東京大学大学院博士前期課程

理学系研究科修士論文

次世代電子陽電子コライダー用シンチレータ電磁カロリー メータにおける SiPM を用いた読み出し手法の研究 Study on SiPM readout method for scintillator-based electromagnetic calorimeter for future electron-positron colliders

> 35-196089 増田 隆之介 素粒子物理学実験

> > 指導教員 大谷 航

目 次

| 第1章 | 序論 | 1 |
|-----|--|----|
| 1.1 | International Linear Collider : ILC | 1 |
| 1.2 | International Large Detector : ILD | 2 |
| 1.3 | Particle Flow Algorithm : PFA | 5 |
| 第2章 | 電磁カロリーメータ | 7 |
| 2.1 | ScECAL | 7 |
| | 2.1.1 ILD における ScECAL の構造と粒子検出原理 | 7 |
| 2.2 | 検出層に用いられるプラスチックシンチレータの種類と成形方法....... | 9 |
| 2.3 | シンチレータストリップを用いた読み出し方法....................... | 10 |
| | 2.3.1 シンチレータストリップ | 10 |
| | 2.3.2 Silicon Photomultiplier : SiPM | 12 |
| | 2.3.3 Strip Splitting Algorithm : SSA | 14 |
| 2.4 | ScECAL 大型プロトタイプの開発とテストビーム実験 | 18 |
| 第3章 | ScECAL におけるシンチレーション光の新しい読み出し方法の開発 2 | 20 |
| 3.1 | シンチレータストリップの研究開発および本研究の目的............ | 20 |
| 3.2 | ストリップの詳細なデザインと各読み出し手法の説明 | 20 |
| 3.3 | シンチレータストリップのプロトタイプを用いた光量の位置依存性の測定..... | 23 |
| | 3.3.1 光量測定方法の概要 | 23 |
| | 3.3.2 測定セットアップ 2 | 23 |
| | 3.3.3 測定および解析方法 | 28 |
| 3.4 | 結果と考察 : | 31 |
| | 3.4.1 光量の位置依存性の測定 | 31 |
| | 3.4.2 タイプ3ストリップにおけるヒット位置再構成 (| 33 |
| | 3.4.3 タイプ3ストリップにおけるノイズ削減の研究 | 36 |
| 第4章 | SiPM とシンチレータストリップ間のミスアラインメントの研究 3 | 38 |
| 4.1 | SiPM-ストリップ間のミスアラインメント | 38 |
| | 4.1.1 実験セットアップにおける SiPM-ストリップ間のミスアラインメント : | 38 |
| | 4.1.2 EBU における SiPM-ストリップ間のミスアラインメント | 39 |
| 4.2 | シミュレーションを用いたミスアラインメントの分析 | 39 |
| | 4.2.1 シミュレーションにおけるセットアップ | 40 |
| | 4.2.2 光量のシミュレーション | 43 |
| | 4.2.3 比較したストリップ dimple 内における SiPM の配置パターン 4 | 44 |
| | 4.2.4 結果と考察 | 45 |
| 4.3 | ミスアラインメントの影響の実測 | 48 |
| | 4.3.1 実測の測定セットアップ | 48 |

| | 4.3.2 測定および解析方法 | 50 |
|-----|--------------------------------------|-----------|
| | 4.3.3 結果と考察 | 50 |
| 第5章 | ILD モデルのシミュレーション | 52 |
| 5.1 | iLCSoft | 52 |
| | 5.1.1 DD4hep | 53 |
| | 5.1.2 Marlin | 53 |
| | 5.1.3 PandoraPFA | 54 |
| 5.2 | ECAL モジュール間のギャップ補正 | 54 |
| | 5.2.1 ヒットエネルギー分布の確認および落ち込み部分のフィッティング | 54 |
| | 5.2.2 補正方法 | 55 |
| | 5.2.3 真のエネルギー値と PFO エネルギー値の比較 | 56 |
| 5.3 | ジェットイベントを用いたジェットエネルギー分解能の評価 | 58 |
| 第6章 | まとめと今後の展望 | 60 |

概要

本研究では、次世代の電子-陽電子衝突型加速器 International Linear Collider (ILC) のための 測定器案 International Large Detector (ILD) 用に開発が進められているシンチレータ電磁カロ リーメータ Scintillator-based Electromagnetic CALorimeter (ScECAL)の性能の向上を目指し、 SiPM を用いた読み出しに関する研究を行った。

ILC は現在建設が検討されている全長約 20 km の線形加速器で、電子と陽電子の衝突によって生 じるジェットの解析により Higgs 粒子の精密測定やダークマターの候補となる新粒子の探索などが可 能とされ、標準理論を超える物理を切り拓く足がかりとして期待されている。ILC で重要となるイベ ントにはジェットが含まれ、ILC の目標感度を達成するためにはおおよそ $\sigma_E/E = 30\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ のエネルギー分解能を達成する必要がある。そこで ILC は Particle Flow Algorithm (PFA) と呼 ばれる粒子識別のアルゴリズムを用いる。

本研究では、ILD の中でもストリップ状に加工したプラスチックのシンチレータ材をベースと した ScECAL について、従来の 45 mm ストリップの倍の長さの 90 mm ストリップを単位セルと し、1つのセルに対して 2 つの SiPM を用いて信号を読み出すダブル SiPM リードアウト方式の開 発を行った。この手法により、従来の読み出し方式よりも大きな光量を得た他、2 つの読み出し口 からの信号の時間差、光量差を用いてストリップ上のヒット位置を約 20 mm の分解能で再構成で きることや、2 つの読み出し口からの信号へコインシデンスをかけることによりランダムノイズイ ベントを抑制できることを実証した。また、光量の位置依存性に対する SiPM とストリップの間 のミスアラインメントの影響をシミュレーションおよび実測によって確かめ、SiPM の位置がスト リップ中心からずれることでヒット位置による光量の非一様性が増大することがわかった。また、 本研究では、ダブル SiPM リードアウト方式の効果や、ミスアラインメントの影響などを取り入 れた ILD モデルのシミュレーションを行い、ジェットエネルギー分解能をより現実的に評価する ことを大きな目標の一つとしている。本論文では、そのための準備として、ILD モデルのシミュ レーションにおける ECAL モジュール間のギャップによる影響の補正を施した上で、ジェットイ ベントによって得られるジェットエネルギー分解能が妥当かどうかを確かめた。

第1章 序論

1.1 International Linear Collider : ILC

ILC(図 1.1)は、現在岩手県北上山地に建設が検討されている全長約 20 km に渡る線形加速器 を用いた次世代エネルギーフロンティア実験計画のことである。線形加速部において電子および 陽電子を光速に近い速度まで加速し、中央の Interaction Point(IP)にて衝突させることで発生 する様々な粒子の情報を解析することによって、Higgs の物理など、新物理の足がかりを得ること が期待されている。電子や陽電子は内部構造を持たないため、陽子を用いる従来のハドロンコラ イダーに比べて、ILC ではバックグラウンドの少ない測定が可能となる。衝突時の重心系のエネ ルギーは、初期段階では $\sqrt{s} = 250$ GeV と計画されており、これは理論上 Higgs 粒子の生成断面 積が最大となるエネルギーに対応する。また、線形加速部分を延長することで将来的にさらに高 エネルギーの領域での実験が可能となる。



図 1.1: ILC の予想概略図(©Rey.Hori/KEK

1.2 International Large Detector : ILD

ILC の IP に置かれる大型検出器案には現在、ヨーロッパ・アジア圏の国々を主体として共同 で開発が進められている ILD (図 1.2)と、アメリカを中心に開発が進められている SiD (Silicon Detector)の2つがあり、ILC はこれら2つの大型検出器を交互に IP に置けるように push-pull 方式を採用している。本論文で取り扱われるテーマである Scintillator ECAL (ScECAL)は ILD 用の電磁カロリーメータデザインであるため、ここでは ILD に関連する検出器について説明する。 図 1.3 は ILD の一部分の断面図である。



図 1.2: ILD 完成イメージ [1]

ILD は内側から順にバーテックス検出器、中央飛跡検出器、電磁カロリーメータ、ハドロンカ ロリーメータ、ミューオン検出器の順でカロリーメータや検出器が並んでいる。カロリーメータと ミューオン検出機の間にはソレノイドコイルが配置されており、内部に 3.5 T の磁場をかける。

バーテックス検出器

バーテックス検出器はピクセル状のシリコンセンサーによって粒子の飛跡を高精度で捉える検 出器であり、崩壊点から飛散するクラスターからbクォークなどを識別し、その崩壊点の位置を再 構成するために使われる。ILD の最も内側に位置するため、高密度のバックグラウンドにより上 昇するピクセル占有率の改善、放射線耐性の向上といった点が開発における課題点となっている。



図 1.3: ILD の断面図 [1]

中央飛跡検出器

ILD において用いられる中央飛跡検出器は、主要部である Time Projection Chamber (TPC) と補完部であるシリコン検出器の2つから構成される。図 1.4 に中央飛跡検出器とその周辺部の概 観を載せる。

シリコン検出器には、バーテックス検出器と TPC の間の Silicon Inner Tracker (SIT)、ECAL と TPC の間の Silicon External Tracker (SET)の2つのバレル補完部と、エンドキャップの外側 に置かれる Endcap Tracking Detector (ETD)、及びバーテックス検出器とビームの通る円錐領 域の間を補完する Forward Tracking Detector (FTD)の計4つがあり、隣接する ECAL や TPC などの検出器のヒット情報を補完し、運動量分解能を向上させる役割を持つ。

TPC は内部にガスを封入した飛跡検出器であり、荷電粒子が通過することによって生じる電離 電子が電場によって ETD 方向にドリフトされる際の時間などの情報をもとに、その通過荷電粒子 の飛跡を3次元的に再構成することが可能である。ドリフトに対するソレノイドコイルによる磁 場の影響を抑えられ、かつ増幅率を確保するのに過剰に高い電場を必要としないようなガス組成 の模索や、増幅部でディスク状に発生する陽イオンに由来する電場の不均一性を抑えるため、現 在様々なオプションが考案されている。

カロリーメータ

カロリーメータは入射粒子のエネルギーを測定する役割を持った検出器で、ILD では電磁カロ リーメータ(ECAL)とハドロンカロリーメータ(HCAL)、およびビーム軸方向をカバーする前 方向カロリーメータ(FCAL)の3種類が配置される。これらはいずれもサンプリング型のカロ



図 1.4: 中央飛跡検出器内部・周辺部の概略図 [1]

リーメータであり、物質量の大きな物質でできた吸収層と、エネルギーを測定する検出層が交互 に重ねられた構造になっている。図 1.5 はサンプリング型カロリーメータのエネルギー測定の概要 図である。サンプリング型カロリーメータでは、高エネルギーの入射粒子が吸収層の物質と相互 作用し、多数の粒子からなるシャワーを形成した後、そのエネルギーを検出層で測定する。この 過程を重ねられた各層で繰り返し、測定されたエネルギーの合計から元の通過粒子のエネルギー を算出する。ILD ではジェットエネルギー分解能を改善するために後述の PFA というアルゴリズ ムを採用しており、そのためには高精細なカロリーメータを開発する必要がある。



図 1.5: サンプリング型カロリーメータにおけるエネルギー測定の概要図 [2]

ECAL は光子のエネルギーの測定に用いられる。吸収層にはタングステンを用いる一方で、検 出層のデザインにはシリコンを用いる SiECAL と、シンチレータ材を用いる ScECAL の2つが提 案されている。ScECAL については次章で詳細に述べる。

HCAL は中性ハドロンのエネルギー測定に用いられるカロリーメータである。吸収層には鉄が用 いられ、検出層として1cm角のセルを用いてバイナリの信号を読み出すデジタル式(SDHCAL) と、3cm角のシンチレータのセルの中央からSiPMによってシンチレーション光を読み出すアナ ログ式(AHCAL)の2種類が研究されている。

1.3 Particle Flow Algorithm : PFA

ILC で重要となるイベントの終状態には多数のジェットが含まれるため、これまでにないジェットエネルギー分解能 $\sigma_E/E = 30\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ を目指しているが、検出器の性能を向上させるだけでこの数値を実現することは困難である。

