博士学位論文

細分化されたカロリメータに関する研究

2008年6月

伊藤 さおり

目 次

概要

第1章 ILC

- 第2章 カロリメータ
- 第3章 電磁シャワー位置測定器
- 第4章 電磁カロリメータ
- 第5章 ハドロンカロリメータ
- 第6章 結論・考察

参考文献

謝辞

概要

本論文は、リニアコライダー実験に向けた細分化されたカロリメータの開発研究について述べている。研究内容は、電磁シャワー位置測定器の製作とその性能評価(1)、電磁カロリメータテストモジュールの試作(2)、およびハドロンカロリメータに関するシミュレーション(3)である。 これら3つの研究を結ぶキーワードは細分化である。

電子陽電子リニアコライダー実験では重心系エネルギー500 GeV から1 TeV 領域を実現し、ヒ ッグス粒子やトップクォークの精密測定により標準模型を超える新しい物理を探索することを 目的としている。ヒックス粒子の探索において、Z 粒子のクォーク対への崩壊、つまりジェット を精度よく測定することが不可欠となる。そこでジェットのエネルギー分解能を向上させるため、 Particle Flow Algorithm (PFA) という解析手法が研究され、測定器には細分化された構造が要求 される。ジェット中の中性粒子のエネルギー測定を担うカロリメータの役割は大きく、このよう な未踏エネルギー領域での素粒子反応の精密測定に最適な、細分化されたカロリメータを開発研 究する必要がある。

まず、電磁シャワー位置測定器(1)を製作した。この測定器は、幅1 cm 長さ 20 cm 厚さ1 cm のストリップ型プラスチックシンチレータのアレイ構造を持つ。各ストリップの両端にアバランシェフォトダイオード(APD)を直付けし、常温での信号読み出しを行った。その性能評価をするために2度のビームテストを行った。ドイツ電子シンクロトロン研究所(Deutsches Elektronen Synchrotron: DESY)においては入射運動量 1 - 6 GeV/c の陽電子ビームを用いて位置分解能の評価を行った。この測定器の上流に厚さ 4.3 X₀のプリシャワー測定器を設置し、1 - 6 GeV/c の入射運動量を持つ電磁シャワーを測定した結果、位置分解能は

$$\sigma = \frac{(3.80 \pm 0.02)}{\sqrt{E}} \oplus (0.62 \pm 0.03) \text{ mm}$$

となった。また、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) においては入射運動量 1 - 4 GeV/c の混合 ビーム (π ⁻, e⁻, μ ⁻)を用いて e/ π 識別の評価を行った。その結果、e / π 識別の性能は入射運動 量 4 GeV/c において、

エネルギーカット値が 12 MIP のとき、 $\epsilon_e(12MIP) = 95\%$ $r_{\pi}(12MIP) = 17$ ストリップカット値が 4本のとき、 $\epsilon_e(4) = 95\%$ $r_{\pi}(4) = 12$ となった。

次に、タングステンとプラスチックシンチレータのサンプリング型カロリメータ(2)を製作した。吸収体にタングステン(厚さ3.5 mm)を用いることにより、電磁シャワーのモリエール半径の縮小を図った。また検出体であるプラスチックシンチレータのセグメンテーションには幅1 cm 長さ4.5 cm 厚さ3 mm という、これまでに無い細分化構造を持たせた。約 500 チャンネルのスト

