に対する標準誤差である。また、同一サンプルを用いて測定の再現性が 3 % であることがわかった。

[‡]ここで用いた ⁹⁰Sr が放射するβ線は厳密には MIP ではない。詳細は付録で言及する。

PPO の濃度変化に対する発光量の傾向としては、PPO 2.0 %で PVT 比で最大値 ~ 71 %を迎え以降 は飽和し、統計的には濃度依存がないと考えられる。この光量は 35 フォトン程度に相当し、ハドロンカ ロリメータでの測定には十分な光量を獲得している。また、ある程度発光材の濃度をあげるとサンプル 毎の光量のばらつきを小さく抑えることができることがわかった。

図 3.20、3.21 には各サンプルで得られた PVT 比の光量と各濃度でのそれに対する標準偏差を示して いる。この結果によると、発光材の濃度が高くなるにつれてサンプルごとの光量のばらつきが小さくなっ ていくのがわかる。発光材が少量の場合、PSと十分なほど均一に混合されず射出成形の際にタイルごと に発光材のムラができてしまった可能性が考えられる。今後、発光材の濃度・種類の他に濃度に伴うサ ンプルの個体差についてもより詳細な研究を進めていく必要がある。



図 3.19: シンチレータタイルの光量の PPO 濃度依存性。誤差は各サンプルで得られた光量の標準誤差。



3.2.6 さらなる試行と考察

前節において、期待されていた先行研究の結果である PVT の発光量を超える PS ベースのシンチレー タマテリアルの製作は PVT 比でたかだか 71 %止まりであった。先行研究と本実験との大きな違いはサ
ンプルの成形方法であり、製法によって溶解する温度が全く異なる。先行研究における成形方法は熱重 合反応を経るキャスト成形であり最高温度でも100 ℃を超えないのに対し、本研究で用いたサンプルは 射出成形であり ~ 180 ℃でプラスチックを溶解し高圧で金型に射出している。今回のサンプルはプラス チックが溶解する下限限界の温度で製作しているため、より低い温度での射出成形は不可能であった。 そこで、製作元の協力のもと製作工程の改良をすることで光量の回復が見られるか検証した。

図 3.22 に元々のプラスチックシンチレータの製作過程を示した。この製作過程によると計 2 回加熱さ れているのがわかる。この加熱時間を減少させることにより光量の回復が可能かどうか検証した。すな わち、一度シンチレータを冷ましペレット状に切り出していた工程を省略し、プラスチックと発光材の 混合したものを直接射出成形にかけることで加熱時間を減らした。



図 3.22: プラスチックシンチレータの製作工程

この手法で PPO 2.0 % + POPOP 0.02 %と p-TP 3.0 % + POPOP 0.1 %の 2 種類の発光材の組み 合わせのプラスチックシンチレータを製作した。後者の組み合わせの光量は PVT 比で [23] によると ~ 77 %を達成している。結果としては、前者のサンプルは 4 %増、後者のサンプルは 4 %減となった。こ の結果から、加熱工程を減らしても光量が改善しないことが確認できた。射出成形温度である ~ 180 ℃ がすでに光量悪化に影響を及ぼすほど高い温度であったか、光量回復にはさらなる加熱時間の短縮が必 要であったか、温度差以外にキャスト成形と射出成形に違いがあるか原因究明が必要である。

第4章 シミュレーションによるセルユニットの最 適化

シンチレータタイルユニットの設計を最適化するために、シンチレーション光の伝搬をシミュレート し MPPC で検出される光電子数を評価するシミュレーションツールを構築した。

4.1 Geant4(GEomerty ANd Tracking)

Geant4 は、モンテカルロ法を用いて物質中における粒子の飛跡を物質間の相互作用を考慮すること でシミュレートするプラットフォームであり、利用先は高エネルギー物理学だけでなく、医療や加速器、 宇宙物理など多岐にわたる。

Geant4 はユーザが必要最小限のはたらきで構築したいシミュレーションを行えるようにさまざまなオ ブジェクトが初期状態から提供されている。その中でも、ユーザクラスと呼ばれるシミュレーション開 始時にマネージャーオブジェクトに伝えるべき初期情報、すなわち

- 空間に配置する物体とその物質の定義
- 考慮する物理相互作用
- 事象の初期条件

を与える基底クラスを構築すればシミュレーションが可能となる。以下にクラスの名称とその役割を列 挙する [24]。

DetectorConstruction

シミュレーションを行う上で必須のクラスである。シミュレーションを行う空間の定義やセットアップの Geometry やその物体の構成物質の定義といった配置する構造体の情報を与える。 構築手順として以下の通りである。

- 1. World と呼ばれる物理領域の中に設置したい Detector の形状と大きさを定義する。
- 2. 1. で定義した World を物理領域に指定し、World と Detector に G4LogicalVolume 関数で各物体の構成物質を指定する。
- 3. G4PVPlacement 関数で World の中心を原点として Detector を設置する。
- 4. ある Detector を SensitiveDetector で定義することで検出器として設定し、そこで得られた物理量 を後述の Hit クラスに渡す。
- 5. シミュレーションを可視化した際の Detector の色や回転等の指定をする。

PhysicsList

シミュレーションを行う上で必須のクラスである。シミュレーションで考慮したい粒子と物質間の相互 作用やモデルを与えたり、二次粒子の生成閾値を設定する。例として本章の要である optical photon*に 起こりうる物理プロセスを挙げる。

- 有機シンチレータに対する光吸収過程。absorptionProcess という変数名。
- レイリー散乱、ミー散乱。rayleighScatteringProcess と mieHGScatteringProcess という変数名。
- 屈折、反射に関する過程。boundaryProcess という変数名。

PrimaryGeneratorAction

シミュレーションを行う上で必須のクラスである。シミュレーション開始時の事象の初期条件、すな わちビームの初めの座標やエネルギー、運動量を与える。ビームを管理するマクロで代替してこのクラ スの中身の情報を与えなくてもよいが、シミュレーションは開始されない。

RunAction

シミュレーションの開始と終了を管理する、1 Run 分の処理を行う。

ここで Run とは、同一の条件のもとで一連の事象をシミュレーションすることであり、図 4.1 の 1 Event をユーザが指定した回数分繰り返し行うことを指す。加速器実験においてビームの照射開始時か ら DAQ 終了までの一連の測定を 1 Run と呼ぶことに対応している。

EventAction

Event を管理するクラスである。図 4.1 に示した 1 Event を ID し、そのときに付随する各 Detector で落ちたエネルギー等の物理情報を各 Event 終了時に一括して管理される。Event は一次粒子、n (≥2) 次粒子すべてを Tracking し終えると終了し、新たな Event が開始される。



図 4.1:1 つの Event の流れ

SteppingAction

Step を管理するクラスである。Geant4 では粒子の Tracking を Step と呼ばれる Tracking の最小単位 でシミュレートしていく。Step の始点を Pre-Step、終点を Post-Step と呼ばれ、このクラスでは各ステッ プごとに始点終点二つのオブジェクトを利用することで Step 前後の粒子の物理量を抽出することができ る。また、1 Step は相互作用が生じたとき、物質境界面が変化したとき、ユーザが指定したステップ長 進んだときに区切られる。

\mathbf{Hit}

DetectorConstruction で定義した SensitiveDetector に関するヒットデータクラスであり、1 Event ご とに1つのヒットオブジェクトを生成し、Hit Collection コンテナに格納されていく。1 Event 終了と同 時にヒットオブジェクトは消去される。

SensitiveDetector

SensitiveDetector と定義した有感測定器内での具体的な処理を与えるクラスである。流れとしては、 ヒットオブジェクトを格納する HitCollection オブジェクトを生成し HitCollectionOfThisEvent にコン テナに格納する初期化、粒子が有感領域に侵入してきたときの各ステップでの処理、ヒットのオブジェ クトを生成して終了処理を行う。

4.2 optical photon の伝播機構

シミュレーションではシンチレーション光を optical photon として扱う。この節ではシンチレータに 付加した表面状態とシンチレータ内での optical photon の振る舞いを記す。図 4.2 は、電子の通過によ りタイル内でシンチレーション光が発生し、伝播して MPPC で検出する概念図を示している。この伝 播過程において、以下のような反応が起こりうる。MPPC でシンチレーション光を検出するには 1.2. の 過程が繰り返される必要があり、3.4.5. の反応によってシンチレーション光は失われる可能性がある。

- 1. シンチレータ内部で全反射する。
- 2. シンチレータ内部から空気層に飛びだし、反射材で反射され、再びシンチレータ内部に侵入する。
- 3. シンチレータ内部から空気層に飛び出し、反射材で反射されない。
- 4. シンチレータ内部から空気層に飛びだし、反射材で反射され、さらにシンチレータ表面で反射材 に向かって反射する。
- 5. シンチレータ内で減衰する。

以下に示すように、各 Detector に表面状態や屈折率、吸収長等光学特性を設定して optical photon シ ミュレーションを行った。各種パラメータは表 4.1 にまとめた。

4.2.1 シンチレーション光の発生

発生するシンチレーション光の発光スペクトルと発光量は ELJEN TECHNOLOGY 社のデータシート [16] を参考に設定した。シンチレーション光は荷電粒子がシンチレータで失った運動エネルギーの一部が蛍光エネルギーに変換されることで発生し、

$$\frac{dL}{dx} = S \frac{\frac{dE}{dx}}{1 + k_B \frac{dE}{dx}} \tag{4.1}$$



図 4.2: シンチレーション光が伝播する様子を示した概念図

で表されるように、光子数はエネルギー損失に依存する [27]。ここで、L は発光量、dE/dx は単位飛跡 あたりの荷電粒子の損失したエネルギー、S はシンチレーション効率、k_B は Birks 定数であり、この式 は荷電粒子のエネルギー損失が大きくなるとクエンチングにより発光量とエネルギー損失の関係が非線 形になることを示している。Birks 定数は物質に依存する定数であるが、PVT ベースのシンチレータは 0.126 mm/MeV である。