そこで ILD では Particle Flow Algorithm (PFA) というアルゴリズムを導入している。PFA は ジェット中の粒子の種類ごとに最適な検出器を用いてエネルギーを測定することで検出器全体と してのジェットエネルギー分解能を向上させる手法である。表 1.1 にジェットエネルギーに占める 各粒子のエネルギーの典型的な割合を示す。荷電粒子のほとんどは荷電ハドロンであるため、全 ジェットエネルギーの約 70%はハドロンによるものである。従来型の検出器では、荷電ハドロン と中性ハドロンを分けずにカロリーメータでエネルギーを測定していたが、PFA を用いる場合は 飛跡検出器が荷電ハドロンのエネルギー測定を担う。このように PFA では、ジェットエネルギー の大半を占めるハドロンの検出を細分化することで、検出器全体のジェットエネルギー分解能を向 上させる。図 1.6 は従来型および PFA を用いる場合のエネルギー測定の模式図である。また、図 1.7 はシミュレーションによるジェットイベントのイベントディスプレイである。

表 1.1: ジェットエネルギーに占める各粒子のエネルギーの典型的な割合

| 粒子の種類 | ジェットエネルギーに占めるエネルギーの割合 (%) | 対応する検出器 |
|--------|---------------------------|---------|
| 荷電粒子 | 62 | 飛跡検出器 |
| 光子 | 27 | ECAL |
| 中性ハドロン | 10 | HCAL |
| ニュートリノ | 1 | - |



図 1.6: 従来型(左)と PFA 対応型(右)のエネルギー測定の概要図 [3]



図 1.7: シミュレーションを用いた PFA のイベントディスプレイ [11]

第2章 電磁カロリーメータ

前章でも述べたとおり、ILD 向けに提案されている ECAL には検出層にシリコンを用いる SiECAL と、シンチレータ材を用いる ScECAL の 2 つのオプションが提案されている。この章では本論文 のテーマである ScECAL について詳細な解説を行う。

2.1 ScECAL

ECALの技術オプションの一つである Scintillator-based ECAL(ScECAL)は、検出層部分にシ ンチレータ材を用いる ECAL で、荷電粒子によってシンチレータが励起されることで生じるシンチ レーション光を専用の読み出し基板に設置された半導体光センサーである Silicon Photomultiplier (SiPM)を用いて信号として読み出すことでエネルギーを測定する。

2.1.1 ILD における ScECAL の構造と粒子検出原理

前述の通り PFA による測定の最適化に基づき、ILD に搭載される ECAL は光子や荷電粒子の エネルギーを測定するためのカロリーメータとしてデザインされる。ECAL に提案されているデ ザインオプションはいずれも、これらの粒子からなるクラスターを精度よく分離できるよう高精 細なものとなっている。図 2.1 は ECAL 全体の概略図である。ECAL は IP をビーム軸方向周りに 囲うバレル (Barrel) 部分と、その両終端を囲うためにビーム軸に対して垂直な向きに置かれるエ ンドキャップ (Endcap) 部分およびエンドキャップ部分を補完するエンドキャップリング部分から 構成されている。





図 2.1: ECAL の模式図 [10]

図 2.2: ECAL バレルモジュール [10]

バレル部分の内径は約4mであり、30層の吸収層と検出層の組からなる単位モジュール(図2.2) で構成されている。具体的にはこの単位モジュールを横に5つ並べたスタブが8つ、八角柱を形 成するように置かれてバレル部分を構成している。すなわちバレル全体で計40個の単位モジュー ルが使われている。ECALで測定する電磁シャワーはハドロンシャワーと比べて小規模であるた め、ECALの単位モジュールは外側のHCALに比べて薄めにデザインされている。ScECALの単 位モジュール内の1層分は、図2.3のように放熱用の銅板、シンチレータストリップで構成される 検出層とその信号を読み出す基板、吸収層(タングステン)から構成されており、多数の読み出し エレクトロニクスを検出器層の中に統合している。ScECALでは、飛来する光子や電子、陽電子 が吸収層で形成する電磁シャワーのエネルギーを、検出層でシンチレーション光へと変換し、検 出層に隣接して置かれる専用の読み出し基板に設置されている SiPM より信号として読み出す。



図 2.3: ECAL モジュール内の構造 [17]

ECAL Base Unit : EBU

ScECAL での読み出しには、ECAL Base Unit (EBU)と呼ばれる専用の読み出し基板を用い る。図 2.4 および図 2.5 は、後述の ScECAL 大型プロトタイプのために中国の Circular Electron Positron Collider(CEPC)の研究グループによって開発された EBU である。EBU のサイズは 246.5 × 246.5 mm² で、片面には MPPC が 210 チャンネル分並んでおり、45 × 5 mm² のストリッ プ状に加工したシンチレータ(シンチレータストリップ, 2.3.1 参照)を 210 本取り付けることが できるようになっている。もう片方の面は MPPC の制御回路となっており、OMEGA グループ製 の SPIROC2E チップが 6 つ取り付けられている。このチップは 1 つにつき MPPC を 36 チャンネ ルまで制御でき、チャンネル毎に印加電圧やアンプゲインなどの値を調整できるため、多数ある MPPC1 つ 1 つの特性に合わせて EBU を稼働させることが可能である。





図 2.4: EBU のシンチレータストリップ面 [7]

図 2.5: EBU の電子回路面 [7]

2.2 検出層に用いられるプラスチックシンチレータの種類と成形方法

ScECALの検出層に用いられるプラスチックシンチレータには、プラスチックに有機シンチレーション物質を溶かして成形したものが使用される。プラスチックシンチレータの成形方法にはいくつかの種類があり、それらによって成形されるシンチレータは発生光量などの特性が異なる。ここでは主要な2つのプラスチックシンチレータの成形方法と特徴について解説する。

キャスト成形

キャスト成形は鋳型成形とも呼ばれる手法で、液状の単量体と初期縮合物を型に流し込み、そ こへ重合剤を加えることで重合反応を起こし成形する手法である。ベースとなるプラスチックに は Polyvinyl toluene (PVT) などが用いられる。キャスト成形の主な利点は品質が安定すること であり、成形物が透明度に優れるため発生光量が大きい。また、整形に際して特殊な設備を必要 とせず、少量の生産なら低コストで可能である。しかし、大量生産を行おうとすると重合反応や 機械による鋳造のためにかえってコストが嵩んでしまうという問題点がある。ScECAL では 1,000 万の読み出しチャンネルに対応する個数のシンチレータが必要となるため、この生産方法による 大量生産は現実的ではない。

射出成形

射出成形は約 200 ℃に加熱し溶かしたプラスチックを金型に押し込んで冷却し、硬化させ成形 する手法であり、使用される主なプラスチック材料は Polystyrene(PS)である。この手法による 利点は、短時間かつ低コストで生産可能であるため大量生産に適しているという点である。一方 で、キャスト成形によって生成されるものに比べ品質に劣り、発生光量が少ないという欠点があ る。しかし、射出成形のシンチレータを用いた測定により ScECAL に使用するのに問題ない発生 光量であることが確かめられているため、最終的に ScECAL には射出成形によって生産されるプ ラスチックシンチレータが採用される予定である。

測定に用いたシンチレータマテリアル

本研究では、より大きな光量を得ることを優先し、上述の2つの手法のうちキャスト成形によっ て作成されるプラスチックシンチレータを測定に使用した。有機プラスチックシンチレータは紫 外領域の光を発するが、使用する SiPM の光子検出効率(PDE)を考慮し、波長 420–430 nm に 発光量のピークを持つプラスチックシンチレータである ELJEN 社製の EJ-212 を測定に用いた。 表 2.1 に EJ-212 の主な特性を示す。図 2.6 および図 2.7 は EJ-212 の発光波長スペクトルおよび測 定に使用する浜松ホトニクス社製の MPPC(S12571-015P)の光子検出効率の波長依存性である。

表 2.1: EJ-212 シンチレータの主な特性 [4]

| | EJ-212 |
|------------------------------------|--------|
| 「シンチレーション効率 (photons/1 MeV e^-) | 10,000 |
| 屈折率 | 1.58 |
| 光量減衰長 (cm) | 250 |



図 2.6: EJ-212 の発光波長スペクトル [4]

2.3 シンチレータストリップを用いた読み出し方法

2.3.1 シンチレータストリップ

前述のジェットエネルギー分解能の値を達成するためには、ScECALの検出層に用いるシンチ レータセルはなるべく高精細であることが望ましく、5×5 mm²のセルの実装を目標としている。



図 2.7: MPPC の光子検出効率の波長依存性 [5]

しかし、各セル毎にチャンネルを設ける必要があり、読み出しエレクトロニクスが煩雑になるこ とや、加工にかかるコストといった側面からそのようなセルでの実装は現実的ではない。よって、 ScECAL では45×5×2 mm³のストリップ状のシンチレータ(図2.8)を単位セルとし、連続す る2つの検出層にそれぞれ直交するようにストリップをアラインすることで仮想的な5 mm 角の セルを再現する。このデザインでは全体の読み出しチャンネル数を、ほぼ性能を落とさずに約10 分の1にまで抑えることができ、コストを大幅に削減することができる。一方で、ゴーストヒッ トといった問題点もある。ゴーストヒットはストリップを用いた読み出しによって生じる偽の信 号を指す。詳細は2.3.3 にて述べる。



図 2.8: ScECAL のシンチレータストリップと SiPM

シンチレータストリップから得られる光量は、ストリップ上のヒット位置にかかわらず一様であ ることが望ましい。そのため、シンチレータストリップと SiPM の光学的結合方法について現在 様々なデザインが提案され、研究されている。これまで研究されてきた主なデザインには、シンチ レータストリップの横側にオプティカルグリスを用いて SiPM を直接取り付けて読み出しを行う横 側読み出し手法 [19] などがある。本論文における研究では近年新しく考案された、ストリップの 中央に窪み(dimple)を設け、その中に SiPM を配置してシンチレーション光を読み出す dimple リードアウトデザインのストリップを用いた。dimple リードアウトデザインについては次章にて 詳細に解説する。なお、シンチレーション光を可能な限り収集し検出光量の一様性を保つため、シ ンチレータストリップは適切な形にカットされた反射材で覆われ、固定用のテープで巻かれた状 態で使用される。

2.3.2 Silicon Photomultiplier : SiPM

ここでは SiPM の概要や動作原理について述べる。SiPM は光子を検出するのに用いられる半導体素子であり、多数のピクセル化された Avalanche PhotoDiode(APD)によって光子の個数を直接カウントすることができる。光子検出に用いられてきた従来の PMT よりも小型ではあるが優れたフォトンカウンティング能力を持ち、読み出しエレクトロニクスの細分化が重要な本研究において必要不可欠な技術である。本論文における研究では、SiPM の中でも浜松ホトニクス社製品である Multi-Pixcel Photon Counter (MPPC)(図 2.9)を用いた。



図 2.9: MPPC 12571 シリーズ [5]

動作原理

図 2.10 に SiPM の構造の模式図を載せる。SiPM は APD に降伏電圧以上の電圧をかけ、ガイ ガーモードで使用する。SiPM に光子が入射すると、励起された電子が禁制帯を超え、電子とホー ルのペアが生成される。これらは印加された電圧によって電極ヘドリフトされ、加速された電子 は増倍層中の結晶格子の共有結合電子を励起し、二次的な電子とホールのペアを作り出す。二次 電子はさらに電子を生み出し、この過程を繰り返すことで飛躍的にキャリアが増える現象をアバ ランシェ増幅という。



図 2.10: SiPM の構造 [6]

アバランシェ増幅は電子のみでなく、高電場領域に溜まるホールによっても引き起こされるた め、APDに光子が入射すると際限なく増幅が起こってしまう。このような発散を抑えるために各 APDにはクエンチング抵抗が接続されており、入射光子数にかかわらず1つのAPDからの信号 (電流)は一定となる。これにより出力のあったピクセル数をそのまま光子数としてカウントする ことが可能となる。図 2.11は入射光子数に応じて出力波形が等間隔に変わっている様子である。