リップ型プラスチックシンチレータ構造を実現するために、メガストリッププレートを製作した。 これは一枚のプラスチックシンチレータプレートに溝を掘り、その溝に反射材を挿入することに より、複数のストリップ構造を製作する手法である。細分化された各ストリップの組み上げおよ び位置合わせにおいて、メガストリップ構造にはメリットがあると予想されたため、今回の試作 に至った。将来の膨大なチャンネル数を実現するための一案になると期待される。各チャンネル の読み出しには、Multi Pixel Photon Counter (MPPC)を用いた。MPPC は、浜松ホトニクス社と 信州大学を含む研究機関が共同開発した、極微弱な光子数を数える光子カウンティング用光半導 体素子である。100 V 以下の低バイアス電圧で動作するため扱いやすく、磁場の影響を受けず、 コンパクトで量産に適した新しい光検出素子である。本実験に用いた MPPC は、受光面1 mm 角、 1600(40×40)ピクセル、パッケージサイズ 3×4×1.3 mm³というコンパクトなものであり、メガ ストリップに組み込んで使用した。この MPPC を用いて、2 種類の読み出し方法を試した。波長 変換ファイバーをプラスチックシンチレータに埋め込んだ wave length shifting fiber(WLSF) 読み出しと、WLSF を使用せず、プラスチックシンチレータに MPPC を直付けする Direct 読み出 しである。この方法は電磁シャワー位置測定器(1)の APD 直付け読み出しの経験を踏襲したもの である。製作した電磁カロリメータの性能評価をするために、DESY において入射運動量1-6 GeV/c の陽電子ビームを用いてビームテストを行うため、ベンチテストと測定器の設計及び製作 を行った。なお、このビームテストは大量の MPPC の性能を実践の場で試す側面も持つ。

また、GEANT4 シミュレーションによるハドロンカロリメータの研究(3)を行った。1×1 cm²と いう細分化されたセルを想定し、アナログ読み出しとデジタル読み出しの比較、検出体にプラス チックシンチレータを使用した場合とガスを使用した場合の比較、さらに吸収体に鉛を使用した 場合と鉄を使用した場合の比較を行い、ハドロンカロリメータ製作に際し最適な読み出しと物質 について考察した。結果は、サチュレーションを起こさない領域(セルサイズ1×1 cm²の場合に は入射運動量 10 GeV/c 程度まで)においては、デジタル読み出しはアナログ読み出しと同等の性 能を期待できることが分かった。また、検出体にプラスチックシンチレータを使用した場合には、 時間カットの導入により中性子に起因するヒットの除去が可能となる。さらに吸収体に鉄を使用 することで、性能を落とすことなく、加工が容易で低価格な測定器を実現できるものと考える。 以上のことから現段階ではアナログ読み出し、鉄とプラスチックシンチレータのサンプリング型 ハドロンカロリメータを提案する。

以上、電磁シャワー位置測定器の製作とその性能評価(1)、電磁カロリメータテストモジュー ルの試作(2)、およびハドロンカロリメータに関するシミュレーション(3)の3つの研究を重ねた ことによる利点は、(1)から(2)への技術的な応用が可能となったこと、測定器の製作、実験、シ ミュレーションの多面から細分化されたカロリメータの研究にアプローチできたこと、が挙げら れる。

第1章

ILC (International Linear Collider)

1-1 ILC 計画

ILC 計画は、重心系エネルギー500 GeV から 1 TeV 領域を実現できる電子陽電子衝突型線形加 速器(リニアコライダー)を建設し、トップクォークの対生成、ヒッグス粒子、超対称性粒子など の発見を通じて、質量起源、力の大統一、宇宙創成の謎を突きとめようとするものである。2004 年、世界の高エネルギー物理研究者、加速器研究者により、超伝導技術に基づいたリニアコライ ダーを国際協力で建設することに合意がなされた[1]。



図 1 エネルギー・積分ルミノシティーに対応する ILC の目指す物理

エネルギー・積分ルミノシティーに対応する ILC の目指す物理を図1に示した。トップクォ ークはこれまでに観測された素粒子の中で最も重く、その生成と崩壊は実験的にまだ十分に研究 されていない。ILC の重心系エネルギー~350 GeV には、まずトップクォーク対生成のしきい値 が存在する。またこれまでの電弱相互作用の精密測定により、ヒッグス粒子が 200 GeV 以下に存 在する可能性は非常に高い。よって ILC の第一段階では、重心系エネルギー~500 GeV が要求さ れる。これは軽いヒッグス粒子の探索とトップクォークの精密測定に対して十分な値である。そ してヒッグス粒子とゲージ粒子・クォーク・レプトンとの相互作用の精密測定が可能となり、質 量生成機構の詳細な研究ができる。