4.2.2 MPPC パッケージ

MPPCの検出効率(図 3.7)とジオメトリはデータシート [20] を参照して設定した。このパッケージ のジオメトリとしては、エポキシ樹脂製の窓の中に受光面を実装した。

4.2.3 物質間の境界状態

物質の境界に関して、検出器表面の物質の属性 (G4SurfaceType) を定義する以下の変数が設けられている。

dielectric_metal 不導体と導体の境界面。光子は金属に吸収、または反射される。

dielectric_dielectric 不導体と不導体の境界面。光子の反射、屈折、吸収が起こる。

シンチレータと MPPC のエポキシ表面は dielectric_dielectric を指定し、MPPC の受光面は dielectric_metal を指定した。

4.2.4 物質の表面状態

シンチレータや MPPC パッケージの表面状態、すなわち表面の滑らかさや、反射材の有無について 定義する変数 (G4OpticalSurfaceFinish) が設けられている。

polished 表面が完璧に研磨された状態。全反射が起こる。

ground 表面が荒く、研磨されていない状態。

polishedfrontpainted 表面が研磨されており、反射塗料が塗られた状態。

polishedbackpainted 表面が研磨されており、反射材で覆われた状態。物質表面に無限に薄い空気層 のようなものを考え、その屈折率が計算に使用される。

シンチレータ表面を polishedbackpainted に指定することで、反射材を別に定義して配置せずに、反 射材とシンチレータ間の反射を再現するようにした。Dimple 表面と、MPPC のエポキシ樹脂表面は polished に指定した。

また、表面を polished、polishedbackpainted に設定すると σ_{α} という表面の荒さを示すパラメータで 散乱具合を指定することができる。すなわち、散乱角 α が標準偏差 σ_{α} のガウス分布に比例した角度分 布で発生するような表面に仕上がる。

4.2.5 反射の種類

反射の種類は以下の4つが挙げられ、模式図としては図4.3のように表される。これらの反射がシン チレータ表面で表4.1にまとめてあるような割合で発生するように設定した。

Specular spike (鏡面反射) 光の進行方向に向かう鋭い反射。

Specular lobe Specular spike の周囲に広がりを持つ反射。

Diffuse lobe 境界面でのランバード反射。

Back scattering(後方散乱) 入射と同じ経路を逆方向に折り返す反射。

4.2.6 吸収長

シンチレーション光が吸収されると、その光子の Tracking を終了する。シミュレーションでは、設定 した吸収長がシンチレーション光が吸収されるまで媒質中を進む距離の平均となる。



図 4.3: 反射の種類 [28]

4.3 シミュレーション方法

電子線源として、particle gun のヒスト機能、/gps/hist で⁹⁰Sr のβスペクトラムを再現するように 指定することで電子を生成した。このとき、最低エネルギーは⁹⁰Sr が実際に放出するエネルギー値には せず、トリガーカウンタに到達することができる最低のエネルギーに設定している。1 Run にこの電子 を 10000 生成してシンチレータに照射した。実験と同様、電子の照射位置は図 3.15 に示した通りである。

[†]シンチレータのシンチレーション効率、屈折率はデータシート [16] を、反射率はデータシート [19] を、エポキシ樹脂の屈 折率、シンチレータの吸収長、Birks 定数はサンプルコード [29] を、物質表面で起こりうる反射の種類の割合と σ_{α} は [26] を 参照した。

	パラメータ値
シンチレーション効率 (EJ-212) [photons/MeV e ⁻]	100000
シンチレータの屈折率	1.58
エポキシ樹脂の屈折率	1.55
Specular spike	0
Specular lobe	0.9
Diffuse lobe	0.1
Back scattering	0
シンチレータの吸収長 [cm]	80
エポキシ樹脂の吸収長 [cm]	220
反射率	0.98
$\sigma_{\alpha} \text{ [rad]}$	0.1
Birks 定数 [mm/MeV]	0.126

表	$41\cdot$	シ	Ξ	ユ	\mathcal{V}	ーシ	Э	ン	ກາ	ペラ	X	ータ
1	T . L .	~	`	_	~	~	_	~	v / /	• /	· · ·	~

イベント選別の方法として、エネルギーが小さいまたは、通過しない経路をとることでトリガーカウ ンタに到達することができずシンチレーション光を生成しなければカットされる。

イベントディスプレイ図 4.4 で見られる赤い線が電子の飛跡、緑の線がシンチレーション光の光路、タ イル外にある青い Detector がトリガーカウンタである。図 4.4c において、タイルから飛び出している 1 個のシンチレーション光は Dimple から MPPC パッケージを通過することなく World 外に出たもので あるが、これが MPPC の受光面に入射し検出効率にしたがって検出されるとこのイベントでは 1 光電 子検出ということになる。



図 4.4: optical photon の Tracking のイベントディスプレイ

結果と考察 4.4

図 4.5 にシミュレーションによる光電子分布とフィッティング結果を示す。シミュレーションによって 得られた光電子数は 26.32 ± 0.16 p.e.[§]であった。EJ-212 の実際の発光量は、[30] によると ~ 42 p.e. で あり、シミュレーション結果は比にして~63%である。次に、参考文献[30]で研究されている基準の タイルとは異なるサイズの 60 mm 角タイルについてのシミュレーションを行った。その結果、11.27 ± 0.05 p.e. が得られ、30 mm 角タイルのシミュレーション結果との光量比が 11.27/26.32 = 0.428 となっ た。一方、実測は [30] によると、60 mm 角タイルの光量は~18 p.e. であるので、18/42 = 0.429 となり 光量比はシミュレーションでよく再現されている。さらには、このシミュレーションで得られた 30 mm 角タイルの発光量は、本研究では⁹⁰Sr に従うβスペクトラムを照射したことと先行研究 [17] では⁹⁰Sr の β スペクトラムのエンドポイントに相当する 2.28 MeV の電子を生成していることを考慮すると結果 とおおよそ一致している。したがって、実験値との相違の原因として発光量の絶対値に帰結すると考え られ、シミュレーションの改良については今後の課題としたい。



p.e. number distribution

図 4.5: シミュレーションによる光電子数分布

本研究で構築したシミュレーションコードはシンチレータの絶対的な光量の評価を行うには課題は残っ ている。しかし、本来の目的であるシンチレータタイルユニットの設計を最適化を行うのには十分なも のであり、このコードを基本として半径を変えて dimple のデザインの最適化、タイル内の光量分布等他 の研究にも応用することが可能となった。

第III部

大型技術試作機の試験

第5章 大型技術試作機の建設

2018 年夏 CERN SPS でのテストビーム実験に向け、ドイツの DESY を中心に AHCAL の大型試作機 を建設した。ビーム試験前に、AHCAL の検出層 HBU の大量のチャンネルを試験、較正するために東 京大学が開発した宇宙線試験装置 [23] を用いた宇宙線による試験と DESY の電子ビームによるビーム試 験を行った。

5.1 AHCAL 大型技術試作機

AHCAL 大型技術試作機は、ドイツの DESY を中心として数多くの研究機関で個別に研究開発を進め てきた技術が統合され、それぞれの検出器技術やソフトウェアを実際に組み上げられた検出器を用いて 試験するため建設が進められてきた(図 5.1)。CALICE AHCAL グループは 2018 年夏の CERN SPS のハドロンビームを用いたビーム試験に向け、2018 年の春ごろ過去最大規模の AHCAL 技術試作機をつ いに建設完了した。総チャンネル数にしておよそ 22000 個、HBU の数は 156 枚あり、これは AHCAL バレルの1%に相当する数である。ジオメトリとしては図 5.2 のようになる。

この AHCAL 大型技術試作機建設の主な目的として以下のことが挙げられる。

- 実際のハドロンイベントに対する検出器の応答の調査
- デザイン通りの分解能を達成できるか確認
- 検出器中でのハドロンシャワーが成長する様子の理解
- 実機のAHCALへのスケーラビリティの確認
- 試作機の統合システムのコントロール



図 5.1: AHCAL 建設の流れと各機関の住み分け [25]



図 5.2: AHCAL 大型技術試作機のジオメトリー [25]

5.2 宇宙線試験装置による試験

鉄の吸収層のスタックにインストールする前に HBU を大量に同時に試験、較正するため、1×1 HBU のチャンネル全てをカバーできる大きさを持ち、宇宙線を用いてチャンネル応答を調査することができ る宇宙線試験装置、宇宙線カウンタを2枚開発した [23]。宇宙線カウンタを用いて、HBU の MIP に対 する応答を試験する。

5.2.1 宇宙線試験装置の性能

図 5.3 のように試験する複数の HBU を挟むように宇宙線カウンタを上下に配置し、宇宙線をトリガー する。さらに、宇宙線カウンタは3-4 mm という高いヒット位置分解能を有しており、二枚の宇宙線カ ウンタを用いて宇宙線の飛跡を引くことができる。

宇宙線カウンタの構造は、プラスチックシンチレータに WLS ファイバーを交差して埋め込んだもの である(図 5.4)。ファイバーの本数は168本であり、その両端から SiPM を用いて信号を読み出すため 膨大なチャンネル数となる。読み出しチャンネル数を削減するため周期的にファイバーをまとめ、結果 として 64 チャンネルにまで減らした。トリガー判定方法として、ダークシグナルより若干大きな波高を 閾値として設定し、64 チャンネル全ての OR でかけた。周期的にファイバーを束ねているため、イベン トの再構成の際に、図 5.5 のように宇宙線カウンタ上には本来のヒット位置とは別に多数の偽ヒットが 生じてしまう。このトラック選別の詳細については後述するが、HBU のヒット情報から正しい飛跡を選 び出す。

5.2.2 実験セットアップ

宇宙線試験は DESY の実験ホール Hera West で行った。HBU のラックに 2 台の宇宙線カウンタを導入し(図 5.6 左)、それらの間に 2 × 2 HBU を 4 層ないしは 6 層入れて測定を行った。図 5.6 左は外観