図 2.11: 入射光子数に応じた MPPC の出力波形 [5]

ダークノイズ

SiPM では時折、熱励起によって生じたキャリアが禁制帯を超えてアバランシェ増幅を起こし、 1 光子が入射した際と全く同じ出力をすることがある。これは光子の入射とは無関係に発生する 現象であり、観測対象であるシンチレーション光からの信号と見分けがつかない。このような信 号をダークノイズと呼ぶ。

クロストーク

クロストークは、アバランシェ増幅中のキャリアの再結合によって発生した赤外光子が隣接す る APD ピクセルに侵入し、そこでキャリアを形成してアバランシェ増幅を起こすことで、1 つの 光子から 2 つかそれ以上の光子に対応する信号を得てしまう現象のことをいう。ダークノイズと 同様、2 つの入射光子があった場合とクロストークが起こった場合との見分けはつかない。

アフターパルス

SiPM では、格子欠陥などの要因によって一時的にトラップされた電子が遅れてアバランシェ増 幅を起こすことにより、入射光子の信号より後に出力が起こることがあり、これをアフターパル スと呼ぶ。信号を読み出してからアフターパルスが起こるまでの時間間隔が短過ぎると、入射光 子からの信号と見分けがつかなくなるため、光子数を余分にカウントしてしまうことにつながる。

2.3.3 Strip Splitting Algorithm : SSA

ScECAL では 45×5 mm² のシンチレータストリップを単位セルとして用いるが、ILD の要求 するエネルギー分解能を達成するためには 5 mm 角のセルを用いた場合と同等のヒット位置分解 能を得る必要がある。従って Strip Splitting Algorithm (SSA) という手法によってカロリーメー タへのヒットの情報を補強している。

ScECAL では、図 2.12 のようにして搭載される EBU の偶数番目の層と奇数番目の層をその上 に並べられたシンチレータストリップが直交するように重ねて配置することで、擬似的な 5 mm 角のシンチレータセルを再現し、カロリーメータの細分度を確保する。SSA は、このようにして 作られるセルに対して適切なヒットエネルギーを分配し、エネルギー分解能を向上させるアルゴ リズムのことである。



図 2.12: SSA における ScECAL セルのイメージ図

SSA における仮想セルへのエネルギー分配方法

図 2.13 のように、連続した 3 つの EBU 上のシンチレータストリップにヒットがあったとする。中 央層のストリップが得るエネルギー値は *E_{strip}* である。中央層のストリップを、隣接層に配置さ れているストリップ *U_j*および *D_j* に沿って図 2.13 右のように 9 つの仮想セルに分割し、それらを *k* の添字でラベルする。



図 2.13: SSA における分割したセルへのエネルギー分配の模式図 [9]

このとき、中央層のストリップの k 番目の仮想セルに割り当てられるヒットエネルギーへの重み は、隣接する上下の層のストリップ(U_{1,2,…9}および D_{1,2,…9})で測定される全エネルギーに対する、 そのセルの直上および直下にある隣接層上のストリップ(U_kおよび D_k)のエネルギーの割合に よって与えられる。すなわち、k 番目のセルへ割り当てられるエネルギー値 E_k は、

$$E_k = E_{strip} \times \frac{(U_k \mathcal{O} \mathfrak{I} \mathring{\lambda} \mathcal{N} \mathring{\pi}) + (D_k \mathcal{O} \mathfrak{I} \mathring{\lambda} \mathcal{N} \mathring{\pi})}{\sum_{j=1}^9 \{(U_j \mathcal{O} \mathfrak{I} \mathring{\lambda} \mathcal{N} \mathring{\pi}) + (D_j \mathcal{O} \mathfrak{I} \mathring{\lambda} \mathcal{N} \mathring{\pi})\}}$$
(2.1)

と計算される。以上がSSA における仮想セルへのエネルギー分配の概要である。このような手法 によりヒット情報を補強することで、SSA では ScECAL 内の各ストリップに 5 × 5 mm² の細分 度を与えることが可能となり、5 mm 角のセルを用いる SiECAL と同程度のジェットエネルギー分 解能を達成することができる。図 2.14 は先行研究における SSA の有無による uds ジェットエネル ギー分解能の比較のプロットである。

ゴーストヒット問題

ストリップ読み出しにおける問題点として、SSA が適用される同一のブロックへの2つ以上の 同時のヒットによって起こる、ゴーストヒットというものがある。図 2.15 はゴーストヒットの概



図 2.14: 先行研究における SSA の有無によるストリップの長さごとのジェットエネルギー分解能 (RMS90)の推移の比較 [9]. SSA を取り入れることで,長いストリップセルを用いた場合に見ら れるジェットエネルギー分解能の劣化が抑えられている.

要図である。ScECAL では読み出しがストリップ単位であるために、ある2本の同一ブロック内 のストリップにヒットがあったとき、その2つのヒット位置を対角線とする四角形の本来ヒット のない2つの頂点の位置にあたかもヒットがあるかのように信号を読み出してしまう現象が起こ る。この偽のヒットのことをゴーストヒットという。ゴーストヒットは ScECAL における解決す べき大きな課題の一つであり、対応策として EBU 間に5 mm 角のシリコン検出器あるいはシンチ レータタイルを置き、ヒット情報を補強するといったオプションが現在提案されている。図 2.16 に先行研究におけるゴーストヒット事象の分析結果を示す。



図 2.15: ゴーストヒットの概要図



図 2.16: 先行研究における μ – μペアを用いたゴーストヒット事象の分析 [9]. 45 mm のストリッ プを用いた ScECAL では、2 粒子のヒット位置間隔が 30 mm の時にゴーストヒット由来の信号の 割合が最も高くなる.

2.4 ScECAL 大型プロトタイプの開発とテストビーム実験

現在、中国の共同研究グループ(University of Science and Technology of China : USTC, Institute of High Energy Physics : IHEP) との協力のもと、ScECALの大型プロトタイプの開発 およびそのテストビーム実験を計画しており、大型プロトタイプの建設は既に終了している。テス トビーム実験は 2021 年 3 月にドイツの Deutsches Elektronen-Synchrotron(DESY)にて行われ る予定となっている。この大型プロトタイプを用いたテストビーム実験の目的は、計 32 個の EBU によるイベント再構成の性能評価であり、用いられる EBU はスーパーモジュールという専用の読 み出しモジュールに組み入れられている。スーパーモジュールは EBU およびタングステンの吸収 層の組を 2 つまとめたもの(2 つの EBU はストリップが直交するように配置される。)で、計 16 個のスーパーモジュールが用いられる。このテストに用いられる EBU に配置される SiPM には、 ピクセルピッチが 10 μ m および 15 μ m の 2 種類の MPPC(S12571-010P, S12571-015P)が使用 される。さらにシンチレータストリップからの読み出し形態に関しても、45 mm のストリップを 用いるシングル SiPM リードアウト方式の他に、後述のダブル SiPM リードアウト方式のものも テストされる予定である。図 2.17 および図 2.18 はそれぞれスーパーモジュールと大型プロトタイ プ全体の写真である。



図 2.17: ScECAL スーパーモジュールのパーツ(左)および組み立てられたモジュール(右)



図 2.18: ScECAL 大型プロトタイプ

第3章 ScECALにおけるシンチレーション光の 新しい読み出し方法の開発

ScECAL におけるシンチレーション光の読み出しには様々な形態が提案され、研究されている。 本研究ではストリップの中央に窪みを設け、そこからシンチレーション光を読み出す dimple リー ドアウトのストリップデザインについて、従来のシングル SiPM リードアウト方式の他、当研究 グループで新たに考案されたダブル SiPM リードアウト方式の研究を行った。

3.1 シンチレータストリップの研究開発および本研究の目的

前述の通り ScECAL の検出層の研究において重要となるのは、得られる光量がなるべく大きく かつヒット位置によらず一様であるようなストリップセルのデザインを開発することである。現 在そういった要件を満たせるよう様々なストリップセルのデザインが考案され、研究されている。 本研究では ScECAL について、測定やシミュレーションを通して求められる性能に適したデザインの開発を目指す。

ScECALでは、大量に必要となる読み出しチャンネルや加工時のコストを抑えるためにストリッ プ状に加工した細長いシンチレータを単位セルとして用いる。ストリップ状のセルを用いるにあ たり、セル内のヒット位置による光量の非一様性を考慮しなければならない。そこで本研究では、 dimple リードアウトデザインの45 mmのストリップを用いるスタンダードなシングル SiPM リー ドアウト方式および、新しく考案されたダブル SiPM リードアウト方式を用いた際の光量の位置 依存性を評価するために放射線源を用いた測定を行なった。また、ダブル SiPM リードアウト方 式に関してはシングル SiPM リードアウト方式にない特性を分析し、評価することも目的として いる。

3.2 ストリップの詳細なデザインと各読み出し手法の説明

dimple リードアウトデザイン

dimple リードアウトデザインは、SiPM を配置するための窪み(dimple)を設けたストリップ デザインである。図 3.1 に今回の測定に用いた dimple リードアウトデザインのストリップを示す。 このデザインでは、ストリップとストリップに巻かれる反射材の間に空気の層が存在する。また、 SiPM とシンチレータストリップはオプティカルグリス等で接着はされず、dimple と SiPM 上面 の間にも空気の層がある。dimple リードアウトデザインでは、dimple 部分のシンチレータの厚み が小さいためにそこでの発生光量が少なく、光量の位置依存性が大きくなるという特徴があり、そ のような面で dimple のデザインについて現在最適化を図るための研究が進められている。図 3.2 は測定に用いたストリップに設けられる dimple の図面である。図 3.3 および図 3.4 は今回の測定 で dimple 内に設置される SiPM(MPPC, S12571-015P)の寸法および測定時の dimple と SiPM の位置関係を表した模式図である。用いられる SiPM パッケージは横長で、実験室での実測に用 いる Printed Circuit Board(PCB)はこのパッケージが dimple 内において横向きになるように 設計した。したがって SiPM の受光面の中心は、dimple の中心より 0.3 mm 程度ずれた位置にあ る。しかし、ScECAL 大型プロトタイプ等のデフォルトの設計では SiPM パッケージはストリッ プ長手方向に対して垂直に置かれるようにデザインされたため、次章ではこの違いによる光量の 位置依存性への影響の分析を行う。



図 3.1: dimple リードアウトデザインのシンチ レータストリップ (45 mm)



図 3.2: ストリップに設けられる dimple の寸法



図 3.3: 使用する SiPM (MPPC, S12571-015P) の寸法



図 3.4: ストリップと dimple 内の SiPM の位置関係. 左図は測定時のシンチレータストリップと SiPM の位置関係を真横から見たときの模式図. 右図はストリップの dimple 付近を真上から見た 模式図である.