しかし、基本粒子の質量起源と真空構造との関係を明らかにするには、ヒッグスポテンシャルの形の決定、つまりヒッグス粒子の自己相互作用の結合定数を測定する必要がある。また、トップクォークとヒッグス粒子の湯川結合定数の測定も必要となる。これらの測定には、重心系エネルギー1 TeV が要求される。

1-2 加速器

20世紀の素粒子物理は、物質の内部構造が次々と発見されることで発展した。物質はクォー クとレプトンで構成され、それらの間の相互作用はグルーオンや光子などのゲージ粒子により媒 介される、という標準模型が考えられ実験により実証されてきたのである。ここで大きな役割を 果たしてきたのが、加速器技術の発展であった。これまでの電子陽電子衝突型加速器の最高エネ ルギーは欧州原子核研究機構(CERN)のLarge Electron Positron Collider(LEP)が達成した重心 系エネルギー210 GeVであり、陽子反陽子衝突型加速器ではフェルミ国立研究所(FNAL)の Tevatronの重心系エネルギー1.96 TeVである。そして現在 CERN では重心系エネルギー14 TeV の陽子陽子衝突型加速器(LHC)が建設中である。しかし特に電子陽電子衝突型の場合、上記のよ うな円形衝突型加速器では荷電粒子が磁場によって曲げられるため光を放射し(シンクロトロン 放射)ビームのエネルギー損失が起る。この半径を ρ (km)とすると電子の場合、一周あたりのエ ネルギー損失は、8.85×10⁻⁵E(GeV)⁴/ ρ (km) [MeV]となり[1]、増大したエネルギーの4乗でエ ネルギー損失が起る。このようなシンクロトロン放射によるエネルギー損失のため、円形衝突型 加速器のエネルギーは現実的にはLEP で達成された~210 GeV が限界であると認識され、この問 題を回避するために提案されたのがリニアコライダーを採用した ILC である。

6



図 2 ILC 加速器の構成

図2はILCが想定する線形加速器である[1]。粒子源によって作られたビームのエミッタンス を小さくするためのダンピングリング、主リニアック、ビーム収束システムより構成され、重心 系エネルギー500 GeV の場合には全長約30 km の地下トンネル内に設置される。線形加速器に要 求されるのは、まず単位長さあたりの加速性能である。主加速は直線であるため一つの加速管で 一度しか加速できない。加速能力が~35 MV/m の場合、1 TeV に加速するためには~50 km の敷 地全長が必要となる。また、一度きりの衝突確率を向上させるためには、最終収束システムで、 垂直方向に約5.7 nm、水平方向に約640 nm の大きさまでビームを絞る必要がある。これら2つ の扁平なビームが交差すると、電子と陽電子は正面衝突が起り、加速された粒子の全エネルギー が素粒子反応に使われる。この素粒子反応で生成された粒子を衝突点に設置した測定器で観測す ることになる。 次に陽子陽子衝突型加速器LHCに対して線形電子陽電子衝突型加速器ILCにある利点を表1に いくつか挙げる。

LHC	ILC
 陽子は複合粒子であるため、求める素	 重心系エネルギーの全てを求める素粒
粒子反応の素過程は重心系エネルギ	子反応に使うことが可能である。 電子陽電子衝突のクリーンな環境で
ーの一部しか使えない。 高いバックグラウンドにより、解析が	は、測定器の性能を最大限引き出すこ
複雑となり、加えて高い放射能により	とが可能となり、解析も複雑さを伴わ
測定器の技術は難易度を増す。	ない。