図 5.3: 宇宙線試験装置の概略図



図 5.4: 左 : シンチレータに埋め込まれた WLS ファイバー 右 : 束ねられ SiPM に接続されたファイバー [23]



図 5.5: HBU のヒットを用いた本物のヒットの特定 [23](白点:宇宙線カウンタ上のヒット候補、赤点:HBU 上のヒット)

がアルミフレームである2台の宇宙線カウンタの間に2×2HBU(図5.6右)が6層導入されている場合である。

宇宙線カウンタは1×1 HBUを測定するために設計されており、よってこのセットアップのような2×2 HBUからなる大きな検出層全域を同時に測定することはできない。したがって、宇宙線試験はビーム試験をする際に最もビームの当たる重要な領域である、検出層の中心部分(図 5.6 右の線の内側)の 測定を行った。



図 5.6: 左: HBU ラックに導入された宇宙線カウンタと 6 層挿入された 2 × 2 HBU。右: 2 × 2 HBU。 fleaxlead で HBU 同士が接続されている。線で囲まれている領域が宇宙線カウンタが試験可能な領域。

実験中は2台の宇宙線カウンタをブラックシートで遮光し、さ らに HBU ラック全体も遮光した。その際 HBU の制御を行う DIF ボードの発熱によるセットアップ内の温度上昇が懸念された。そ れを防ぐため、図 5.7 のような小型のファンを DIF ボードの上下 に設置し空冷した。HBU や DIF に複数組み込まれている温度計 により検出層の温度は常にモニターされ、測定中±1℃以内で非 常に安定していることが確認された。



図 5.7: 冷却のための小型ファン

5.2.3飛跡選別

宇宙線カウンタの原理上、図 5.5 のようにカウンタ上に白点の偽 ヒットが1辺に5または6点生じる。すなわち本来のヒット点も含 めて1台に5×5、5×6、または6×6個の候補点が生じる。その中か ら検出層のヒット情報を用いて本来のヒット点を選び出す。図 5.8 は 応答があったチャンネルの中心座標 x_iと候補となる飛跡との最短距 離 $x_i - X_i$ を示したもので、この値を用いて χ^2 の値、

$$\chi^{2} = \sum_{i}^{\text{nHit}} \frac{(x_{i} - X_{i})^{2}}{\sigma^{2}}$$
(5.1)

が最小となるものを本来の飛跡とした。ここで、σは宇宙線カウン タの位置分解能と検出層のチャンネルの大きさに依存するパラメー タであり、和は応答があったタイルに対して行っている。図 5.9 は、ある事象で候補となり得る (5×5) × $(5 \times 6) = 750$ の飛跡についての χ^2 の分布を表している。

図 5.8: 応答があったタイルの座標と 飛跡候補との最短距離



図 5.9: χ^2 分布。この事象では 100 < χ^2 < 200 に 3 つの飛跡候補があり、そのうち χ^2 が最小値をとる 飛跡を本来の飛跡とする。

この手続きを経て、図 5.10 のように実際の宇宙線イベントが描写できる。赤い線が宇宙線の飛跡、四角 い線が応答があった検出層のチャンネル、上下の黒い点が宇宙線カウンタ上のヒット候補を示している。

5.2.4較正

外部トリガーモードで LED ランを走らせることで、各チャンネルのゲインを求めていく。まず、LED に0Vの電圧をかけることでペデスタルの ADC 値を測定する。得られた ADC 分布(図 5.11 左)をガ ウス関数でフィットし、その平均値をペデスタル値とした。

LED や MPPC の個体差があり同じ印加電圧でも LED の光量が一様とは限らないために、LED にか ける電圧値を徐々に上げて行き、全てのチャンネルで適切な光量か観測されるようにしてゲイン較正を 行った。こうして図 5.11 右のような ADC 分布が得られ、この分布にマルチガウス関数をフィットさせ てゲインを求めた。





図 5.10: 本来の飛跡が引かれたイベントディスプレイ。実際にはこの図とセットアップは上下が反転している。



図 5.11: 左:ペデスタルランで得られた ADC 分布。ここでは LED に印加電圧 5 V をかけているが、この電圧値ではペデスタルしか見えない。 右:あるチャンネルで得られた ADC 分布。

ペデスタルおよびゲインの較正は宇宙線試験に限らず、DESY でのビームテスト、CERN SPS でのテ スト等試験場所を変更したり、実験日時にある程度のブランクができたりするたびに実行しており、こ れ以降示していくデータ解析においてその都度得られた較正値を使用している。

5.2.5 アライメント

検出層は図 5.6 左のように各層ラックの枠に挿入されているが、奥行き方向または横方向に各層毎に 枠が正確にアライメントされていない可能性がある。おおまかな実測値によると最大で、奥行き方向に ~4 mm、横方向に ~3 mmの検出層の位置に関する不定性がある可能性が報告されており、再構成さ れた宇宙線の飛跡からアライメントを行った。

アライメントの評価には前項同様宇宙線カウンタが覆う中心部分 12 × 12 チャンネルを用いる。まず 図 5.12 のように、あるチャンネルに注目し、そのチャンネルから応答があった時に宇宙線カウンタから 得られる宇宙線の飛跡の *x* 座標、ここでは横方向に相当する座標をヒストグラムに詰める。*y* 座標も同 様に行う。フィッティング関数として誤差関数、

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$
 (5.2)

の線型結合したものを採用する(図 5.13)。ここで、宇宙線カウンタの位置分解能 σ_{position} はタイル上で のヒット位置の誤差として伝搬し、この誤差関数のパラメータになるはずである。求めたい検出層の位 置は、図 5.13 右において宇宙線カウンタからの相対的な位置のズレがない赤線から青線へシフトした分 の距離となる。



図 5.12: ヒストグラムに詰める x 座標の情報

図 5.14 は、図 5.12 の手続きである注目したチャンネルにヒットがあったときの宇宙線の HBU 上の *x* 座標を詰めたヒストグラムとフィッティングした結果を示している。さらにフィッティング関数がシフ トした距離、すなわち検出層の宇宙線カウンタに対する相対的なズレはフィッティング関数の両側のシ フト分の平均値として計算した。ここでは、図 5.13 右において、赤線から青線への両端の移動距離の平 均値である。結果として、平均で横方向には ~ 1.6 mm、奥行き方向には ~ 0.16 mm のズレがあり、報 告されていた実測値の値に収まっている。以降の解析では、各検出層のアライメントの結果を考慮して 行った。

図 5.15 を見ると、2つのピークがあるのがわかる。今回測定した範囲の HBU を1×1 HBU ごとに図 5.16 のように色分けしてプロットしなおすと、図 5.17 となる。横方向(x 方向)の結果をみると、上下 同士の HBU は位置がほとんど同じであることがわかる。同様に奥行き方向(y 方向)の結果は左右同士 の HBU の位置がほとんど同じである。すなわち、2 ピークの由来は HBU の POWER と、奥行き方向 の HBU 同士に接続されている flexlead によって生じたであろう隙間によるものであると考えられ、そ の隙間はたかだか 3 mm 程度であることがわかる。また、横方向には HBU を挿入しているカセットの 厚みも含まれる。この隙間に関して、他の層においても同様の結果を得ることができた。



図 5.13: 左:フィッティング関数の概形。緑線が $\sigma_{\text{position}} \sim 0$ の時であり、赤線が $\sigma_{\text{position}} \neq 0$ の時で ある。右:宇宙線カウンタとの相対的なズレがあった場合のフィッティング関数のシフト。赤線がズレ なしの場合、青線がズレありの場合である。



図 5.14: タイルにヒットがあった時の HBU 上の宇宙線の飛跡の x 座標



図 5.15: 第1層の検出層のズレ。左: 横方向 右: 奥行き方向



図 5.16: 測定した1×1 HBU ごとの色分け



図 5.17: 第1層のチップごとの検出層のズレ。左:横方向右:奥行き方向

5.2.6 HBU のチャンネルの応答結果

図 5.18 は宇宙線試験で得られたあるチャンネルでの MIP 分布の一例である。図 5.19 に宇宙線試験で 得られた MIP に対する光量マップの例を示す。ここでは、この図の光量値はタイル内を宇宙線が走った 距離を考慮した角度補正を施している。すなわち、垂直方向と宇宙線の飛跡とのなす角度が θ のとき、 あるチャンネルで得られた光量に cos θ をかけて垂直入射した時の光量になるように補正した。



図 5.18: 宇宙線試験で得られたあるチャンネルにおける MIP 分布

5.2.7 検出効率

再構成された宇宙線の飛跡を用いて、検出層の各チャンネルの検出効率を調べた。タイルのヒット判定は 0.5 MIP 閾値によって行われるので、これを用いて検出効率の計算を行った。

検出効率の計算方法は、チャンネルからの応答数とそのチャンネルを通過した宇宙線の数の比で求める。宇宙線カウンタは、14×14 チャンネル分の領域をカバーしているが、領域の境界付近では上下の 宇宙線カウンタのアクセプタンスのエッジにあたるため、十分な統計が得られない。したがって、検出 効率を計算するチャンネルは1層の検出層にあたり12×12 チャンネルとした。さらに、ヒット判定に ついて、宇宙線カウンタの位置分解能が3~4 mm であることを考慮し図 5.20 のようにタイルのエッジ



Cosmic Ray Light Yield Map

図 5.19: 宇宙線試験装置によって得られた光量マップ

から5 mm 以内の領域に再構成した宇宙線の飛跡が通過した事象は検出効率の評価に使用しないことに した。また、ある層のチャンネルの検出効率を求める際、他の5層において5ヒット以上の応答があっ たときに飛跡選別を行って検出効率を求めた。

図 5.21 が今回のセットアップで調査できたチャンネル全ての検 出効率を表した分布であり、結果として平均で ~ 93 % 程度の検出 効率を持っていることがわかった。図 5.22 は第1層目の検出層にお ける検出効率マップである。全体的な傾向として、宇宙線カウンタ のアクセプタンスのエッジ付近のチャンネルは統計が少ないため、 誤差が少し大きくなっているのがわかる。