シングル SiPM リードアウト方式

シングル SiPM リードアウト方式は 45 mm のシンチレータストリップを単位セルとして用いる 読み出し方式で、ストリップの側面中央に上述の dimple を設け、そこに配置した SiPM から信号 を読み出す。中央の dimple 部分に合わせて検出光量が落ち込む特徴がある。

ダブル SiPM リードアウト方式

ダブル SiPM リードアウト方式は、近年新たに考案されたシンチレータストリップの信号読み 出し手法で、従来の 45 mm のストリップの代わりに 90 mm のものを単位セルとして用い、その 両端(あるいは 45 mm ストリップを 2 つ長手方向に連ねて並べた場合に dimple がある位置)に 置かれる 2 つの SiPM よりシンチレーション光を読み出す。そのため、読み出しチャンネルの総 数はシングル SiPM リードアウト方式の場合と変わらない。ScECAL のダブル SiPM リードアウ ト方式に期待される利点・特徴としては以下のとおりである。

- 2つの SiPM の間で信号のコインシデンスを取ることで、ノイズイベントをカットすることができる。
- 2つの SiPM からの読み出しを合わせることでシングルの場合より大きな光量を得られる。
 その一方で、それぞれの SiPM が得る光量はシングルの場合より小さくなるため、SiPM におけるサチュレーションが抑制される。
- 2 つの SiPM がそれぞれ得る光量や時間の差からストリップ上のどこにヒットがあったかを 再構成でき、ストリップ読み出しの際に現れるゴーストヒットを排除できる可能性がある。
- 1 つのセルに SiPM を 2 つ用いるため、1 つの SiPM が壊れてもストリップとして動作可能 である。

• シングル SiPM リードアウト方式に比べ、光量の位置依存性が大きい。

本章における光量測定の目的は、dimple 読み出しデザインのストリップに基づくシングル SiPM リードアウト方式の性能評価に加え、ダブル SiPM リードアウト方式の性能の実証およびそれが ScECAL のカロリーメータ性能に与える影響を研究することである。

3.3 シンチレータストリップのプロトタイプを用いた光量の位置依存性 の測定

3.3.1 光量測定方法の概要

光量の測定は、反射材を巻いたシンチレータストリップを SiPM が設置された PCB に固定し、 そこへ放射線源である ⁹⁰Sr からの β 線を照射することで発生するシンチレーション光を収集する という形式をとる。ストリップが固定された PCB は可動式のステージに取り付けられ、放射線源 に対してステージを動かすことでストリップへの β 線照射位置を変えながら測定を行う。以降の 小節にて測定セットアップの詳細を解説する。

3.3.2 測定セットアップ

測定に使用するシンチレータストリップは 2.2 節で述べた EJ-212 製のもので、3M 社開発の反 射材(ESR2)を巻いている。また、使用する SiPM は浜松ホトニクス製の S12571-P015 である。 表 3.1 および表 3.2 に ESR2 および S12571-P015 の主要な特性を載せる。

表 3.1: ESR2 の特性 [8]

| | ESR2 |
|-----|----------------|
| 厚み | $32~\mu{ m m}$ |
| 反射率 | 98% 以上 |

表 3.2: MPPC S12571-P015 の特性 [5]

| | S12571-015P |
|---------|-------------------|
| センサー面積 | 1 mm^2 |
| ピクセルサイズ | $15~\mu{ m m}$ |
| ピクセル数 | 4489 |
| 光子検出効率 | 25~% |
| ゲイン | 2.3×10^5 |

シンチレータストリップのタイプ

測定に用いたシンチレータストリップのタイプは以下の3種類である。図3.5、3.6、3.7 に各ストリップの寸法と dimple の位置を示す。

1.45 mm×5 mm×2 mm, 窪みの位置:中央



図 3.5: シングル SiPM リードアウト, 45 mm ストリップのデザイン

2.90 mm×5 mm×2 mm, 窪みの位置: 両端より 22.5 mm の位置



図 3.6: ダブル SiPM リードアウト, 90 mm ストリップのデザイン. 2 つの dimple は両端より 22.5 mm の位置にあり, これらは 45 mm ストリップを 2 本長手方向に並べた場合と同じ位置になっている.

3.90 mm×5 mm×2 mm, 窪みの位置: 両端



図 3.7: ダブル SiPM リードアウト, 90 mm ストリップのデザイン. 2 つの dimple は両端より 3 mm の位置にある.

以降、上記のストリップを上から順にタイプ1、2、3と呼称する。図 3.8 に測定に用いたスト リップ1、2、3の写真を示す。また、図 3.9 は反射材を巻いたストリップである。





図 3.8: 測定に用いたシンチレータストリップ. 上 図 3.9: 反射材を巻いてカプトンテープで固定したシンチ から順にタイプ 1, 2, 3 と並んでいる. レータストリップ (45, 90 mm). MPPC と接する部分以外 を覆っている.

セットアップのモジュールおよび物理的配置

測定セットアップの模式図および実際の写真を図 3.12 および図 3.13 に示す。今回の測定では、 ストリップの形状に合わせて溝を設けたアクリルカバーを用意し、ストリップをそれに入れ込んだ 状態で PCB とともに自動ステージ上に固定した。自動ステージにはシグマ光機社により開発され ている XY 可動ステージ OSMS26-(XY) を用いた。PCB には MPPC(12571-015P)が2つ設置 されている。図 3.10 および図 3.11 は使用した PCB およびアクリルカバーの写真である。放射線 源には ⁹⁰Sr を用い、直径 1 mm のコリメータの上に乗せている。測定は、専用のコントローラに よってステージを mm 単位で動かし、線源からの β線のヒット位置を操作するようにして行った。 線源およびコリメータの直下にはストリップを挟んで 5 mm 角のプラスチックシンチレータを用 いたトリガーカウンターが設置されている。外部からの電気的ノイズや回路同士の干渉を防ぐた め、セットアップ全体をアルミニウムで遮蔽している。また、MPPC からの信号は小さく、その ままでは解析が困難であるためスイスの Paul Scherrer Institute (PSI) で開発されたアンプ(PSI アンプ)を用いて増幅させている。PSI アンプにはポールゼロキャンセレーション回路が実装され ており、可変抵抗値の調節によってテールを除去し信号を整形することが可能となっている。今 回はゲインが約30倍程度となるように可変抵抗値を設定し、ポールゼロキャンセレーションによ る信号の整形を施した。図 3.14 および図 3.15 は実際に用いた PSI アンプの写真と PSI アンプの 回路図である。



図 3.10: 測定に用いた PCB. それぞれ MPPC (S12571-015P) が異なる 2 箇所についており、タ イプ2、3 のストリップの測定が可能となっている.



図 3.11: PCB 上にストリップを固定するための アクリルカバー



Trigger counter (5 \times 5 \times 5 mm³ plastic scinti.+SiPM)

図 3.12: セットアップの模式図



図 3.13: 実際のセットアップ



図 3.14: 実際に用いた PSI アンプ





図 3.15: PSI アンプの回路図.

DAQ

SiPM の信号波形は PSI で開発された Domino Ring Sampling (DRS) chip という高速波形デ ジタイザーを用いて取得した。図 3.16 は DRS の概略を示した図である。DRS は MEG 実験を始 めとする様々な実験で使用されているモジュールで、インバーター遅延鎖とシフトレジスターお よび 1024 個のコンデンサーセルによって構成されている。遅延鎖ではサンプリング信号が高速で 周回しており、それに応じてコンデンサーに電荷が蓄積していく。トリガーとなるイベントの信 号がインプットされるとサンプリング信号が周回をやめ、それまでにコンデンサーに蓄積された 電荷が順番にシフトレジスターを通ってアウトプットされるようになっている。サンプリング周 波数は最大で 5 GHz まで設定可能であり、その場合約 200 ns の時間範囲で波形を記録することが できる。これにより DRS では電荷や波高、タイミングなどをオフラインで解析することが可能と なる。



図 3.16: DRS の概略図 [12]

3.3.3 測定および解析方法

図 3.17 に(ダブル SiPM リードアウト方式の場合の)この測定のデータ取得回路の概略図を示 す。今回の測定では、使用する線源である ⁹⁰Sr から β 崩壊によって生成される ⁹⁰Y が、64.1 時間 の半減期によってさらに β 崩壊する際に放出される β 線(最大エネルギー約 2.28 MeV)のイベ ントをトリガーカウンターでトリガーし、その時にシンチレータストリップ内に発生しているシ ンチレーション光を測定した。セットアップ下部のトリガーカウンターはコリメータの設置され た台に粘着テープ等で接着しており、完全には固定されていないため、測定毎にレーザーポイン タを用いてコリメータとトリガーカウンターの位置を較正した。シンチレータストリップおよび トリガーカウンターの MPPC には、PSI アンプを通して KEITHLEY picoammeter 6487A を用 いて浜松ホトニクス推奨のオペレーション電圧($V_{op} \simeq 68$ V)を印加した。各 MPPC に接続した PSI アンプからの信号波形は、DRS で波形を記録した。シングル SiPM リードアウト方式の測定 の際はチャンネル0(ストリップ)、1(トリガーカウンター)の計 2 チャンネルで信号を読み出 し、ダブル SiPM リードアウト方式の場合はストリップの MPPC のチャンネルが一つ増え、全部 で3チャンネルを使用する。



図 3.17: データ取得回路図

光量の測定点

今回の測定では、β線を照射するポイントをストリップのタイプごとに以下のように設定した。 図 3.18 にタイプ1および3のストリップ上の測定点を記した模式図を示す。dimple 付近での光量 の位置依存性の振る舞いをより精密に調べるため、dimple のある部分では測定点を以下に記す通 りフラットな部分と比較して密に設定している。

タイプ1

ストリップの端より 2 mm の位置から 2 mm 刻みで測定していき、中央の MPPC の dimple の 位置(端より 20–25 mm)では刻み幅を 1 mm に変更する。

タイプ2

ストリップの端より 5 mm の位置から 5 mm 刻みで測定していき、MPPC の dimple の位置(端 より 20–25 mm, 65–70 mm)ではタイプ 1 と同様に 1 mm 間隔で測定する。

タイプ3

タイプ2と同様であるが、1 mm 刻みで測定する位置は 1-5 mm および 85-90 mm とする。



図 3.18: *β*線の照射位置

解析方法

図 3.19 に DRS によって取得されたシンチレーション光の SiPM 波形の一例を示す。今測定に おいて取得する1イベントあたりの波形の時間幅は 630 ns であり、シグナルは-280 – -220 ns に ある。光量の算出には1光電子分のチャージの値が必要であり、そのためにランダムに発生する ダークノイズを用いた。信号が記録される-300 – -200 ns の領域より前のオフタイミング領域にラ ンダムに混入するダークノイズを解析することで、単一光電子分のチャージを求めた。図 3.20 は そのようにして得られたダークノイズおよびシグナルのチャージ分布である。シグナルイベント のチャージのヒストグラムのフィットにはランダウ関数にガウス関数を畳み込んだ関数を使用して いる。本測定における光量とは、チャージ分布のフィットにより得られる関数の MPV 値を、ダー クイベントにおける1光電子分布のピーク値で割ったものを指す。



図 3.19: DRS から得られる波形



図 3.20: ダークイベント(左) およびシグナルイベント(右) のヒストグラム. ダークイベントの プロットは縦軸が Log スケールとなっている.

3.4 結果と考察

3.4.1 光量の位置依存性の測定

タイプ1

図 3.21 はタイプ1の光量の位置依存性の測定結果である。中央の dimple 部分を除いて光量は ほぼ一定値を示し、全体として 27 光電子程度となった。この値は先行研究 [19] における横側読み 出し手法のデザインのものとほぼ同等である。一方、dimple 部分での光量はそれ以外の部分と比 較して 30%程度落ち込んでいる。ストリップのフラットな部分の厚みが 2 mm であるのに対して dimple 部分は 1.2 mm しかないことから、純粋にそのポイント付近でのシンチレーション光の発 生量が少ないためにこのような振る舞いをすると思われる。また、光量は dimple の左側で最高 30 光電子程度まで上がっており右側より約 10%大きい。この左右非対称性は、dimple 内に置かれる MPPC パッケージがストリップ長手方向に対して対称に置かれておらず、受光面が中央からずれ ているために起こると考えられる。この MPPC パッケージとストリップのアラインメントに関す る議論は次章にて詳細に行う。

タイプ 2

図 3.22 はタイプ 2 の光量の位置依存性の測定結果である。藍色のプロット(左図)および黒色 のプロット(右図)はそれぞれ MPPC1(左図のマゼンタのプロット)および 2(左図の緑色のプ ロット)から得られるチャージ分布の和および幾何平均 √(MPPC1 の光量) × (MPPC2 の光量) のヒストグラムをフィットして得られたピーク値である。dimple 部分の光量の落ち込みは 25%程 度であり、光量和のプロットを見ると概ね 2 本のスタンダードな 45 mm のストリップを長手方向



図 3.21: 45 mm シンチレータストリップ (タイプ1) の光量の位置依存性. プロットの上部に対応 するタイプのシンチレータストリップの模式図を記した.