表 1 LHC と比較した ILC の利点

LHC の利点は到達エネルギーの高さと、素粒子反応頻度の目安となるルミノシティーの高さに ある。高いエネルギーによりヒッグス粒子を高い質量領域に渡って探索可能であり、高いルミノ シティーにより多数のヒッグス粒子が生成されるので、ヒッグス粒子の特徴をある程度測定する ことが可能である。これに対して ILC は粒子の質量、崩壊幅、分岐比、生成断面積などを LHC に比べて精密に測定することが可能である。よって、LHC と ILC の両方が稼動することが重要と なる。

1-3 測定器

ILC は精密測定に際して、理想的な環境を提供し得る。なぜなら、電子陽電子衝突であるため 反応の初期状態が明解で、終状態も素過程に由来する粒子のみなので、複合粒子であるハドロン の衝突に比べてバックグラウンドが非常に少ないためである。ILC では各イベントをクォーク、 レプトン、ゲージボゾン といった基本粒子のレベルで再構成することが必要となる。これらの 基本粒子の高い効率での同定と4元運動量の精密な測定が求められるため、ILC 測定器には以下 のような性能が要求される。

▶ ハドロン崩壊モードでWボゾンとZボゾンを分離するための 高いジェットエネルギー 分解能:

$$\frac{\sigma(E_{jet})}{E_{jet}} \le \frac{30 \%}{\sqrt{E_{jet}}}$$

▶ ジェットフレーバを高い効率で同定するための優れた衝突パラメータ分解能:

$$\sigma_{\text{I.P.}} \le 5 \oplus \frac{10}{p\beta \sin^2 \theta} \; (\mu m)$$

▶ 荷電粒子の飛跡に対する高い運動量分解能:

$$\frac{\sigma(P_t)}{P_t^2} \le 5 \times 10^{-5} \text{ (GeV/c)}^{-1}$$
 at high momentum limit

▶ ビームラインまで 5 mrad に及ぶ密閉性

これらの性能の実現を目指し、現在、The Silicon Detector (SiD) Concept[2]、The Large Detector Concept (LDC)[3]、The GLD Concept[4]、Fourth Concept (4th) Detector[5] と呼ばれる4つの 測定器コンセプト(図 3)[6]が 存在する。



4つのコンセプトはソレノイド磁場の強さ、用いるカロリメータ およびメイントラッカーの技 術および大きさなどで特徴づけられる。 現時点での主な仕様を表2に示す。

Concept	SiD	LDC	GLD	4th
B-field	5 T	4 T	3 T	3.5 T
EM CAL	Si/W	Si/W	Scinti./W	$PbWO_4$
Hadron CAL	RPC/Fe	Scinti./Fe	Scinti./Pb	W/Cu dual fiber
CAL R _{in}	1.25 m	1.6 m	2.1 m	1.5 m
Main Tracker	Si Strip	TPC	TPC	TPC

表 2 4つの測定器コンセプトの仕様

但し、高抵抗電極版チェンバー(Resistive Plate Chamber: RPC)、プラスチックシンチレータ (Scinti.)、Time Projection Chamber(TPC)である。







図 5 GLD の構成

SiDの構成(図4(a))、LDCの構成(図4(b))、GLDの構成(図5)を示した。日本では主にGLDと呼ばれる測定器コンセプトに関する検討を行っている。本論文の細分化されたカロリメータの研究はGLDのためのものである。

前述のように、ILC 測定器はジェットエネルギー分解能 $\sigma(E_{jet})/E_{jet} \leq 30 \%/\sqrt{E_{jet}}$ の性能を要求 されている。この要求を満たすために研究されている解析手法が Particle Flow Algorithm (PFA) である[7]。これは飛跡検出器の情報を用いて荷電粒子によるエネルギーの寄与を取り除いたう えで、カロリメータで光子と中性ハドロンのエネルギー測定を行い、両者を組み合わせてジェッ トのエネルギーを測定する方法である。GLD の最大の特徴は、PFA において近接する粒子が作る シャワーの分離を容易にするために、カロリメータに大きな内径(表 2 : CAL R_{in})を持たせた点で ある。実際、GLD(最大)の内径とSiD(最小)の内径の位置での(π^{0} →)2 γ の距離を π^{0} の入射運動 量を変えながら PYTHIA[8]でシミュレーションを行うと、内径の大きな GLD の方が 2 γ の距離を 大きく出来ると予測される(図 6)。超小型プラスチックシンチレータを用いることで細分化され た読み出しを実現すれば、さらにシャワーの分離は容易になる。