テストビーム実験におけるヒット判定は、ノイズと信号の区別を するため 0.5 MIP の閾値を設定している。このことから、検出層の 非検出効率はこの閾値によるものと考えられる(図 5.23)。

5.3 テストビームによる試験



初めの第1層目の2×2 HBU は宇宙線による試験を行ったのち、 2017年12月 DESY の電子ビームを用いた動作試験、較正がなされ た。最終的に、2018年春ごろまでには大型技術試作機の全ての検 出層に対して宇宙線試験とビーム試験が行われた。ここでは、最初

図 5.20: 検出効率計算に用いられる 飛跡の判定を表す模式図

に試験された第一層目のビーム試験の較正結果、および宇宙線試験の較正結果との比較を示す。

5.3.1 検出層試験完了までの流れ

2017 年 12 月 AHCAL 大型技術試作機の初めの 2×2 HBU のビーム試験の終わりを皮切りに、様々な 研究機関から新たな層の HBU が DESY に到着した。全ての層に対し宇宙線試験を行い、2018 年 2 月に 行われた DESY の電子ビームを用いてさらなるビーム試験を行った。最終的には、2×2 HBU 38 層、計 152 枚の HBU の宇宙線試験を 2018 年春に終えた。



図 5.21: 検出効率の分布

[mm]	— 92.9	96.6	92.5	95.0	93.5	95.2	93.3	93.5	93.4	92.8	94.0	91.6
	—± 1.8	± 1.1	± 1.5	± 1.2	± 1.3	± 1.2	± 1.3	± 1.3	± 1.3	± 1.4	± 1.3	± 1.9
×150	- 95.8	94.7	93.2	95.3	94.1	95.5	94.5	94.5	93.5	95.9	93.2	95.4
	-± 1.3	± 1.2	± 1.1	± 0.9	± 1.0	± 1.0	± 0.9	± 1.0	± 1.1	± 0.9	± 1.2	± 1.2
100	— 97.1	96.2	95.6	96.0	96.5	97.2	93.8	95.2	94.7	94.3	94.7	94.9
	— <u>+</u> 0.9	±0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.7	±0.7	± 0.9	±0.8	± 0.9	± 0.9	± 0.9	± 1.1
•	- 92.9	95.4	95.7	94.7	94.9	97.0	92.0	96.6	95.9	95.9	97.4	95.4
	-± 1.4	±0.9	± 0.8	± 0.9	± 0.8	± 0.6	± 1.1	± 0.7	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 1.1
50	95.7	94.2	95.5	96.7	96.1	96.6	96.9	95.7	95.9	93.5	95.1	96.3
	± 1.0	± 1.1	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.7	± 0.7	±0.8	± 0.7	± 1.0	± 0.9	<u>+</u> 0.9
0	_ 94.4	96.2	97.5	95.9	97.0	97.2	95.9	96.8	97.2	97.5	97.8	96.4
	_± 1.3	±0.8	± 0.6	± 0.8	± 0.7	±0.6	± 0.7	±0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.9
Ŭ	— 95.3	95.1	93.6	95.4	95.1	95.3	94.3	95.1	94.6	92.8	93.4	96.1
	—± 1.1	± 1.0	± 1.0	± 0.8	± 0.8	± 0.8	± 0.9	±0.8	± 0.9	± 1.0	± 1.0	± 0.9
-50	- 93.8	95.9	94.6	95.3	94.1	95.6	94.6	93.7	93.0	92.3	94.2	95.7
	-±1.3	±0.9	± 1.0	±0.9	± 0.9	± 0.8	± 0.9	± 1.0	± 1.0	± 1.1	± 1.0	± 1.0
	- 94.2	94.0	95.3	93.8	94.9	95.1	93.3	91.7	94.2	94.6	93.6	93.2
	-± 1.4	± 1.1	± 0.9	± 1.0	± 0.8	± 0.9	± 0.9	± 1.1	± 1.0	± 0.9	± 1.0	± 1.3
-100	9 4.5	93.3	96.1	95.3	93.4	94.8	93.6	94.3	93.0	94.1	92.4	93.7
	± 1.3	± 1.2	± 0.8	± 0.9	± 1.0	± 0.9	± 1.0	± 1.0	± 1.0	± 1.0	± 1.1	± 1.2
-150	— 91.6	94.2	94.3	94.4	94.3	94.7	92.9	94.9	95.7	94.4	92.9	92.9
	—± 1.9	± 1.3	± 1.1	± 1.0	± 1.0	± 1.0	± 1.1	± 1.0	± 1.0	± 1.0	± 1.2	± 1.4
100	- 99.4	95.0	94.6	93.2	96.1	96.8	95.0	95.4	96.0	95.6	95.3	91.2
	-±.0.6	± 1.5	±1.3	± 1.6	± 1.0	± 1.0	± 1.1	± 1.1	±_1.1	± 1.2	± 1.3	± ₁ 2.0
	-1	50	-100)	-50	(0	50		100	15	50 / [mm]

Efficiency Map

図 5.22: 第1層目の検出層の検出効率マップ。この図ではパーセント表示である。上段の数字は検出効率、下段は誤差を表す。



図 5.23: 0.5 MIP カットを示したポンチ絵

5.3.2 ビームライン

DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron、ドイツ電子シンクロトロン)が所有する DESY II は電子・陽電子シンクロトロンであり、かつて DORIS や PETRA 向けに使用されていた。DESY II のリングの平均半径は 46.601 m あり、周波数 12.5 Hz の正弦波モードで粒子の加速・減速を行う。ビームは 1 cm² あたり 1000 粒子あり、エネルギーは 1 ~ 6 GeV、エネルギー幅は ~ 5 %、~ 1 mrad の大きさを持っている。



図 5.24: DESY II のレイアウトを示した概念図 [31]

以下では AHCAL のビーム試験で使用された図 5.24 におけるエリア T24 について解説する。

加速された電子・陽電子ビームは円形リング内にあるカーボンファイバーとの衝突により制動放射ビームを生成する。制動放射ガンマ線はコンバータターゲットにより電子・陽電子対に変換される。今回はCuの3mm厚のプレートを用いた。それによって、図5.25のように~5kHzのビームレート、3GeVの電子で実験を行った。変換後の電子は2つの二重極磁石によって軌道を曲げられ、さらに2つのコリメータを通して散乱した粒子を取り除き、ビームはエリアに到達する。図5.26は上記の装置が描かれたレイアウトである。

5.3.3 実験セットアップと方法

図 5.27 のように 2×2 HBU 一層分をビームエリアに置き、動作試験を行った。このセットアップは宇宙試験時同様ブラックシートで遮光した。HBU を実装したアルミフレームを図のように可動式ステージにセットした。このステージは EUDAQ*で操作可能であり、全自動で各チャンネルの MIP スキャン

^{*}C++で書かれた DAQ プラットフォーム



図 5.25: DESY II の T24 で得られるビームのレート [31]



図 5.26: DESY II のビームエリアを表した詳細な図 [31]

を行った。

実験手法としては、全24×24 チャンネルに対しタイル1つ1つにビームを照射した。それにより各 タイルで~15000 イベントの統計を得ることができた。また、電子ビームはコリメータにより十分絞ら れているため、タイルのサイズの4分の1程度以下の範囲に照射した。



図 5.27: DESY II における HBU テストビーム実験セットアップ

5.3.4 電子ビームによる較正結果

図 5.28 は 2 × 2 HBU 全チャンネルに電子ビームを照射して得られた光量マップであり、図 5.29 はその分布である。

平均として 14.4 p.e. の光量を得られ、チャンネル毎のばらつきは 13.4 %であった。

5.3.5 宇宙線試験との比較

図 5.30 は図 5.28 の中心部分、すなわち宇宙線カウンタで試験された範囲だけを取り出したテストビー ム実験の光量の結果である。各チャンネルの光量値を宇宙線試験の結果との比をとったものが図 5.31 で ある。ここでは、宇宙線試験の結果は角度補正したものを用いた。結果として、テストビーム実験の結 果は宇宙線試験の結果とおおよそ一致したが、図 5.32 のように平均として 5 %程度テストビーム実験の 結果の方が光量が低くなっている。[32] にあるように、宇宙線試験とビーム試験の行った場所の変化に より実験環境の温度変化によってプラスチックシンチレータの発光量に影響を及ぼした可能性がある。 また、宇宙線と電子ビームという照射粒子の違いでシンチレータの光量に違いが生じた可能性も考えら れる。本研究では、温度の違いや照射粒子の違いで発光量が変化する効果を補正して比較することはで きなかったが、検討の必要があることを示唆することができた。



HBU light yield map in DESY

図 5.28: 2 × 2 HBU の応答



図 5.29: 2 × 2 HBU1 層分全チャンネルの光量



Light Yield testbeam

図 5.30: 宇宙線カウンタが覆う範囲のビーム試験による HBU の応答



Light Yield Ratio testbeam/cosmic

図 5.31: 宇宙線試験とビーム試験との結果の比 (ビーム/宇宙線)



図 5.32: 宇宙線試験とビーム試験との結果の比

第6章 大型技術試作機のビーム試験

DESYのAHCALグループを中心に2018年春にAHCAL大型技術試作機を完成させた。実際にハドロンビームを照射してAHCAL大型技術試作機の応答を見るため、CERN SPSに搬送して5月、6-7月の2回テストビーム試験を行った。本章では、テストビーム試験のデータ解析の結果の一部を報告する。

6.1 ビームライン

CERN の SPS (The Super Proton Synchrotron) は、図 6.1 に示しているように CERN が所有する 加速器の中で2番目に大きな装置であり陽子シンクロトロンと LHC との橋渡し的な役割を担っている。 1983 年の W 粒子、Z 粒子の発見でノーベル賞受賞に貢献した。450 GeV まで加速が可能であり、硫黄 核や酸素核、電子、陽電子、陽子、反陽子を加速することができる。リング上には、1317 個の電磁石と、 粒子の軌道を変えるための二重極電磁石が 744 個含まれている。