に連ねて並べたような結果となっている。全体として平均 38 光電子程度の光量が得られ、2 つの MPPC を用いることで 45 mm シングル SiPM リードアウト方式の場合よりも集光効率が上がっ ていることがわかる。一方で、片方のみの MPPC から得られる光量は最高で 25 光電子程度で、 MPPC から離れていくにつれて 10 光電子程度まで小さくなっている。そのため 1 つの MPPC に 収集される光量はタイプ 1 と比較して小さく、MPPC のサチュレーションが起こりにくくなって いると言える。



図 3.22: 90 mm シンチレータストリップ (タイプ2) の光量の位置依存性

タイプ3

図 3.23 はタイプ 3 の光量の位置依存性の測定結果である。2 つの MPPC からの光量和の平均値 は 35 光電子程度で、タイプ 2 と同様にストリップ全体に渡ってシングル SiPM リードアウト方式 の場合よりも大きな光量応答が得られた。一方で、このタイプのストリップでは中央付近での測 定の際に MPPC と *β* 線照射位置の間の距離が 40 mm 程度まで大きくなるため、これまでの結果 と比べると中央付近での収集光量の減少が顕著となっている。この光量の落ち込みは幾何平均を 取ることで右図のようにフラットにすることができた。また、タイプ 2 と同様に MPPC のサチュ レーションはタイプ 1 と比べて抑制されていると言える。



図 3.23: 90 mm シンチレータストリップ (タイプ3) の光量の位置依存性

3.4.2 タイプ3ストリップにおけるヒット位置再構成

時間差を用いたヒット位置再構成

タイプ3に関しては、2つの MPPC が得る光量の差や信号の時間差を用いてヒット位置の再構成を試みた。信号の時間はコンスタントフラクション(CF)法によって求める。CF 法は信号の ピークに対して一定の電圧まで波形が立ち上がった時間をその信号の時間とする方法であり、一 定の閾値電圧に時間取得のフラグを置くリーディングエッジ法と異なり、取得される時間がピー クの大きさに依存しないという特長を持つ。今回の測定ではコンスタントフラクションをピーク 波高の 8%と設定して解析を行った。ヒット位置ごとに 2 つの MPPC が受け取る信号の時間差の 分布をガウス関数でフィットした。図 3.24 はストリップの中心における時間差の分布と、ストリッ プ全域に渡る時間差のピーク値のプロットである(ストリップ両端からの 3 点を除外している)。 なお、時間差は $\Delta t = t_{MPPC2} - t_{MPPC1}$ としている。



図 3.24: 90 mm シンチレータストリップ (タイプ 3) の中心 (45 mm 地点) における時間差の分布 (左) および時間差ピーク値のヒット位置依存性(右)

時間差のピークのプロットの両端の3点ずつを除いた線形の部分を直線でフィットし、得られた一次関数を用いてヒットイベントの時間差をヒット位置へ変換した。図3.25 は時間差を変換して得たヒット位置のヒストグラム(MPPCより45 mmの位置)と、各ヒット位置における位置再構成の分解能である。



図 3.25: 時間差から再構成したヒット位置のヒストグラム(左)およびヒット位置ごとの分解能 (右)

光量差を用いたヒット位置再構成

光量についても同様の解析を行った。2 つの MPPC の光量の差の相対値 *LY_{diff}* を、MPPC1、 2 の光量をそれぞれ *LY*1 および *LY*2 として次のように定義した。

$$LY_{diff} = \frac{LY1 - LY2}{LY1 + LY2}$$
(3.1)

この光量差のヒストグラムをガウス関数でフィットしたピーク値をプロットした。図 3.26 はその 結果である。



図 3.26: 90 mm シンチレータストリップ, タイプ 3 の中心 (45 mm 地点) における光量差の分布 (左) および光量差ピーク値のプロット(右)

図 3.27 は各点における光量差の分布のピーク値を時間差と同様にフィットし、得られた一次関数 によって光量差をヒット位置に再構成した際の分布およびその位置分解能である。



図 3.27: 光量差から再構成したヒット位置のヒストグラム(左)およびヒット位置ごとの分解能 (右)

時間差、光量差の両方を用いたヒット位置再構成

時間差・光量差から再構成したヒット位置とその分解能をそれぞれ x_t 、 x_l および σ_t 、 σ_l として、次のように加重平均 x_{mean} を算出した。

$$x_{mean} = \frac{\frac{x_t}{\sigma_t^2} + \frac{x_l}{\sigma_l^2}}{\frac{1}{\sigma_t^2} + \frac{1}{\sigma_l^2}}$$
(3.2)

ストリップ 45 mm 地点における加重平均のヒストグラムおよびフィッティングにより得られたヒッ トごとの位置分解能を図 3.28 に示す。図 3.28 の右図には比較のために上述の時間差および光量差 のみを用いた場合のプロットも載せる。



図 3.28: ヒット位置の加重平均値のヒストグラム(左)およびヒット位置ごとの分解能(右)

最終的に得られたヒット位置再構成の平均的な位置分解能は、時間差のみ:32 mm、光量差の み:27 mm、時間差および光量差の加重平均:22 mm となり、時間差と光量差の両方を用いるこ とでより良い分解能が得られることがわかった。また、この結果から前述のゴーストヒット問題に おいて、ダブル SiPM リードアウト方式を用いることにより本来のヒット位置からおよそ20 mm までの位置に発生する偽のヒットを排除できる可能性がある。現在のプロトタイプでは、読み出 しエレクトロニクスの時間分解能が悪いため実装は難しいが、より性能の良いエレクトロニクス の搭載が可能なのであればこのような解析がプロトタイプでも可能となる。

3.4.3 タイプ3ストリップにおけるノイズ削減の研究

タイプ3のストリップにおける信号のコインシデンスを取ることによりノイズ事象の削減を試みた。測定によって得た全イベントを、2つの MPPC から読み出される信号の時間差がある値以下となるものとそうでないものに分離するような解析を行った。図 3.29 は CF 法によって得た信号の時間差のヒストグラムである。このヒストグラムより、線源由来のイベントのほとんどは-2-2 nsの範囲までに収まっていることがわかる。これを元に時間差のコインシデンス条件を $|\Delta t| < 2$ nsと設定した。図 3.30 は取得したイベントをこのコインシデンス条件を満たすものとそうでないものに分離したヒストグラムである。



図 3.29: MPPC1 および2 で読み出された信号の時間差の分布



図 3.30: $|\Delta t| < 2$ ns のコインシデンス条件を施した MPPC1 および 2 の光量和の分布. 縦軸は Log スケールである.

低光量領域の青のヒストグラムは片側の MPPC のみに出力があったランダムノイズイベント、す なわちペデスタルである。⁹⁰Sr からの β線には低エネルギーのものも含まれるため、ペデスタル 付近までテールを引くことが期待される。普通、この領域の事象を閾値を下げて測定しようとし てもペデスタルを拾ってしまって綺麗に分離することはできない。しかし、ダブル SiPM リード アウト方式においては、時間差のコインシデンスによりノイズを除去することで、ペデスタル付 近までエネルギーの低い事象を取得することができるようになる。

ラボでの測定により、シングルおよびダブル SiPM リードアウト方式の性能が実証された。今後はこのダブル SiPM リードアウト方式の導入により、ScECAL のカロリーメータ性能がどのように改善するかをシミュレーションにより研究する予定である。

第4章 SiPMとシンチレータストリップ間のミス アラインメントの研究

3.4.1 にて議論した 45 mm のシンチレータストリップの dimple 付近に現れた光量の左右非対称 な振る舞いや、本研究において使用した PCB と ScECAL 大型プロトタイプに使用される EBU そ れぞれにおける SiPM の配置の向きの違いによる光量の位置依存性への影響について、実測やシ ミュレーションを通してより詳細に分析した。

4.1 SiPM-ストリップ間のミスアラインメント

先述の通り、PCB 上に置かれる MPPC パッケージはストリップ長手方向に対して横向きであ り、MPPC の受光面と dimple の中心は一致しない。そのことに加え、手作業でストリップを固定 するために生じる配置のムラがあることから、3 章の測定における MPPC とストリップの間には ミスアラインメントが生じており、それによって測定された dimple 付近の光量が左右で非対称で あったと考えられる。光量の非一様性が増加することで、カロリーメータ性能を低下させる可能 性があるため、この章では SiPM-ストリップ間のミスアラインメントが生む光量の非一様性を調 べる。その後の章では光量の非一様性がカロリーメータ性能に与える影響をシミュレーションを 用いて研究する。

4.1.1 実験セットアップにおける SiPM-ストリップ間のミスアラインメント

上述のような dimple 内における MPPC パッケージの向きの他に、dimple と MPPC パッケー ジの上面の間にある隙間も SiPM-ストリップ間に生じるミスアラインメントの要因の一つとして 考えられる。今回の研究では、大型プロトタイプと同様の配置(MPPC パッケージがストリップ 長手方向に対して垂直に置かれる場合)について、dimple と MPPC パッケージ上面の隙間がある ことで生じうるミスアラインメントについて分析した。図 4.1 は dimple と MPPC パッケージの 位置関係と生じうるずれを表した模式図である。dimple と MPPC の上面が密着しているならば、 dimple や MPPC パッケージの寸法から概算すると dimple 内において MPPC パッケージが左右 に動きうる幅は ±0.2 mm 程度である。しかし実測のセットアップでは反射材や固定用テープの厚 みの影響のため MPPC と dimple の上面は密着せず、隙間ができてしまうことがわかった。実際 のセットアップを用いて測定したところ、MPPC パッケージは dimple 中心から左右に ±1 mm 程 度動くことが確認され、この値と dimple の形状から概算すると dimple と MPPC 上面の間には約 0.45 mm の隙間があることになる。



図 4.1: 実験セットアップに生じうる SiPM-ストリップ間の隙間およびミスアラインメント.上図 はセットアップを真横から見た図で,下図は同じ部分を真上から見た図.

4.1.2 EBU における SiPM-ストリップ間のミスアラインメント

図 4.2 は ScECAL 大型プロトタイプの EBU 上に並べられるシンチレータストリップのピッチ であり、反射材や固定用テープの厚みを考慮すると、長手方向のストリップ同士の隙間は平均約 0.2 mm となる、長手方向のストリップ間の間隔は約 0.2 mm である。EBU 上にはシンチレータ ストリップが長手方向に 5 本並ぶため、それらがアラインメントされる際に生じたずれが蓄積さ れると dimple の中心と MPPC の受光面の中心が最大で 0.8–1 mm 程度ずれうることになる¹。

4.2 シミュレーションを用いたミスアラインメントの分析

本研究では、Geant4²を用いてストリップ内を伝播するシンチレーション光をシミュレートし、 実験室での測定や EBU へのストリップの設置におけるミスアラインメントによって、MPPC パッ

¹実際の大型プロトタイプでは、このようなずれが生じないよう十分配慮した上でアラインされている.