図 6 GLD(最大)の内径と SiD(最小)の内径の位置での(π→)2yの距離の比較



図 7 GLD の概観

図 7 は現在想定されている GLD の概観である [9]。形状は16×16×16m³、総重量は 20000t に及ぶと考えられている。

GLDは、荷電粒子の飛跡や磁場を測定する測定器と、荷電粒子や中性粒子のエネルギーを測定 する測定器で構成されている。前者に属すのは、測定器の内側から順に、バーテックス検出器、 中央軌跡検出器、ミューオン検出器であり、後者はカロリメータである。なお、カロリメータの 外側には、ソレノイドコイルが置かれ、3 テスラの磁場をかけ、ミューオン検出器が磁場のリタ ーンヨークを兼ねる。バーテックス検出器、中央軌跡検出器、カロリメータは、この磁場中に設 置される。主要な測定器の概要を以下に述べる。 内径 20 mm 外径 50 mm の領域(電子・陽電子の衝突点近傍)には、バーテックス検出器が設置 される。2 重層×3 層の全空乏型高精細素子 CCD で構成され、粒子が通過した位置を衝突点近傍 において測定する。b、cクォーク由来のジェットとu、d、sクォーク由来のジェットを識別 するために B、D 中間子の 2 次、3 次崩壊点の再構成をし、更に b クォークジェットと c クォー クジェットを識別する。要求される性能は、荷電粒子の飛跡に対する衝突パラメータ分解能 $\sigma_{I,P.}$ で、 $\sigma_{I,P.} \leq 5 \oplus 10/p\beta \sin^{\frac{2}{3}} \theta$ (µm)を目標としている。

中央軌跡検出器(TPC)

内径 0.45 m 外径 2 m の領域には、ガス検出器である Time Projection Chamber (TPC) が設置 される。読み出しはマイクロパターンガス検出器 (MPGD) である。これは従来のマルチワイヤー比 例計数管に比べ分解能が良い。ジェット中の荷電粒子の方向と運動量を測定する。荷電粒子が磁 場中を通過する際のローレンツ力による曲率は運動量に反比例する。曲率を高い精度で測定する には高精度な空間分解能が要求される。2×5 mm²程度のパッドサイズの読み出しで 100 μ m以下 の位置分解能を得る。さらにこのパッドのかわりに 100 μ m 角のピクセルを持つシリコン検出器 の使用も考えられている。

カロリメータ

内径 2.1 m 外径 3.5 m の領域には、カロリメータが設置される。カロリメータはサンプリン グ型で、電磁カロリメータ(タングステンとプラスチックシンチレータ)、ハドロンカロリメータ (鉛または鉄とプラスチックシンチレータ)での構成が想定されている。ここで起るカスケードシ ャワーを利用し、粒子のエネルギーを測定する。ジェット中には、中央軌跡検出器では測定され ない中性粒子も多数含まれるため、カロリメータはこれらの粒子のエネルギー測定に大きな役割 を果たす。カロリメータに入射したジェットのエネルギーを入射粒子ごとのエネルギーに再構成 したものをクラスターという。PFA でシャワークラスターを解析する際に細分化された構造が必 要となり、この実現には膨大な小型プラスチックシンチレータとチャンネル読み出しの実現が要 求される。性能の目標は、ジェットエネルギー分解能 $\sigma(E_{iet})/E_{iet} \leq 30 %/ \sqrt{E_{iet}}$ である。