図 6.1: CERN 加速器概略図 [34]

AHCAL 大型技術試作機のテストビーム実験は SPS North Area の実験ホールの一つ、EHN1のH2二 次ビームを用いて PPE172 ビームエリアで行われた (図 6.2、図 6.3)。H2 ビームラインは高エネルギー高 分解能のビームラインであり、一次粒子である 400 (450) GeV/c の陽子ビームまたは二次ビームである 10 - 360 GeV/c のハドロンや電子、ミューオンを供給可能である。ビーム強度は 1 spill に最大 2 × 10⁸ 個の粒子数を持つ。1 spill の構造として、4.8 - 9.6 秒の長さをもつバンチであり、14 - 48 秒ごとにエリ アに供給されるが、spill の長さと周期は SPS の施設を利用する実験グループの数に依存する。

図 6.4 は、実験エリア H2 - PPE172 に設置されている検出器の配置を示した模式図である。AHCAL 大型技術試作機のビーム上流直前にはビームのトリガーを行うプラスチックシンチレータ、さらに上流 にはビームの位置を測定するワイヤーチャンバーが設置されている。



図 6.2: H2 PPE172 実験エリアレイアウト [33]



図 6.3: H2 PPE172 実験エリア



図 6.4: 実験エリアに設置されている検出器

6.2 セットアップ

図 6.5 は 2 回目のテストビーム実験時 6 - 7 月のセットアップを横から撮影したものである。5 月のテ ストビーム実験は試作機の動作確認が主な目的であり、比較的スムーズに実験が進み目立ったトラブル なく終了できた。それを踏まえ、2 回目の実験では様々なビームを当てることで多くのデータを取り、さ らにより詳細に粒子シャワーの研究を行うために付加的な検出器を実装した。したがって、Tail Catcher (図 6.8) と Preshower 検出器(図 6.7) は 2 回目のテストビーム実験時のみ実装された。2 回目のテスト ビーム実験時のセットアップについて説明する。



図 6.5:2回目のテストビーム時のセットアップ [36]

図 6.6 は AHCAL 大型技術試作機の内装の様子である。試作機のジオメトリとしては 37 層までは通 常の検出層、38 層目に大きいタイルの特別な検出層、39、40 層目を飛ばして 41 層目に通常の検出層と なっている。吸収層には、EUDET の鋼鉄製スタックが用いられ各層の厚みは 17.2 mm である。

Preshower 検出器(図 6.7)は、1×1 HBU であり、後の節で述べるように試作機に到達する前にシャ ワー化を起こしたイベントを排除するための検出器である。カセットにセットされた Preshower 検出器 をステージから2×2 HBU上の中心部分に配置されるようにプラスチック製のプレートでオフセットを 調整し、白色テープで留めてある。

Tail Catcher (図 6.8) は1×1 HBU と 74 mm の鉄の吸収層の 12 層で構成されており、粒子のシャ ワー化が遅くに始まるイベントと試作機からのエネルギー漏れを測定するために設置された。



図 6.6: AHCAL 大型技術試作機の内部構造 [36]



図 6.7: Preshower 検出器





6.3 ビームテストで取得したデータの概要

実験において、3タイプの粒子ビームを照射した。照射したビームの粒子タイプとエネルギー、統計数を表 6.1 にまとめる。それぞれの粒子のタイプで観測した典型的なイベントディスプレイを図 6.9 に示す。

ミューオンビームは MIP 較正のために検出器を動かして数カ所の位置に入射し、電子ビーム、パイオ ンビームに対しては様々なエネルギーのビームを照射しエネルギースキャンを行った。power pulsing の on-off に対する応答を調査するために電子・パイオンを照射した際は on-off それぞれの状態でデータを 取った。さらに、パイオンビームに対しては、粒子分別に関する研究を行うために照射位置をいくつか 変えてデータを取得した。





(c) パイオン 160 GeV

図 6.9: 6-7月のセットアップで観測した各粒子タイプの典型的なイベントディスプレイ

	Particle Type	Beam Energy [GeV]	Total Events $[\times 10^5]$		
First Beam Time	electron	10	7.50		
	electron	20	9.43		
	electron	30	6.15		
	electron	40	15.2		
	electron	50	19.5		
	electron	60	6.37		
	electron	80	6.12		
	electron	100	9.79		
	pion	10	15.5		
	pion	15	5.11		
	pion	20	12.9		
	pion	30	10.0		
	pion	40	13.7		
	pion	50	8.20		
	pion	60	12.4		
	pion	80	12.6		
	pion	100	11.0		
	pion	120	10.1		
	pion	160	9.14		
	muon	40	335		
	muon	120	81.2		
Second Beam Time	electron	10	5.11		
	electron	20	4.06		
	electron	30	4.03		
	electron	40	4.33		
	electron	50	4.06		
	electron	60	4.03		
	electron	80	12.3		
	electron	100	4.09		
	pion	10	33.8		
	pion	20	5.21		
	pion	30	10.5		
	pion	40	5.04		
	pion	60	23.0		
	pion	80	5.21		
	pion	120	5.20		
	pion	160	8.73		
	pion	200	6.36		
	pion	350	0.800		
	muon	40	62.9		

表 6.1: データの統計*

6.4 Preshower 検出器によるイベント選別

1回目のテストビーム実験では、ビームライン上の物質に当たるなどして AHCAL 試作機に到着する 前にシャワー化した事象が問題となった。そこで2回目のテストビーム実験では、そういったシャワー 事象を除くために Preshower 検出器を導入した。

以下では、シャワーのイベントが際立って見えた電子の Run データの中でも、特に 50 GeV、power pulsing が on の状態の電子を照射した Run データを用いて Preshower 検出器によるイベント選別手法 を示していく。

図 6.10 左はセットアップ全体で得られた総エネルギー、図 6.10 右の縦軸はヒットチャンネルの数、横軸はビーム軸方向の重心を示している。ここで、重心 cogZ (Center Of Gravity Z) は

$$\cos \mathbf{Z} = \frac{1}{E} \sum_{i=1}^{n \text{Hits}} z_i E_i \tag{6.1}$$

のように応答があったチャンネルのビーム軸方向の座標にエネルギーで重みを持たせて計算される。図 6.10 右において、電子は総ヒット数がおおよそ 200 付近にピークとなるようなイベントであり、それよ りも総ヒット数が多く、また広く重心が広がっているのがハドロンコンタミネーション、総ヒット数が 50 付近に重心に対して細く長く分布しているのがミューオンである。セットアップのすべてを貫通する ミューオン事象の総ヒット数 ~ 50 は試作機、Tail Catcher の層数と一致する。

イベント選別のモチベーションとしては、図 6.10 左においてピークよりも低い領域にテールを引いて いるイベントを Preshower 検出器で取り除くことである。選別されるベきイベントは図 6.10 右において 上記の粒子が分布していない領域のイベント、すなわち総ヒット数が小さく重心が ~ 500 mm 以下に分 布しているイベントに対応する。基本的には、Preshower 検出器におけるヒット数が少ない事象を選択 することで preshower 事象を落とす。



図 6.10: 左 : 50 GeV の電子ビーム時の総エネルギー。右 : 50 GeV の電子ビーム時の総ヒット数と重 心の分布。

6.4.1 選別の過程

図 6.11 は、Preshower 検出器におけるヒット数分布を示している。ヒット数1の事象がほとんどであ るが、ヒット数が1でないイベントも少なくない。総イベント数に対する各ヒット数でのイベント数の 割合を表 6.2 にまとめる。

^{*}この表では power-pulsing モードの on-off を区別していない



図 6.11: 50 GeV の電子ビーム時の Preshower 検出器におけるヒット数分布

表 6.2: 50 GeV の電子ビーム時の Preshower 検出器におけるヒット数ごとのイベントの割合

ヒット数	イベント数	割合 [%]
0	8239	4.8
1	116692	69
2	19479	18
3	8896	5.5
4	2685	1.6

ヒット数が0の場合

ヒット数が0のイベントが比較的存在し、これは0.5 MIP の閾値でカットされてしまったイベントで あると考えられる。この時の総エネルギーと総ヒット数-重心の分布を図 6.12 に示す。Preshower 検出器 におけるヒット数が0の事象では、電子ビームとは無関係と考えられるエネルギーが低いイベントが多 く見られるが、その一方で電子によるピークに分布するイベントも多く含まれるのが特徴である。しか し、テールの事象の割合が特に高いわけではないので、このヒット条件はテール事象を落とすのに有効 ではない。

ヒット数が1の場合

図 6.13 は Preshower 検出器におけるヒットマップであり、ビームはコリメータにより十分絞られているため、Preshower 検出器で最もヒット数が多いタイルを中心とした3×3のタイル領域にヒットがあった事象のみを考慮する。

排除したいイベント全てが検出器到達前に発生したシャワーであるならばこの選別でほとんどのテー ル取り除くことが可能であると予想されたが、図 6.14 より、依然としてテールが残っていることがわか る。残ったテール事象は、ビーム中のエネルギーの低い電子のコンタミネーションであると考えられる。 しかしながら、比を見るとテール事象がある程度減っているのがわかる。ヒット数が0の場合とは違っ て、200 MIP 未満のエネルギーが低いイベントは比較的少ない。



図 6.12: ヒット数0の時の 左:総エネルギー(青:イベント選別をしない場合の分布 赤:ヒット数0 の時の分布)。総エネルギーを表す図の下の分布は各ビンにおける選別をしない全てのイベントを表す 青色の分布(図 6.10 左の log スケール表示)とのイベント数の比を示している。 右:総ヒット数と重 心の分布。