²Geant4 は、粒子が物質を通過する際に生じる相互作用をシミュレートするソフトウェアであり、高エネルギー物 理をはじめ様々な分野で活用されている.[18]



図 4.2: EBU にアラインされる際のストリップ間の間隔

ケージが dimple に対して最大1 mm 程度までストリップ長手方向にずれて配置される場合の光量の位置依存性を評価した。

4.2.1 シミュレーションにおけるセットアップ

Geant4 内でタイプ1ストリップを再現し、その中におけるシンチレーション光の伝播プロセス を定義した。その後、Geant4 内で再現された ⁹⁰Sr 線源やコリメータを用いて、実測と同様にスト リップのヒット光量の位置依存性をシミュレートした。

測定セットアップの配置

このシミュレーションにおけるセットアップの配置の模式図を図 4.3 に示す。反射材とストリッ プの間の空気層の厚みは 0.05 mm とした。また、イベントの取得には実測に用いたものと同じ寸 法の検出部分を持ったトリガーカウンターを用いている。これらの位置関係に関しては 3 章で行っ た実測とほぼ同じ条件になるように配置した。



図 4.3: シミュレーションで実装した測定セットアップの模式図

シンチレーション光の伝播プロセス

図4.4にストリップ内のシンチレーション光伝搬のシミュレーションのセットアップの概要を示 す。精度の良いシミュレーションを行うために、ストリップ内で発生したシンチレーション光がス トリップから空気の層、あるいはその逆といった物質の境界を跨ぐ際の振る舞いを定義する必要 がある。Geant4では Optical Photon というクラスによって、物質の境界にやってきたシンチレー ション光が、全反射や屈折といった反応をそれぞれどの程度の割合で起こすかを設定することが できる。このシミュレーションでは以下の5つの伝播プロセスを設定し、実測の環境に近づけて いる。

- シンチレータから空気層には出て行かずに全反射される。
- シンチレータから屈折して空気層に出ていった後、反射材によって反射されてシンチレータ 内に再び入る。
- シンチレータから屈折して空気層に出て行った後、反射材で反射されず失われる。
- シンチレータから屈折して空気層に出て行き、反射材で反射された後、シンチレータの表面
 にてさらに反射される。
- シンチレータ内で減衰して失われる。



図 4.4: ストリップ内におけるシンチレーション光の伝播の例

物質境界面におけるシンチレーション光の振る舞い

シンチレーション光が横断する2つの物質の種類によって、反射と屈折が起こる。その境界条 件としては以下の2つがあり、それぞれの場合で光子の振る舞いが異なる。

- 誘電体と誘電体の境界面:反射と屈折の両方が起こる。どちらが起こるかは境界面への入 射角および一方の物質へ侵入するときの屈折角と、境界面を構成する物質の屈折率によって 決まる。
- 誘電体と導体の境界面:シンチレーション光は導体に吸収、または反射される。

反射

境界面での反射には以下の4種類がある。反射の種類を表した模式図を図4.5に示す。

- Specular Spike(完全鏡面反射):物質の平均表面で起こる、反射後の広がりが小さい鋭い 反射
- Specular Lobe: 粗い物質表面で起こる反射後の広がりが Specular Spike に比べて大きい反射(Oren-Nayar 反射)
- Diffuse Lobe : 境界面での乱反射(Lambert 反射)
- Back Scattering: 後方反射



図 4.5: 物質表面における反射の種類 [14]

これらの反射の内、どの反射がどの割合で生じるかを設定する必要がある。また、物質の平均表 面とマイクロファセットのなす角を α としたときの α の標準偏差 σ_α のパラメータをシンチレータ ストリップ表面に設定することで、ストリップ表面の粗さを設定することができ、今回はその値 を 0.1 rad と設定した。表 4.1 に、このシミュレーションにおける各反射が起こる割合およびシン チレータストリップに関連するパラメータをまとめた。これらの値は、光量のヒット位置依存性 が実測と概ね合致するように最適化したものである。発生光量の設定値は EJ-212 のカタログ値あ る 10,000 photons/1 MeV e⁻ に比べて 1,800 とかなり小さい。この違いは、シミュレーションに おける SiPM の PDE を計算時間短縮のため 100%(実際の測定に用いた MPPC の PDE は 25%) としていることや、3 章で行ったような実際の測定と異なり、シミュレーションでは光漏れが全く 発生しない理想的なシンチレータストリップを想定していることなどによる影響を補正するため である。今回の研究では、主に光量分布の相対的な比較を行うため、概ね実測の結果と合致する よう、フラット部分での光量が 30 光電子程度となるように発生光量を調整した。

β線源の作成

このシミュレーションでは、⁹⁰Sr の崩壊により生じる β 線の内、コリメータを通る β 線のエネ ルギーおよび運動量ベクトルをシミュレートして記録しておき、その値を測定に用いる線源から

| パラメータ名 | 設定値 |
|-----------------------------|-------|
| Specular Spike | 0 |
| Specular Lobe | 0.9 |
| Diffuse Lobe | 0.1 |
| Back Scattering | 0 |
| 発生光量 (photons/1 MeV e^-) | 1,800 |
| 屈折率 | 1.58 |
| 吸収長 (cm) | 250 |
| 反射率 | 0.98 |
| 表面粗さ (rad) | 0.1 |

表 4.1: シミュレーションに使用するパラメータ

発生する初期粒子として用いている。図 4.6 はそのようにして生成された β 線のエネルギー分布 および天頂角 (cos θ) 分布である。エネルギーの平均値は 627 keV、天頂角 cos θ の平均値は 0.81 で、シンチレータストリップに入射する粒子はエネルギーと角度についてある程度広がりを持っ た状態となる。



図 4.6: コリメータ通過直後の β 線のエネルギー分布(左)と天頂角($\cos \theta$)分布(右)[13]

4.2.2 光量のシミュレーション

光量の算出方法

ストリップの長軸上の複数の点において、β線を照射し検出光子数をカウントする。各点でその ヒストグラムを作る。光量の値は、そのようにして作成した光電子数のヒストグラムを実測と同 様にランダウ関数にガウス関数を畳み込んだ関数によってフィットし、その MPV 値をシミュレー ションにおける検出光量とする。図 4.7 に典型的な光量分布のヒストグラムとそのフィットを示す。



図 4.7: シミュレーションにより得られた光量分布のフィット例

4.2.3 比較したストリップ dimple 内における SiPM の配置パターン

dimple 内の SiPM の配置に関して、シミュレーションで以下の3パターンの比較を行った。

比較1

SiPM パッケージ上面の隙間が0 mm の場合と、0.45 mm の場合(図 4.8 参照)における光量の 位置依存性をシミュレートし、その結果を比較した。



図 4.8: 比較1:光量の位置依存性をシミュレートしたストリップ垂直方向の間の隙間が異なる2 つの配置(左:0 mm,右:0.45 mm)

比較2

前述の通り、SiPM 上面に隙間があると、ストリップ水平方向のミスアラインメントがより大き くなる可能性がある。従って、SiPM 上面に 0.45 mm の隙間がある状態で、ストリップ長手方向 に対する dimple 内の SiPM パッケージ長手方向の角度が 0°(左右非対称)と 90°(左右対称) の場合(図4.9参照)の光量の位置依存性を測定し、3.4.1にて確認された光量の非対称性が再現 されるかをシミュレートした。



図 4.9: 比較 2: 光量の位置依存性をシミュレートした、SiPM の向きが異なる 2 つの配置. 左図は 3 章におけるタイプ 1 ストリップの実測と同様の配置を想定している.

比較3

ストリップ垂直方向に 0.45 mm の隙間がある状態で、SIPM パッケージがストリップ長手方向 に 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mm と平行移動した場合(図 4.10 参照)のそれぞれの光量の位置依存 性をシミュレートし、それらを比較した。



図 4.10: 比較 3: 光量の位置依存性をシミュレートした、ストリップ長手方向における SiPM の位置が中心からずれた配置

4.2.4 結果と考察

比較1

図 4.11 に比較 1 の結果を示す。SiPM 上面の隙間の有無で、ほとんど光量の振る舞いに違いは 見られなかった。また、dimple 付近における光量の落ち込みは約 30%で、実測と同程度の結果が 得られた。また、SiPM の受光面が存在する中央の2点では若干の光量の上昇が見られるが、実測の結果(図 3.21)ではこのような振る舞いは確認できない。したがって、実測のセットアップでは反射材の巻きつけが不十分であったために光漏れが起こった可能性が考えられる。



図 4.11: シミュレーションによる比較1の測定結果.赤のプロットが図 4.8 の右図,黒のプロット が左図に対応する.

比較2

図 4.12 は比較 2 のシミュレーションの結果である。SiPM が対称に置かれるパターンの光量の 位置依存性はほぼ対称であるのに対し、非対称に置かれるパターンでは dimple 付近において若干 の左右非対称性が見られる。非対称な方では受光面がある位置で光量がわずかに上がっているが、 それ以外のフラットな部分には実測で見られたような非対称な振る舞いは見られなかった。



図 4.12: シミュレーションによる比較 2 の測定結果. 赤のプロットが図 4.9 の左図, 黒のプロット が右図に対応する. 図 4.13 は比較3 のシミュレーションの結果である。ストリップ長手方向のずれが大きくなるに つれて測定光量の左右非対称性が徐々に大きくなっているが、0.2–0.8 mm までは劇的な変化は見 られなかった。一方で、ずれが1.0 mm の場合の振る舞いは他のパターンと比べて非対称性が非 常に大きく、全体の検出光量も上がっていることに加え、受光面の直上で見られたピークがなく なっている。このように検出光量が大きくなるのは、SiPM が dimple 側面から非常に近い位置に あり、周りの空間を占めるシンチレータの体積の割合が大きいことによると思われる。この結果 から dimple の左右で 10%程度の光量の差が見られた3章の実測では、設計上生じるミスアライン メント (0.3 mm 程度)に加えてストリップ配置時の手作業によるミスアラインメントがいくらか 加わっていたと考えられる。シミュレーションでは 0.8 mm のずれがあっても左右の光量の差は 10%には届かないため、実測における手作業によるミスアラインメントは少なくとも 0.5 mm より 大きいと思われる。3章の実測のセットアップでは MPPC パッケージの位置を確認できないこと から、0.5 mm のずれが生じていてもそれを確認し、修正することは難しい。



図 4.13: 光量の位置依存性をシミュレートした,ストリップ長手方向における SiPM の位置が中 心からずれた配置パターン

以上のシミュレーションを用いた光量測定より、ストリップ垂直方向のミスアラインメントのみ の場合は光量の位置依存性に影響を及ぼすことはないが、そこへストリップ長手方向のミスアラ インメントが加わると、それに応じて受光面の位置で見られたピークが移動し、フラット部分の光 量が徐々に大きくなっていくことがわかった。また、実測で見られた非対称性は、シミュレーショ ンで確認されたように MPPC 受光面の中心からのずれによるものである可能性が高く、dimple の 左右での光量の大きさのバランスから、設計上生じるミスアラインメントに加えてストリップ固 定時の手作業によって生じたミスアラインメントもあったと考えられる。

4.3 ミスアラインメントの影響の実測

タイプ1ストリップを用いた実測によって、ミスアライントの有無で dimple 付近の光量の位置 依存性がどのように変化するのかを確かめた。また、前節のシミュレーションの結果との比較を 行った。

4.3.1 実測の測定セットアップ

測定のセットアップは3章と同じであるが、反射材の形状と PCB への配置方法が異なる。図 4.14 は今回の測定に用いたシンチレータストリップと反射材であり、反射材は、組み上げた際にス トリップ上面から dimple 内の MPPC の位置を確認できる穴ができるように加工されている。図 4.17 は反射材に設けた MPPC の位置を確認するための穴から dimple 内の MPPC の位置が確認で きる様子を示している。この MPPC 用の窓は、MPPC の位置を決めストリップを固定した後、上 から反射材の小片を被せ、カプトンテープで貼り付けて閉じる。また、MPPC に対してストリッ プを動かすことでミスアラインメントを再現できるように、ストリップ下面の反射材の MPPC 用 の穴を拡張した。MPPCより大きい穴によってストリップ底面部分から光漏れが起こらないよう に MPPC パッケージの周りに図 4.15 のように反射材を貼り付けた。もともと、このセットアップ では、MPPC が dimple 内で図 4.9 左のように配置される設計になっていた。この測定では図 4.16 のようにストリップを 90°回転させて PCB に配置することで、MPPC パッケージが図 4.9 右と 同様にストリップ長手方向に関して対称にアラインされるようにした。したがってストリップは アクリルカバーではなくカプトンテープによって PCB に直接貼り付けられる形で固定される。今 回の測定では、MPPCの受光面が dimple の中心にある場合と中心から 0.7 mm ずれた位置にある 場合の2パターンを測定した。図4.18は0.7mm ずらした場合における MPPC 用の窓から覗いた dimple の様子である。





bottom reflector

図 4.14: 測定に用いたタイプ1ストリップと反 射材

図 4.15: MPPC 周りに配置した,ストリップ底 面部分からの光漏れを防ぐための反射材



図 4.16: PCB にストリップを貼り付けた様子. 3 章における測定とは異なり、図 4.9 右のような配置になっている.