14

第2章

カロリメータ

カスケードシャワーを利用して入射粒子のエネルギーを測定するのがカロリメータである。 カロリメータはニュートリノ以外の既知の粒子のエネルギーを測定することができ、またシャワ ーを起こさないことによりミューオンを識別できる。中性粒子のエネルギー測定が可能であり、 クォークやグルーオンからのジェット現象を測定できる。以下にカスケードシャワーである電磁 シャワーとハドロンシャワーについて述べ、本論文のテーマであるカロリメータについて説明す る。

2-1 電磁シャワー

高エネルギーの電子、陽電子、光子が物質中に入射すると、主に制動放射と電子陽電子対生成 の過程がカスケード状に起こり、電子、陽電子、光子の数が急激に増す。この増殖は各粒子のエ ネルギーが臨界エネルギーE。に達するまで行われる。これが電磁シャワーである。E。は物質に固 有な値であり、電子が電離で失うエネルギーと制動放射で失うエネルギーとがおよそ等しくなる ときのエネルギーであり、Zを原子番号として以下のように近似される[9]。

$$E_{c} = \frac{610 \text{MeV}}{\text{Z} + 1.24}$$

電子が物質中を通るとき、制動放射によりエネルギーを失う。この過程で電子の持つエネル ギーが 1/e に減少する物質層の厚さの平均値を放射長 X₀と呼び、A を質量数とすると

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g cm}^{-2} \text{ A}}{\text{Z}(\text{Z}+1)\ln(287/\sqrt{\text{Z}})}$$

と表わされる[9]。タングステンの場合は $X_0=0.35$ cm、鉛の場合は $X_0=0.56$ cm となる。また実 験データに合うように決めたシャワーのエネルギープロファイルは Γ 関数を用いて、以下のよう に再現できることが経験的に知られている[10]。

$$\frac{dE}{dt} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)}$$
$$t = x/X_0$$

ただし、 $t_{max} = (a - 1)/b = ln (E/E_c) + C_j$) において、b = 0.5 (より正確には物質ごとの値)、 $C_{j=e} = 0.5$ 、 $C_{j=\gamma} = -0.5$ により a は決まる。

このように E> E_eにおいては、制動放射、電子陽電子対生成とも X₀が特徴的な長さを表す。しかし E< E_eではクーロン散乱が無視できない。電磁シャワーの広がりを表すモリエール単位 R_M(90 %のエネルギーが 1R_M以内に含まれる)は、

$$R_{\rm M} = \frac{E_{\rm s}}{E_{\rm c}} \times X_0 \approx \frac{7A}{Z} (g/cm^2)$$

但し、
$$E_s = m_e c^2 \sqrt{4\pi/\alpha} = 21 \text{ MeV}$$

程度となる。ここで E_s は特性エネルギー、 m_e は電子の質量、c は光速度、 α は微細構造定数である。タングステンの場合は $R_M \approx 0.9$ cm、鉛の場合は $R_M \approx 1.6$ cm となる。

2-2 ハドロンシャワー

高エネルギーのハドロンが物質中に入ると原子核と強い相互作用し非弾性多重粒子生成を行い、カスケードシャワーを発生する。ハドロンシャワーは純粋なハドロンシャワー成分と電磁シャワー成分の2種類のシャワーから成る。純粋なハドロンシャワー成分は荷電 π 、K中間子、陽子、中性子、ニュートリノ、µ粒子などから構成される。この過程では原子核破砕(核子の束縛エネルギー)のためにエネルギーのかなりの部分が使われる。また、2次粒子の大部分を占める π 中間子において、その 1/3 を占める π^{0} は π^{0} →2 γ によって電磁シャワー成分となる。測定されないエネルギーの存在と π^{0} 生成の統計的揺らぎが、ハドロンカロリメータのエネルギー分解能を悪化させる。カロリメータにおいて、ハドロン(h)シャワーと電磁(e)シャワーのエネルギー 応答特性の指標となるのが e/h 補償である。吸収体と検出体の厚みを調整することにより、ハドロンシャワーと電磁シャワーに対する応答が揃い、ハドロンシャワーのエネルギー分解能が改善される。