図 6.13: ビームをチャンネル (I,J) = (17,9) に照射した時の Preshower 検出器のヒットマップ。ここで (I,J) はイベントディスプレイの図 6.9 において、ビーム上流から試作機を見て試作機の左下の端のチャンネルを (I,J) = (1,1) と定義し、縦方向に I 軸、横方向に J 軸としてタイルをナンバリングした座標である。


図 6.14: ヒット数1の時の 左:総エネルギー(赤色) 右:総ヒット数と重心の分布

ヒット数が2の場合

テール由来となるイベントがほとんど存在せず、エネルギー分布に至っては対称的なものになってお り優れた選別ケースである。このイベントは、2粒子が同時に侵入してきた場合とタイル間を粒子が通 過することで2チャンネル応答するという場合が考えられる。



図 6.15: ヒット数2の時の 左:総エネルギー(赤色) 右:総ヒット数と重心の分布

粒子がタイル間を通過したかどうかについて以下のように定量的に評価する。ヒット数が2のイベントの中からタイルが隣同士または斜めの関係になったイベント数を数え上げるとその割合は92.4%となり、2つのヒットのほとんどが隣り合うタイルで起こっているのがわかる。この考察に関する他のRun データを用いた結果を表 6.3 にまとめる。

イベント数が全イベント数の18%と比較的多く、かつ良質な選別を可能にしているため排除しない ことが適切である。

ヒット数が0、または1、または2の場合

以上の考察から Preshower 検出器におけるヒット数が0、1、2の場合のイベントを取り出すのが最も よい選別方法であると考えた。ヒット数が0、または1、または2の場合の結果を足し合わせた結果が図

Particle Type	Beam Energy [GeV]	Fraction [%]
electron	10	84.3
electron	30	89.7
electron	50	92.4
electron	100	93.8
pion	40	80.4
pion	80	78.4
pion	160	89.5

表 6.3: 隣接するチャンネルから応答があった場合のイベントの割合

6.16、6.17 である。イベント選別前との比が1 になっているエネルギーのビンを除くとピークあたりに 分布するイベントは Preshower 検出器による選別によって ~ 90 % 残り、一方テールイベントは ~ 70 % になっており、ある程度選別できていることがわかる。



図 6.16: ヒット数 0、1、2 の時の総エネルギー

エネルギーを考慮した選別

ヒット数による選別では Preshower 検出器で 0、または 1、または 2 個のチャンネルから応答があると きを採用したが、さらなる選別手法として Preshower 検出器で獲得したエネルギーによる選別を試みた。 Preshower 検出器でのヒット数が 1、または 2 のイベントでさらに取り除きたいイベント、ここでは、

$$0 < \cos Z < 300 \tag{6.2}$$

$$0 < nHits < 150 \tag{6.3}$$



図 6.17: ヒット数 0、1、2 の時の総ヒット数と重心の分布



図 6.18: ヒット数 1、または 2 の時の Preshower 検出器で得られたエネルギー

を満たすイベントに焦点を当てその性質を調べる。上の条件を満たす Preshower 検出器のみで得られた エネルギー分布は図 6.18 となる。

シャワー由来のイベントであれば Preshower 検出器で落とすエネルギーは1 MIP より比較的高くなる ことが期待できる。また、Preshower 検出器におけるヒット数が2のみの場合はテールになりうるイベ ントが少なかったことを考慮して、ここでは Preshower 検出器で2 MIP 以上エネルギー損失があった 場合をカットする。結果として以下の図 6.19 右、6.20 右を得る。図 6.20 の比較を見れば明白であるが、 シャワー由来と考えられる赤いイベントがほとんどカットされていないことがわかる。



図 6.19: エネルギーカットによる総ヒット数-重心分布の変化。左:カット前。右:カット後。



図 6.20: エネルギーカットによるシャワーイベントと思われているイベントの総エネルギーの変化 (赤 色)。左:カット前。右:カット後。

6.4.2 結論

小節 6.4.1 から、本実験における Preshower 検出器を用いたイベント選別はビームが特に通過した 9 チャンネルに注目し、ヒット数が 0、または 1、または 2 のイベントを取ることでイベントレートを下 げることなくシャワー由来のイベントを最も排除できることがわかった。加えて、よりよくシャワーイ ベントを排除するためには AHCAL の情報を用いて総エネルギーによるカットや AHCAL 内で形成した シャワーの概形を調べる必要がある。

6.4.3 他のビームでの選別結果

小節 6.4.1 を踏まえた、他の Run データに関して Preshower 検出器によるイベント選別を行った結果 を図 6.21、6.22、6.23、6.24 に示す。ビームのエネルギーが低いほど、このイベント選別が効果的にな る傾向が見える。



図 6.21: 電子 10 GeV



図 6.22: 電子 30 GeV

6.5 Tail Catcher を用いたデータ解析

2回目のテストビーム実験で設置された Tail Catcher は、ハドロンシャワーが比較的遅く広がり始め たイベントの測定や大型試作機からどれほどのエネルギーが漏れたかを確かめることが主な役割である。

電磁シャワーは電磁相互作用で、制動放射と電子陽電子対生成を繰り返し起こしてシャワーが形成されるためシャワーの概形は図 6.9a のように密で短いことが特徴である。したがって、前節の図 6.17 のように重心と総ヒット数の分布において、特定の場所にイベントが集中する。一方、ハドロンシャワーはハドロンと物質中の原子核とが強い相互作用を引き起こすことで形成されるので、概形として図 6.9c のように奥行きのある疎なものとなる。さらに、シャワーが発達中には多くの軽いハドロンが生成されるためエネルギー分解能が悪くなってしまうのも大きな特徴である。

以上の理由から図 6.24b のように電子とは違い、重心がビーム下流側の方にも広く分布しているのが わかり、これは比較的ハドロンシャワーが遅くに発達し始めたイベントであることを表している。大型



図 6.23: 電子 100 GeV



図 6.24: パイオン 160 GeV

試作機と Tail Catcher との境界は Preshower 検出器からビーム下流の方へおおよそ 1070 mm の位置で あり、図 6.24b でもわかるように、Tail Catcher 内に重心があるイベントが多く存在していることから も Tail Catcher の存在意義は大きい。

6.5.1 エネルギー漏れ

図 6.25 は電子 100 GeV ビームの Run データで得られるエネルギー分布である。赤色は Preshower 検 出器、AHCAL 大型試作機、Tail Catcher で得られるエネルギー全てを足し合わせたものであり、青色は Tail Catcher のエネルギーを足していない結果である。図から明らかなように、電磁シャワーは比較的 短く大型試作機の中で形成し終えるため、ほとんどの電子は Tail Catcher に到達せず、結果として Tail Catcher で得られるエネルギーを無視しても総エネルギーの分布は変化しない。



図 6.25: 電子 100 GeV の時の総エネルギー。赤色は Tail Catcher で得られたエネルギーを合算した分 布、青色はしていない分布である。

一方、図 6.26 左はパイオン 160 GeV ビームの Run データで得られるエネルギー分布であり、以下の ような違いが見られる。

- Tail Catcher のエネルギーを考慮しなければエネルギー分解能が良くなる。
- Tail Catcher のエネルギーを考慮しなければピークが若干小さくなる。
- Tail Catcher のエネルギーを考慮すると 1800 MIP あたりにコブが見える。

コブに関して図 6.26 右の総エネルギーと重心の分布を確認すると、このエネルギーは重心が Tail Catcher の中にあるイベントと対応している。このようにパイオンが入射すると大型試作機からある程度エネル ギーが漏れてしまう。ここでは Tail Catcher を用いて漏れたエネルギーを概算した。

評価の方法として、セットアップ全体で得られたエネルギーと Tail Catcher で得られたエネルギーの 比で表す。図 6.27 は、重心が試作機の中にあるイベントか Tail Catcher の中にあるイベントかで色分け してある。重心が試作機の中にあるイベントは総エネルギーのほとんどは試作機の中で落としているの に対し、重心が Tail Catcher の中にあるイベントは総エネルギーの大部分を Tail Catcher で落としてい る。比が1に近いピークをなしているイベントは Tail Catcher の中からハドロンシャワーが発達し始め ていることを示しており(図 6.28)、電子とミューオンには見られないハドロンシャワー独特のもので ある。また、図 6.29 は縦軸を比、横軸を重心にとった分布であるが、この図からも重心がビーム後方に 向かうに従って比が1付近に集中していくのが示された。表 6.4 は、総エントリー数に対する図 6.27 の



図 6.26: パイオン 160 GeV 時の 左:総エネルギー。赤色は Tail Catcher で得られたエネルギーを合算 した分布、青色はしていない分布である。 右:総エネルギーと重心の分布。

青色のイベント、すなわち Tail Catcher の中に重心があるイベントの数の割合を示したものである。こ の表から、エネルギーが高くなるほどシャワーが遅くに始まることがわかる。

ビーム試験のセットアップでは Tail Catcher は1×1 HBU であるので、より正確に試作機からのエネルギー漏れを評価するには Tail Catcher の検出層の大きさを試作機と同じにして、より多くのエネル ギーを回収しなければならない上に、Tail Catcher で得られるエネルギーの補正も必要となる。これに ついては後の小節で議論する。



図 6.27: パイオン 160 GeV の時の大型試作機からのエネルギー漏れ。赤色:重心が試作機の中にある 場合。青色:重心が Tail Catcher の中にある場合。横軸が比を表す。

6.5.2 エネルギー補正

小節 6.5.1 で見たように、Tail Catcher のエネルギーを含めると低いエネルギーの領域に大きなテール を引く。これは、試作機に比べ Tail Catcher の吸収層の厚みが分厚いことにより検出層でサンプリング できるエネルギーが減少してしまったことや検出層が 1×1 HBU であるため、回収できるエネルギーが



図 6.28: 図 6.27 の1付近に見られるピーク由来のイベントディスプレイ



図 6.29: パイオン 160 GeV の時の重心とエネルギー漏れ

表 6.4: パイオンデータの総イベント数に対する Tail Catcher の中に重心があるイベント数の割合

Beam Energy [GeV]	All Entries	cogZ > 1070 mm	Fraction [%]
160	75166	4883	6.50
80	91997	5273	5.73
60	89458	4543	5.08
40	117327	5080	4.33
20	96693	2409	2.49