図 4.17: MPPC の中心と dimple 中心の間にずれ がない場合の dimple 内の様子



図 4.18: MPPC の中心と dimple の中心の間に 0.7 mm のずれがある場合の dimple 内の様子

光量の測定方法や解析方法は 3.3.3 と同様であるため詳細は省くが、光量の測定点を中心の 10 点(1 mm 刻み)とした。

4.3.3 結果と考察

図 4.19 は MPPC の位置にずれがない場合の実測およびシミュレーションの結果である。実測 とシミュレーション両方の、中心の 1 点を除く中央 4 点の光量値を用い、シミュレーションの値 が実測に合うように光量(縦軸)をスケールしている。実測の結果は概ね左右対称となっており、 シミュレーションの振る舞いとほぼ一致している。しかし、3 章での測定結果と比較して光量が 小さく、また MPPC 直上で見えるはずのピークがないことから、シンチレータストリップからの 光漏れが増加していることが考えられる。光漏れの原因としては、MPPC 上部の窓やストリップ 底面の拡張した MPPC 用の穴を完全に塞ぎ切れていないことが考えられ、このセットアップには 改善の余地があると言える。図 4.20 は 0.7 mm のミスアラインメントがある場合の結果である。 MPPC が寄っている右側の光量の振る舞いはシミュレーションによってよく再現されている。し かし左側の振る舞いは、ずれがない場合と同様にシミュレーションと一致せず、光漏れの増加に よって光量が落ちていると思われる。このように、シミュレーションと実測で細かい挙動におけ る違いはあるが、シミュレーションは概ね実測を再現していると言える。





図 4.19: MPPC の中心と dimple の中心にずれが ない場合の光量の実測およびシミュレーション結 果. 下部に dimple および SiPM の実際の位置を 横から見た図として示している.

図 4.20: MPPC の中心が dimple の中心より 0.7 mm ずれている場合の光量の実測およびシミュ レーション結果

光漏れが増加している可能性があるという点で、このセットアップには改善の余地があるが、現 状のデザインで手作業によってこれ以上にストリップが密封された状態を作り出すことは難しい。 したがって、より高い密封性を確保できる新しい反射材の加工デザインや、PCBへの固定方法を 改良し、さらに精度の良い測定を行うことが今後の課題である。一方でシミュレーションでは、光 漏れを再現することで MPPC 直上の光量ピークが消えるかを確かめ、より実測に近い状況を再現 する研究を行う予定である。

また、ミスアラインメントがある場合の光量の位置依存性を組み込んだ ILD モデルのシミュレー ションを行い、ミスアラインメントがカロリーメータ全体の性能へ与える影響を分析することで、 EBU 上へのストリップの配置においてミスアラインメントを考慮すべきかどうか、また考慮すべ き場合はそれがどこまで許容されるかを研究する予定である。

第5章 ILDモデルのシミュレーション

前章までで述べられた、ストリップの光量のヒット位置依存性やダブル SiPM リードアウト方式 が ILD 全体のカロリーメータ性能に与える影響を調べるための準備として、ILD モデルのシミュ レーションのセットアップを行った。

ILD モデルのシミュレーションでは、生成したジェットをカロリーメータへ入射させ、ILD 全体 としてのジェットエネルギー分解能を PFA を含めてシミュレートすることができる。しかし、現 在のシミュレーションの設定では、ECAL に用いられるシンチレータストリップの光量はヒット 位置依存性を持たず、完全に一様となっている。本研究は、3章で得られた光量の振る舞いや、4 章で研究したミスアラインメントの影響をこのシミュレーションに組み込み、より現実に即した カロリーメータ性能の評価を行うことを目的としている。具体的には、シミュレーションによっ て以下の点について研究する予定である。

- dimple による光量の落ち込みがある場合のカロリーメータ性能の評価
- ダブル SiPM リードアウト方式を想定した光量のヒット位置依存性の実装、およびそれによるゴーストヒット抑制の可能性の研究
- ミスアラインメントがカロリーメータ性能に及ぼす影響およびミスアラインメントの許容範囲の調査

このシミュレーションによってジェットエネルギー分解能を評価するには、シミュレーション内の ECAL に存在する ECAL モジュール間のギャップによって生じるヒットエネルギーの落ち込みを 補正した上で、生成したヒットイベントをカロリーメータに入射させ、PFA に必要なパラメータ の較正を行う必要があるため、非常に時間がかかる。今回の研究で行ったのは、ビーム軸方向に ついての ECAL モジュール間のギャップによるエネルギーの落ち込みを補正した状態でのジェッ トエネルギー分解能の評価までであり、上述の光量の落ち込み、ダブル SiPM リードアウト方式、 ミスアラインメントの実装には至らなかった。

5.1 iLCSoft

iLCSoft は、ILC といった線形加速器におけるイベントのシミュレーションや解析に用いられ るソフトウェア群であり、Geant4 をベースとしたシミュレーションによって検出器の性能予測な どが可能である。図 5.1 は iLCSoft のシミュレーションや解析の流れの模式図である。本研究に 使用した iLCSoft のバージョンは v02-02 である。ここでは本研究のシミュレーションに使用する DD4hep、Marlin、PandoraPFA についての概要を述べる。



図 5.1: iLCSoft におけるシミュレーションおよび解析の模式図 [15]

5.1.1 DD4hep

Detector Description toolkit for High Energy Physics (DD4hep)は、Geant4をベースとした MCシミュレーションツールキットである。主に、シミュレーションに用いる検出器モデルのジ オメトリの定義、検出器モデルへ粒子を入射した際の相互作用のMCシミュレーション、イベン トの可視化といった機能を内包しており、解析に必要なヒットを生成し、記録する役割を持つ。 DD4hepで作成されたヒット情報を元に、後述のMarlinによってイベントを再構成する。使用で きる検出器モデルには多数のバージョンが用意されており、ECALやHCALなどのカロリーメー タに考案されている技術オプションを自由に組み合わせたILDモデルでのシミュレーションが可 能である。本研究において使用するILDモデルのバージョンはILD.15_o3_v02(ECALとHCAL の両方がシンチレータベースとなっているデザイン)である。検出層の単位セルは45 mmのスト リップ状になるように設定しており、故にSSA(2.3.3参照)が適用される。

5.1.2 Marlin

Modular Analysis and Reconstruction for the LINear collider (Marlin) は、DD4hep で作成 したヒット情報のデジタル化やイベントの再構成、解析を行うことができる再構成ソフトウェア フレームワークであり、内包されている多数の再構成や解析のプロセッサーを統括して実行する ことが可能である。また、プロセッサー(C++で記述)はモジュール化され、ユーザーが自由に 追加することができる。使用するプロセッサーおよびプロセッサー内のパラメータは、XML 形 式のコンフィグレーションファイルで設定することができ、Marlin はこの XML ファイルを読ん で再構成や解析などの処理を実行する。Marlin によってデジタル化されたヒット情報は、後述の PandoraPFA によるイベントの再構成に使用される。

5.1.3 PandoraPFA

PandoraPFA は PFA を用いたイベント再構成アルゴリズムである。再構成の際にカロリーメー タへのヒット情報をそのエネルギー分布を元にクラスタリングする。作成された全てのクラスター は Particle Flow Object (PFO) と呼ばれる再構成された1粒子由来のヒット群として分類され、 そのエネルギーやクラスター形から元の粒子の種類などを識別する。 PandoraPFA には「検出さ れたエネルギーに対応する MIP 数」や「ECAL、HCAL それぞれの電磁シャワー、ハドロンシャ ワーに対する応答」の補正のためのパラメータが存在し、これらは検出器のタイプやジオメトリ に変更を加えた際などにその都度較正する必要がある。較正には特定のエネルギーの_γ、K⁰_L, μ粒 子などを用いる。

5.2 ECAL モジュール間のギャップ補正

この ILD モデルのシミュレーションにおける ECAL には、実機と同様に ECAL モジュール間の ギャップが存在する。図 5.2 は、ECAL をビーム軸に関して真横から見た時の断面における、ギャッ プの位置を示した図である。ECAL バレルモジュール(図 2.2)は、1 つにつき 5 列の EBU スラ ブが並んだ構造となっており、そのスラブ間にギャップが存在する。ECAL バレル部分には全 25 列の EBU スラブがビーム軸に沿って並ぶので、等間隔に 24 個のギャップがあることになる。ま た、ECAL バレル部分とエンドキャップ部分の間にも比較的大きなギャップが存在する。このよう なギャップがある部分では、ヒットエネルギーの測定値の落ち込みが発生するため、正しいエネル ギー測定値を得られるよう、ギャップによる影響を補正する必要がある。本研究では、10 GeV の 光子を IP から ECAL に等方的に入射させることによって得られる、ビーム軸方向からの角度に ついてのヒットエネルギーの分布に関するギャップ補正を行った。

5.2.1 ヒットエネルギー分布の確認および落ち込み部分のフィッティング

ビーム軸からの角度を θ とし、10 GeV の光子を IP から等方的に入射させた際の cos θ に対する ヒットエネルギーの分布およびそのプロファイルプロットを図 5.3 に示す。ECAL モジュール間の ギャップによって生じた測定エネルギーの落ち込みが確認できる。MC シミュレーションによってカ ロリーメータに入射される粒子のエネルギーは、入射角度 (カロリーメータ内での測定位置) にかか わらず生成時のエネルギーと整合することが望ましい。したがってこの研究では、図 5.3 左に見られ る特に大きな 4 つの落ち込みを補正し、PFO のエネルギー応答の一様性の向上を目指す。まず、プロ ファイルプロット上の落ち込みをマルチガウシアンでフィットし、そこから得られるフィットパラメー タを用いて PFA を行う段階で PFO 光子のエネルギーに対する補正を行なった。フィットしたのは、 バレル領域 ($|\cos \theta| < 0.7$) に見られる EBU スラブ間のギャップによる落ち込み (ECAL 中心から数 えて 3 つ目まで) と、バレル-エンドキャップ間のギャップによって発生した落ち込み ($|\cos \theta| = 0.78$



図 5.2: ECAL におけるギャップの位置を示した断面図. 白の点線で5等分されている黄緑の長方 形が ECAL モジュールを表している.

付近)の計4つである。フィッティングには $f(|\cos \theta|) = \text{constant energy}(10 \,\text{GeV}) + 4 \,\text{gaussians}$ の形の関数を用いた。

5.2.2 補正方法

各ヒット情報の中の $\cos \theta$ を参照し、フィットによって得られたマルチガウシアンからその $\cos \theta$ に対応する落ち込みの大きさを取得する。エネルギーの真値(今回の場合 10 GeV)に対する落ち 込みの大きさの相対値の逆数を補正値として各ヒットのエネルギーに乗算する。すなわち、補正 前と補正後のヒットエネルギーの関係は以下のようになる。 E_{hit} 、 E_{mod} はそれぞれ補正前、補正 後のヒットエネルギーを指し、 E_{true} 、 E_{fit} は真のエネルギーの値とフィッティングにより得られ たエネルギー値を表している。

$$E_{mod} = \frac{E_{true}}{E_{true} - E_{fit}} \times E_{hit} \tag{5.1}$$

Marlin における実際の処理には、ヒットエネルギーを補正する既存のプロセッサー (photonCorrectionProcessor[16])をこのエネルギー分布を補正するのに適した形に改変したもの を用いた。図 5.4 は補正後の PFO エネルギーの角度分布である。落ち込み部分が緩和され、一様 性が改善されている。



図 5.3: ILD_l5_o3_v02 モデルの ECAL における cos θ に対するヒットエネルギーの分布. 右はそ のプロファイルプロットであり、マルチガウシアンによってフィッティングしている. 赤のフィッ ティングが EBU スラブ間のギャップ由来、黒のフィッティングがバレル-エンドキャップ間のギャッ プ由来の落ち込みである.