電磁シャワーの発達を規定する特徴的な長さは放射長 Xoであったが、ハドロンシャワーの場合は吸収長 λ₁である。これは粒子が平均1回衝突するのに必要な長さで、以下のように近似される[9]。

$\lambda_{\rm I} = 35 \times A^{1/3} \, {\rm g/cm^2}$

鉛の場合は λ_{I} =17.1 cm、 鉄の場合は λ_{I} =16.8 cm となる。水素や重水素を除けば通常は $\lambda_{I} \gg X_{0}$ であるので、ハドロンシャワーは電磁シャワーより進行方向の長さがはるかに長い。この違いを 利用することで、電磁シャワーとハドロンシャワーの分離が可能となる。

2-3 カロリメータ

カロリメータには全吸収型とサンプリング型がある。

全吸収型は、吸収した入射粒子の全エネルギーを出力信号に変換し測定する。NaI, CsI, BGO な ど、高密度一様で発光量の大きな物質が使われる。電磁シャワーの測定に対して高い分解能を得 られるが、ハドロンシャワーの測定には不向きである。理由は、サンプリング型に比べるとサイ ズが大きく実用的でないことや、これらの物質が高価なためコストが掛かり過ぎることが挙げら れる。

サンプリング型は入射粒子のエネルギーの一部を検出体でサンプリングし測定する。これは全 エネルギーに比例する。吸収体(鉛、鉄など)と検出体(プラスチックシンチレータ、液体アルゴ ン電離箱など)の多層サンドイッチ構造である。吸収体で発生したカスケードシャワーの測定を、 検出体を通過した粒子が落としたエネルギーにより行う。吸収体に鉛や鉄などの重い金属を使用 するのは、短い長さでシャワーの発達を促進し、カロリメータをコンパクトにするためである。 サンプリング型の分解能は全吸収型には及ばないが、サイズやコストの点において優位である。

第3章

電磁シャワー位置測定器

本章では電磁シャワー位置測定器について述べる。電磁シャワー位置測定器は、電磁カロリ メータ中で電子や光子の精密な位置測定、および電子・光子とハドロンの識別(e / π 識別)を行 う。カロリメータに入射したジェット中のシャワークラスターと粒子の飛跡を対応付け、クラス ターの由来する粒子を識別する際に、シャワークラスターの位置を正確に測定する役割を担う。



図 8 衝突点に最も近いカロリメータの位置(210 cm)での($\pi^0 \rightarrow$)2 γ の距離

図8はe⁺e⁻の衝突点に最も近いカロリメータの位置(210 cm : GLD)での(π⁰→)2γの距離をπ⁰ の入射運動量を変えながらPYTHIAでシミュレーションした結果である。50 GeV/cのπ⁰の場合、 2γの距離は1.8 cm程度と予測される。そこで幅1 cmのストリップ型プラスチックシンチレー タのアレイ構造を持つ電磁シャワー位置測定器を製作し、電磁シャワーの奥行きに対し、そのエ ネルギーの最大となる位置(シャワーマックス)付近に設置し位置測定を試みた。また、カロリメ ータは3Tの磁場中に設置されるため、読み出しには磁場中で使用可能でコンパクトな光センサ ーであるアバランシェフォトダイオード(APD)を採用した。プラスチックシンチレータの読み出 しには通常波長変換ファイバーを使用するが、本測定器ではファイバーを使用せずストリップ型 プラスチックシンチレータの両端にAPDを直付けし、読み出しを行った。本測定器の性能を評価 するため Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY) と高エネルギー加速器機構(KEK)において 2 度のビームテストを行った。DESY でのビームテストでは入射運動量 1 - 6 GeV/c の陽電子ビー ムを利用して位置分解能の評価を行い、KEK でのビームテストでは入射運動量 1 - 4 GeV/c の混 合ビーム(π^- , e^- , μ^-)を利用して、位置分解能に加え、 e/π 識別の評価を行った。本章では電磁 シャワー位置測定器の構造と 2 度のビームテストによる性能評価について述べる。