試作機よりも少なくなってしまうことが考えられる。本節では、吸収層の厚みを考慮した。エネルギー 補正を試行した結果とそれに付随する諸結果を示す。

ウェイト

ここでは単純に試作機の吸収層の厚みに対する比をウェイトとしてエネルギー補正をかける。図 6.30 を参考に次のように各層で得られるエネルギーにウェイトをのせる。

- 試作機の39層目:他の試作機の層よりも3倍
- Tail Catcher の1層目: $(17.2 \times 3 + 12.1)/17.2$
- Tail Catcher の 2 層目以降: 74.0/17.2



図 6.30: 2回目のテストビームのセットアップ概略図。スケールは正しくない。カッコ内の数字は(厚 さ,放射長)を意味する。

以上のウェイトをかけたパイオン 160 GeV の結果が図 6.31 である。ピーク値が少し高くなり、Tail Catcher 由来を考えられた低いエネルギー帯にあったテールが減ってピークの幅が狭くなった。さらに、高いエネルギーの領域にテールが現れた。これは図 6.32 のように、パイオン 120 GeV 以下の Run データでは見られなかったものであり、Tail Catcher で大量に応答があったからだと考えられる。このテール由来のイベントディスプレイを見ると、図 6.28 のような専ら Tail Catcher でシャワーが広がったイベントであることがわかった。高エネルギーのビームが入射することで、Tail Catcher 中でのシャワーのビーム軸方向の深さが他のエネルギーによるシャワーとは異なる。それにより、検出層でサンプリングするエネルギーの割合が他のエネルギーとは異なったからだと考えられる。



図 6.31: パイオン 160 GeV の時のエネルギー補正かける前後の総エネルギー分布。赤:補正前。青:補 正後。それぞれガウス関数でフィッティングした結果も示している。エネルギーが低いところのミュー オンコンタミネーションも少しウェイトによってピークが高くなっている。



図 6.32: パイオン 120 GeV の時のエネルギー補正かける前後の総エネルギー分布。赤:補正前。青:補 正後。それぞれガウス関数でフィッティングした結果も示している。

線型性

最適なウェイトの置き方には課題が残るが、エネルギー補正前後の線型性を確認する。広範囲に渡る 入射粒子のエネルギーに対応したカロリメータの応答の線型性の確認は、検出器の較正結果の試験とな る重要な意味を持つ。図 6.33 のような結果を得た。フィッティング関数として *E*_{reco} = *wE*_{beam} を用い て、ここで*w* はスケール因子である。スケール因子は0から180 GeV までのフィットにより決定した。 Tail Catcher による補正前はビームのエネルギーが高くなるにつれて線型性を失いつつあった。しかし、 補正したことにより高エネルギーにおいて線型性を回復することができた。



図 6.33: 大型試作機とサブディテクターを含めた 20 - 160 GeV パイオンに対するセットアップの線型 性。横軸はビームのエネルギー、縦軸は再構成されたイベントの総エネルギーのピーク値を表す。赤: 補正前 青:補正後

ウェイトの改善案

上述のウェイトでは単純に吸収層の厚みの比を用いた。次に、エネルギー分布の幅がより細かくなる ような最適なウェイトを探した。具体的には、Tail Catcher の2層目以降にかけた厚みの比74.0/17.2を x/17.2としてスキャンし、エネルギー分布に対しガウス関数フィットした時に得られる RMS が最小にな る比を探す。結果として図 6.34 を得て、これを2次関数でフィットさせて RMS が最小となる 67.2/17.2 という比を得た。この比をウェイトとして適用した結果が図 6.35 である。黒が吸収層の厚みの比をウェ イトとしておいたときのエネルギー分布であり、青がこの手続きで補正されたエネルギー分布である。 最大で ~ 80 % 程度になったビンがあるが依然としてテールイベントは残っている。



図 6.34: 吸収層の厚みの比をパラメータに取った時のエネルギー分布に対するガウス関数フィットで得られた RMS の変化



図 6.35: ウェイトの変化によるエネルギー分布の変化。赤: 補正前 黒:吸収層の比をウェイトとして 補正した分布 青:比のスキャンをしてフィットさせたガウス関数の RMS が最小となるウェイトをかけ て補正した分布

第IV部

結論

第7章 現状と展望

7.1 現状

現在2回のテストビームデータセットに対し、検出器の各種較正された値がその都度アップデートされ、最終的なものが揃いつつある状態である。また、解析用のソフトウェアが様々な方面で開発されデータセットを用いて試行されている。これらの結果を統合し、最終的なAHCAL大型技術試作機の性能評価を行うに先駆け、本論文ではその結果の予備試験として一部を報告した。

7.2 シミュレーションを用いたさらなる試み

現在、2回にわたるテストビームで得られたデータのさらなる理解のために、モンテカルロシミュレー ションとの比較研究が精力的に進められている。図7.1、7.2、7.3、7.4にヒット数とエネルギー分布に関 するデータとシミュレーションを比較した結果を示す。電子ビームに対しヒット数に関して比較的デー タと相関が取れている一方で、エネルギー分布はデータとのズレが幾分見られ、検出器の較正された値 (ペデスタル値やミューオン Run による MIP 較正、サチュレーション補正などが挙げられる)が正しく ない可能性が主な原因として考えられている。パイオンビームに関してはヒット数も合致していないの が現状である。以下では、シミュレーションの結果を用いて調査すべきこととその手法について検討し ていることを示す。

実装された Tail Catcher は AHCAL とは吸収層の厚みが異なる。そこでシミュレーション上で、Tail Catcher の大きさを大型試作機と同じにして(図 7.5)それにより得られる結果をテストビームデータ セットにフィードバックをかける。

まず、整合性を確認できたとした1×1 HBUを用いたシミュレーションの結果と2×2 HBUを用いた シミュレーションの結果を比較する。図7.5 の右は Preshower 検出器から Tail Catcher の最下流の層ま でパイオン160 GeV に対して各層で得られたエネルギーの平均値のプロファイルである。赤いプロット はテストビーム時と同じセットアップでシミュレーションしたもの、青いプロットは Tail Catcher を拡 大して得られたものである。両者の Tail Catcher で得られたエネルギーの平均値の差が横方向のエネル ギー漏れの違いを表す。この比をウェイトとして Tail Catcher の各層に対し考慮したエネルギー分布は 図7.6 のようになる。Tail Catcher 由来のエネルギーが低いためにテールとなっているイベントがピー クの値に少しシフトしているのがわかる。

7.3 エネルギー補正の見通し

Tail Catcher を用いたエネルギー補正の見通しとしては、最適なウェイトを構築したうえで AHCAL 大型技術試作機からの本来のエネルギー漏れを評価したり、実機のデザインである 48 層で得られるエネ ルギー分解能を測定したりしなければならない。そのために、シミュレーションとデータとの整合性を とることは急を要するテーマである。さらに、シャワーの概形を見ることでシャワー発達の起点を調べ どれほどの大きさであるかを見積もってエネルギー漏れを考慮することも必要事項である。



図 7.1: 電子ビームに対するデータとシミュレーションのヒット数に関する比較。イベント数に対して規 格化してある。赤:データ 青:シミュレーション



図 7.2: 電子ビームに対するデータとシミュレーションの総エネルギーに関する比較。イベント数に対し て規格化してある。赤:データ青:シミュレーション



図 7.3: パイオンビームに対するデータとシミュレーションのヒット数に関する比較。イベント数に対し て規格化してある。赤:データ青:シミュレーション



図 7.4: パイオンビームに対するデータとシミュレーションの総エネルギーに関する比較。イベント数に 対して規格化してある。赤:データ 青:シミュレーション



図 7.5: 左: Tail Catcher を2×2 HBUに拡大させて行ったシミュレーションのイベントディスプレイ。 右: パイオン 160 GeV を当てた時の横軸をビーム上流から検出層のナンバリングを行った時の層番号、 縦軸は各層で得られたエネルギーのプロファイル。赤のプロットはテストビーム時と同じセットアップ での結果で、青は左のセットアップで得られた結果であり、両プロットともにシミュレーションによる 結果である。



図 7.6: 図 7.5 の右のシミュレーションによって得られたエネルギープロファイルから得られた比をパイ オン 120 GeV 実験データに考慮したエネルギー分布。赤:補正前 青:補正後。少し Tail Catcher 由来 の低エネルギーのテールイベントがピークイベントのほうにシフトした。

第8章 まとめ

8.1 シンチレータタイルの開発

射出成形による PS シンチレータの開発に取り組んだ。先行研究のキャスト成形で実現した光量は達成できなかったが、PVT シンチレータ比で 71 %を達成した。これは AHCAL の検出層のプラスチックシンチレータとしては十分な光量である。また、光量改善の案としてプラスチックシンチレータの加熱時間に関する新しい射出成形の工程を試みたが残念ながら光量の改善は見られなかった。一方製作したシンチレータの個体によるばらつきを 2 - 3 %と低い値に抑えることに成功した。

また、実験の結果との比較やタイルデザインの最適化に使用するために Geant4 を用いたシミュレー ションツールを構築した。

8.2 AHCAL 大型技術試作機の建設における検出層試験

新たに開発した宇宙線試験装置と DESY 電子ビーム施設を用いて、AHCAL 大型技術試作機の検出層の応答試験を行った。

宇宙線試験では2×2 HBUの6層構造で試験を行い、検出層の応答を調べた。チャンネルの検出効率 として平均で93%であることがわかった。この宇宙線試験では宇宙線の飛跡を用いてHBUのアライメ ントを行うことに成功した。

DESY の電子ビームによるテストビーム試験では、2×2 HBU 一層に対して較正を行った。宇宙線試験との比較を行い、試験時の温度の違いによるわずかな相違は見られたが、二つの試験結果はよい相関を示していることがわかった。