図 5.4: 補正後の PFO エネルギー分布

5.2.3 真のエネルギー値と PFO エネルギー値の比較

補正後の ECAL のエネルギー測定値の分布が妥当であるかを評価するために、1、5、10、20、 30、50、100 GeV で生成した MC photon に対して ECAL で測定される PFO エネルギーの分布 をバレル ($|\cos \theta| < 0.7$) とエンドキャップ領域 ($0.75 < |\cos \theta| < 0.95$) で分けてヒストグラムに し、そのフィットのピーク値が線形に並ぶかどうかを確かめた。図 5.5 は、バレルとエンドキャッ プ部分それぞれにおけるエネルギー分布とそのフィットである。図 5.6 は真のエネルギー値に対す る PFO エネルギー分布のフィットのピーク値のプロットであり、各 PFO エネルギーのフィット値 はほぼ真のエネルギー値に一致し、線形な振る舞いを示している。したがって、測定されるヒッ トエネルギーは問題なく真のエネルギー値を反映しているといえる。



図 5.5: 10 GeV の PFO エネルギー分布およびそのフィットの一例. 青がバレル ($|\cos \theta| < 0.7$) で 赤がエンドキャップ (0.75 < $|\cos \theta| < 0.95$)のプロットである.



図 5.6: エネルギー真値と PFO エネルギー分布のフィットのピーク値のプロット. 左がバレル $(|\cos \theta| < 0.7)$ で右がエンドキャップ $(0.75 < |\cos \theta| < 0.95)$ のプロットである.

5.3 ジェットイベントを用いたジェットエネルギー分解能の評価

上述のようにヒットエネルギーの落ち込みを補正した後、91、200、360、500 GeV のクォーク ペア(u, d, s)のジェットイベントを各エネルギーにつき1,000イベント程度生成し、ジェットエ ネルギー分解能を先行研究 [9] における結果と比較し、評価した。図 5.7 および図 5.8 は本研究に よって得られたジェットエネルギー分解能および先行研究におけるジェットエネルギー分解能の結 果である。横軸はジェット1つ分のエネルギー値(45.5、100、180、250 GeV)とした。先行研 究の結果のプロットに関して、青丸の凡例を用いている"45×5w/SSA"が本研究において行った シミュレーションと同等の条件となっている。したがって、結果の比較はこの凡例のプロットに ついて行った。また、分解能の評価にはRMS90という手法を用いている。RMS90は、外れ値の 10%を除いた 90%のイベントの RMS 値を用いる手法である。ジェットエネルギー分解能は全エネ ルギー領域を通して 3-3.6%程度となり、先行研究の結果と概ね一致した。しかし、45.5 GeV に おける分解能は先行研究の結果に比べて 0.2%程良く、それ以外のジェットエネルギーにおける分 解能は先行研究の結果と比べ0.2%程度悪い。この違いの要因としては、使用している iLCSoft の バージョンおよび ECAL ジオメトリの違いや、ジェットイベントの統計量の不足などが考えられ る。このような先行研究との細かな違いはあるものの、大きく異なる結果とはならなかったため、 この ILD モデルのシミュレーションによって得られるジェットエネルギー分解能の値は妥当であ ると言える。



図 5.7: 各エネルギーにおけるジェットエネルギー分解能(%)



図 5.8: 先行研究 [9] における各エネルギーにおけるジェットエネルギー分解能. SSA がある場合と ない場合の 45 mm × 5 mm ストリップ、および 5 mm 角、15 mm 角のセルを用いた ScECAL に ついての結果である.

今回行った補正は 10 GeV の MC photon を用いたエネルギー分布から得たフィットパラメータ のみで行なっているが、エネルギーの落ち込みは検出粒子のエネルギー値に依存すると考えられ る。今後は各ピークのエネルギー依存性を調べ、より精度の高い補正プログラムを作成する予定で ある。また、今回は ECAL を真横から見た場合に確認されるモジュール間のギャップのみに関す る補正を行なったが、これ以外にもビーム軸前方から見た場合などでもギャップが存在するため、 今後はそのような別方向のギャップの補正も行う。

本章冒頭で述べた通り、今回のシミュレーションにはシンチレータストリップの光量の位置依 存性が取り入れられておらず、ストリップ上のヒット位置にかかわらず光量は一定となるように 設定されている。今後は3章の実測や4章での実測・シミュレーションによって得られた、より現 実に即したストリップの光量応答をこの ILD モデルに組み込んだ上でジェットエネルギー分解能 の評価を行う予定である。また、ダブル SiPM リードアウト方式によって得られる光量応答を想 定した ILD シミュレーションを構築し、その性能評価を行う。具体的には、コインシデンスを用 いたランダムノイズ抑制によってカロリーメータのヒット域値(現在は 0.5 MIP)を下げられる 可能性があり、そのことによってカロリーメータ性能の改善が見込めるかについて研究する。ま た、ゴーストヒットにより悪化する分解能の改善も試みる。

第6章 まとめと今後の展望

まとめ

ILCをはじめとする次世代電子陽電子コライダー用シンチレータ電磁カロリーメータについて、 その性能向上を目指したシンチレータストリップ読み出し方法の研究を行った。実測やシミュレー ションを通したシングル・ダブル SiPM リードアウト方式における光量の位置依存性の測定、SiPM-ストリップ間のミスアラインメントの影響の調査、ILD モデルを用いたシミュレーションに取り 組み、その成果を報告した。

ゴーストヒットの抑制といった側面から ECAL のジェットエネルギー分解能の向上を目指すた めに、新しいストリップ読み出し方法(ダブル SiPM リードアウト方式)の性能評価を行った。従 来のシングル SiPM リードアウト方式よりも大きな光量が得られ、さらに 2 つの読み出し口から 得る信号の時間差、光量差によっておよそ 20 mm の位置分解能でストリップ上のヒットを再構成 できることがわかった。また、2 つの読み出し口から得られる信号に時間差のコインシデンスを課 すことで、ランダムなノイズイベントと低エネルギー領域のイベントを切り分けることができた。

SiPM とストリップの間のミスアラインメントが生む光量の非一様性が、カロリーメータ全体の 性能へ与える影響を調べるため、実際のセットアップに生じうるミスアラインメントを想定した シミュレーションと実測を行った。シミュレーションでは、SiPM の受光面の中心からのずれと光 量の非対称性は比例し、1 mm のずれがある場合では特に非対称性が大きくなることを確認した。 また、ミスアラインメントを付与した実測では dimple 付近の光量の振る舞いに左右非対称性が見 られ、シミュレーションでもそれが確かめられた。一方で、シミュレーションにおいて SiPM 受光 面の直上に見えた光量のピークが実測では確認できなかったことから、実測のセットアップに光 漏れがある可能性が示唆された。

上記2つの効果を取り入れたカロリーメータ性能の評価のため、ILDモデルのシミュレーショ ンを行う。そのためには、使用する ILDモデルに存在する ECAL モジュール間のギャップによる 測定エネルギーの落ち込みを補正した上で、PFA に必要なパラメータの較正をする必要がある。 今回の研究では、光量の位置依存性の実装には至らず、ビーム軸方向の補正およびその状態での ジェットエネルギー分解能の評価のみを行った。得られたジェットエネルギー分解能は3.4%前後 で、先行研究の結果と相違ないことが確かめられた。 以上の研究開発を通して、ECAL 検出層の開発において新たな知見を得ることができ、今後の 更なる研究に活かすことができる。

2021 年 3 月に DESY で行われる ECAL 大型プロトタイプのテストビーム実験によって得られ るより実機に即したデータから、45 mm シングル SiPM リードアウト、90 mm ダブル SiPM リー ドアウト方式の性能評価を行う。ダブル SiPM リードアウト方式については、時間差や光量差を 用い、実機におけるゴーストヒット抑制の可能性を研究する。また、コインシデンスによるラン ダムノイズ抑制によってヒット域値を下げられる可能性があり、それによってカロリーメータ性 能が見込めるかについても研究を行う。

ILD モデルのシミュレーションに関しては、より精度の良い ECAL モジュール間のギャップに 関する補正ができるよう、補正プログラムを改良する。また、実測およびシミュレーションによっ て得られたミスアラインメントがある場合の光量の位置依存性を実装し、ジェットエネルギー分解 能を評価することで現実のセットアップにおいてミスアラインメントがどこまで許容されるかを 研究する。さらに、ダブル SiPM リードアウト方式によって得られる光量応答を組み込めるコー ドを作成し ILD モデルに実装することで、シミュレーションの面からゴーストヒット抑制の可能 性を研究する。

このようにしてテストビーム実験やシミュレーションの側面から ScECAL の検出層の開発を進め、さらなる性能向上に向けた研究を行う。

謝辞

本研究を進めるにあたり、お世話になりましたすべての方々に感謝申し上げます。指導教員の大 谷航准教授には、ご多忙の中諸学会やミーティングでの発表に関するご助言を多くいただき、ま た研究の方針に関して親身に相談に乗っていただき大変お世話になりました。森俊則教授には修 士1年次のゼミや講義等で多くの学びの機会を与えていただきました。

ILC研究グループの劉霊輝さん、辻直希さんには、実験に使用する様々な機器の使い方や実験 データ解析で必要となる知識を基礎的な部分から教えていただいたほか、諸学会の際に多くのア ドバイスをいただき非常にお世話になりました。この場を借りて感謝を申し上げます。

大谷研・森研の院生の方々、ICEPP の皆様にはミーティングでのためになるご指摘のほか、研 究室内での何気ない雑談など、普段の生活でも仲良くしていただき、2 年間を大変楽しく過ごすこ とができました。また、スイス渡航・PSI 滞在の際の手続きやスイスでの生活に関する多くのご助 言をいただきました。心より感謝申し上げます。

KEKの Daniel Jeans 氏には、シミュレーションに関するノウハウを非常に丁寧に教えていただ き、本研究を全面的にサポートしていただきました。CALICE-Asiaのメンバーの皆様には、本研 究のテーマである ScECAL に関して多くの知識を得る機会を与えていただき、学会の発表に関し ても多くのご助言をいただき、本当にありがとうございました。

最後に、私の学生生活を常に支えてくれた両親に感謝します。

参考文献

- [1] THE INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER Technical Design Report Volume 4. 2013
- [2] Klaus: Pretzl 2005 J. Phys. G: NuclCalorimeters in astro and particle physics To cite this article. Part. Phys. 31 R133
- [3] J. S. Marshal, M. A. Thomson : Pandora Particle Flow Algorithm CHEF2013
- [4] ELGEN Technology https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212
- [5] 浜松ホトニクス社: MPPC(S12571-010, 015C/P) データシート
 http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s12571-010_etc_kapd1044j.pdf
- [6] 浜松ホトニクス社: Physics and operation of the MPPC silicon photomultiplier
- [7] 辻直希:ILCシンチレータ電磁カロリーメータの大型プロトタイプ建設 日本物理学会 2020 年秋季大会
- [8] 3M 社: ESR シリーズ データシート http://www.mmm.co.jp/display/spec/#esr
- [9] K. Kotera : A Novel Strip Energy Splitting Algorithm for the Fine Granular Readout of a Scintillator Strip Electromagnetic Calorimeter
- [10] ILD Concept Group 2010 : The International Large Detector Letter of Intent
- [11] Particle Flow calorimetry and the PandoraPFA algorithm. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 611 (2009) : M. Thomson
- [12] 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)
- [13] 茂木駿紀:次世代電子・陽電子コライダー実験のための PPD を用いた細分型電磁カロリー メータの研究 - 修士論文 (2020)
- [14] Vesna Cuplov, Irene Buvat, Frederic Pain, and Sebastien Jan : Extension of the GATE Monte-Carlo simulation package to model bioluminescence and fluorescence imaging. Journal of biomedical optics 19 (2014), p. 26004.

- [15] 劉霊輝:ILC 測定器用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)
- [16] D. Jeans : ILD analysis/SW meeting 13 Nov 2019 https://agenda.linearcollider.org/event/8341/contributions/44819/attachments/35131/54401/ anas_2019_11_13_photonEns.pdf
- [17] K. Kotera, M. Anduze, V. Boudry, Jean-Claude Brient, D. Jeans, K. Kawagoe, A. Miyamoto, P. Mora de Freitas, G. Musat, H. Ono, T. Takeshita, S. Uozumi : Status of Simulation Tools for the ILD ScECAL https://arxiv.org/pdf/1006.3623.pdf
- [18] Geant4 a simulation toolkit https://geant4.web.cern.ch
- [19] 家城斉:国際リニアコライダーのためのシンチレーター電磁カロリメーター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)