8.3 AHCAL 大型技術試作機のビーム試験

CERN にて 2 回行われた AHCAL 大型技術試作機のビーム試験のデータを用いた解析の一部を報告 した。

試作機に加え、ビームライン上に設置されたサブディテクター、Preshower 検出器と Tail Catcher を 用いた解析結果を報告した。

ビーム粒子が試作機到達前に発生したシャワー事象を取り除くため、Preshower 検出器を用いてイベントの選別を行った。最適な選別手法としては Preshower 検出器においてビームが多く当たった 9 チャンネルにおいてヒット数が 0、1、2 の場合を選択することであることがわかった。

Tail Catcher を用いて試作機からのエネルギー漏れの評価と、それを用いたエネルギー補正を試みた。 適切なウェイトで補正をかけることにより、エネルギー分布のピーク幅、エネルギー線型性が改善する ことを示した。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方にお世話になりました。指導教官の森俊則教授には、私の研究活動 に対し恵まれた環境を与えてくださったり出張への寛大なご対応により多くの経験を積ませてくださっ たりしていただきました。大谷航准教授は、全く実験の教養のなかった私に実験学の基礎や手法を1か ら丁寧に手ほどきしていただいたり研究に対し数多くの助言をいただいたり、学会や海外出張の際の生 活面に対してもサポートをしていただきました。感謝の気持ちでいっぱいです。加えて研究室で ILC 研 究に携わる唯一の先輩である劉霊輝氏にはどんな問いかけにも真摯に対応していただき研究活動の際に は多くのアドバイスをいただきました。本当にありがとうございました。

Geant4の研究に対しては、当時山下研究室所属の現ニュートリノ科学研究センター家城斉氏から数多 くの助言をいただき、PSIでこの研究に煮詰まっていた時には家城佳氏に大変貴重なコメントをいただ くことができ、なんとかシミュレーションツールとして完成に至ることができました。この場を借りて 感謝申しあげます。

ビーム試験のデータ解析に関しては DESY の須藤裕司氏、Katja Krüger、Felix Sefkow から様々なコメ ントをいただき研究の後押しをしていただきました。MC シミュレーションに関しては Eldwan Brianne、 Huong Lan Tran の協力なしでは何もできないテーマでした。この研究ができたことはひとえにお二方 のおかげです。感謝いたします。

とても愉快な同期恩田理奈さん、小林暁くん、辻直希くんに加え、岩本敏幸助教、内山雄祐特任助教、 小川真治氏、中尾光孝氏、宇佐見正志氏、大矢淳史くん、豊田和輝くん、野内康介くんという素晴らし い研究室メンバーに恵まれとても充実した研究生活を送ることができました。研究室メンバーの一員で いれたことにとても誇りを持っています。また、2回行ったテストビームデータ解析ワークショップに参 加した各方面の大学・研究機関の皆さんと協力・相談を交え研究生活を送った日々は忘れません。

最後に、私のしたいことを陰ながら不自由なくさせてくれた両親に感謝の言葉を送ります。ありがと うございました。

参考文献

- [1] THE INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER TECHNICAL DESIGN REPORT VOLUME1 : EXECUTIVE SUMMARY.
- [2] THE INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER TECHNICAL DESIGN REPORT VOLUME2 : PYSICS.
- [3] THE INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER TECHNICAL DESIGN REPORT VOLUME3.II : ACCELERATOR BASELINE DESIGN.
- [4] THE INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER TECHNICAL DESIGN REPORT VOLUME4 : DETECTORS.
- [5] D. M. Asner et al., "ILC Higgs White Paper", arXiv:1310.0763[hep-ph].
- [6] W. Ootani., International Linear Collider (ILC) Project Status and Plan, PSI Colloquium, Dec. 7th, 2017, PSI
- [7] ATLAS EXPERIMENT PUBLIC RESULTS. https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/EventDisplaysFromHiggsSearches
- [8] ILC event examples with ILD simulation.
 http://www-jlc.kek.jp/miyamoto/evdisp/html/index.html
- [9] Oskar Hartbrich, Commissioning and LED System Tests of the Engineering Prototype of the Analog Hadronic Calorimeter of the CALICE Collaboration, Master thesis, 2012.
- [10] Mark Terwort on behalf of the CALICE collaboration, Concept and status of the CALICE analog hadron calorimeter engineering prototype, Physics Procedia 37 (2012) 198-204
- [11] Philip N. Burrows, Fast beam-collision feedbacks for luminosity optimisation at next generation lepton colliders, Nuclear and Particle Physics Proceedings 273-275 (2016) 188-192
- [12] 綿貫峻. 国際リニアコライダーにおけるヒッグスの質量・断面積・および CP 混合の解析. 修士論文, 2014
- [13] A. Faus-Golfe, J. Resta-López, BEAM SIZE AND EMITTANCE RECONSTRUCTION IN THE RTML OF FUTURE LINEAR COLLIDERS, June 2014
- [14] Benjamin Hermberg for the CALICE Collaboration. Commissioning of the testbeam prototype of the calice tile hadron calorimeter,2012
- [15] SAINT-GOBAIN.

https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/

[16] ELJEN TECHNOLOGY.
 http://www.eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212

- [17] Yong Liu, Volker Büscher, Julien Caudron, Phi Chau, Sascha Krause, Lucia Masetti, Ulrich Schäfer, Rouven Spreckels, Stefan Tapprogge, Rainer Wanke. A Design of Scintillator Tiles Read Out by Surface-Mounted SiPMs for a Future Hadron Calorimeter, arXiv: 1512.05900v1 [physics.ins-det] 18 Dec 2015
- [18] J.Zhu et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 835 (2016) 136-141
- [19] 3M 社. http://www.mmm.co.jp/display/products/index.html
- [20] 浜松ホトニクス社. MPPC データシート
- [21] 西村美紀. MEG 実験アップグレードに向けた分解能 30 ピコ秒の陽電子タイミングカウンターの研 究開発. 修士論文, 2014
- [22] Stefan Ritt, Roberto Dinapoli, and Ueli Hartmann. Application of the drs chip for fast waveform digitizing. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 623, No. 1, pp. 486–488, 2010. 1st International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics.
- [23] 劉霊輝. ILC 測定器ハドロンカロリメータ検出層の性能向上に関する研究および宇宙線試験装置の 開発. 修士論文, 2018
- [24] KEK. Geant4の基本構造と必須クラス, 講習会資料 http://www-geant4.kek.jp/lecture/2017.11/materials/L03_Geant4MandatoryClasses.pdf
- [25] Felix Sefkow, The new AHCAL prototype, CLIC workshop, CERN, March 8, 2017
- [26] 家城斉. 国際リニアコライダーのためのシンチレータ電磁カロリメータの新しいシンチレーション 光読み出しデザインの開発. 修士論文, 2015
- [27] Birks, J.B. (1951). "Scintillations from Organic Crystals: Specific Fluorescence and Relative Response to Different Radiations". Proc. Phys. Soc. A64: 874.
- [28] Vesna Cuplov, Iráne Buvat, Frédéric Pain, and Sébastien Jan. Extension of the GATE Monte-Carlo simulation package to model bioluminescene and fluorescence imaging, Journal of Biomedical Optics 19(2), 026004(February 2014)
- [29] シミュレーション研究にあたって PSI の Angela Papa の協力を得た。
- [30] 辻直希. 国際リニアコライダー用ハドロンカロリメータの精細度最適化及び大型技術プロトタイプ を用いた検出層の性能評価. 修士論文, 2019
- [31] DESY PARTICLE PHYSICS. http://particle-physics.desy.de/test_beams_at_desy/
- [32] L.Peralta, "Temperature dependence of plastic scintillators", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 883, 1 March 2018, Pages 20-23, https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.041
- [33] CERN Engineering Department. http://sba.web.cern.ch/sba/BeamsAndAreas/h2/H2manual.html
- [34] J.Bernhard, N.Charitonidis, M.Brugger, A.Fabich, L.Gatignon, E.Gschwendtner, B.Rae, H.Wilkens . "Overview of CERN Test Beam Facilities relevant for TPC tests", 2nd Workshop on Neutrino Near Detectors based on gas TPCs, 20 - 21 March 2017, CERN.

- [35] Edda Gschwendtner. "Overview on CERN Test Beam Facilities and Plans for Tests for Non-Collider Experiments", 13.May.2009,CERN
- [36] Katja Krüger. "Report from the Technical Board", CALICE meeting at Shanghai, 19.September.2018

第Ⅴ部 付録

付 録 A 90 Sr と MIP のエネルギーデポジットの相違

シンチレータ材開発に使用した線源 ⁹⁰Sr は、中性子過剰により一回 β 崩壊を起こし ⁹⁰ になったのち に再び β 崩壊を起こしさらに安定な ⁹⁰Zr になる。この過程で ⁹⁰Sr はエンドポイント 2.2 MeV の特徴的 なエネルギースペクトルをもつ β 線を放射する。このエネルギースペクトルに従う電子をプラスチック シンチレータタイルに照射した時に得られるエネルギーデポジットを Geant4 でシミュレーションした ものを図 A.1 に示す。左が ⁹⁰Sr によるエネルギーデポジット、右が 3 GeV の電子を照射して得られたエ ネルギーデポジットの結果である。特徴として ⁹⁰Sr の分布はテールを長く引き、幅が広い。これは MIP 粒子に比べエネルギーが低いため、物質中で多くの相互作用を起こした結果である。両者のピーク値を 比較すると、MIP 粒子は ⁹⁰Sr の 82.8 % (= 0.463/0.559) であり、⁹⁰Sr の放射する β 線は物質中でエネ ルギーを大きく損失することがわかる。



図 A.1: ⁹⁰Sr が放射する β 線と MIP 粒子のエネルギーデポジット(横軸は MeV)。フィット線はガウス 関数を畳み込んだランダウ分布である。左: ⁹⁰Sr の β 線 右: MIP 粒子。