3-1 電磁シャワー位置測定器の構造



図 9 電磁シャワー位置測定器の構造

電磁シャワー位置測定器は図9のように水平方向に並んだ20本のストリップ型プラスチック シンチレータ(Kuraray SCSF-38)[11]で構成されている。この1レイヤーのストリップのうち、 中心部分14本のストリップを読み出している。各ストリップ(1×20×1 cm³)は厚さ30 μ m の反 射材(3M Radiant Mirror Film VM2002)[12]で覆い、光学的にストリップ間を分離した。シンチ レーション光の読み出しには APD (HAMAMATSU S8664-55)[13]を使用した。APD は内部増幅機能を 持つ pn 接合半導体受光素子である。APD に逆バイアス電圧をかけると、pn 接合部に空乏層が広 がる。表面 p 層、基板 n 層および底面 n+層の厚さや不純物濃度の調整により、分光感度や周波 数特性等の性能が制御されている。APD に入射した光子のエネルギーがシリコンのバンドギャッ プエネルギーより大きいと、価電子帯の電子は伝導帯へ励起され、もとの価電子帯に正孔を残す。 この電子-正孔対はp層、空乏層、n層の至るところで生成され、空乏層中では電場により電子 はn層へ、正孔はp層へドリフトする。ドリフトした電子はpn 接合部付近のアバランシェ領域 と呼ばれる高電場領域においてシリコン原子と電離衝突を起こし、2次、3次・・・の電子-正 孔対を生成する。このような過程が繰り返し起ることにより、信号が増幅される。今回使用した APD は波長 420 nm の光に対して 70 %の量子効率を持ち、受光面積は5 × 5 mm²で、これはスト リップ型プラスチックシンチレータの断面の 1/4 をカバーする。ゲイン 100 程度(逆バイアス電 圧 400 V 付近)において常温でオペレーションした。各 APD はストリップ型プラスチックシンチ レータの両端に直付けした。その際接着剤等は使用せず、固定したソケットを用いて両側から APD をサポートした。APD を装着したこのプラスチックシンチレータのレイヤー全体は遮光シー トで覆い、外部からの光を遮断した。APD からの信号読み出しには、ゲイン 1.8 V / pC のプリ アンプ(DP-1887)[14]と CAMAC ピークホールド ADC (HOSHIN C008)を使用した。



図 10 電磁シャワー位置測定器の写真

図 10 は電磁シャワー位置測定器の写真である。APD とプラスチックシンチレータのレイヤー は外部からの光を遮断するためにブラックシートで覆われている。両側の水色部が APD をサポー トするためのソケットを示し、赤いケーブルで逆バイアス電圧が各 APD に供給される。緑のボー ド上(写真では裏側)にアンプが載っている。 ここで、測定器に使用した APD の性能のばらつきを見るため(サンプル数 16)、光量測定のベ ンチテストを行った。セットアップは図 11 に示した。暗箱中に LED と APD を設置し、パルスジ ェネレータ(P.G.)により LED 光と ADC ゲートを同期させた。またペデスタルにはクロックジェネ レータ(C.G.)を使用した。APD の信号読み出しは、前述の通りプリアンプ(DP-1887)と CAMAC ピ ークホールド ADC (HOSHIN COO8)を使用した。



図 11 LED を用いた APD 光量測定のセットアップ



図 12 典型的な ADC 分布

図 12(a)(b)(c)(d)は逆バイアス電圧を変化させたときのあるサンプルの ADC 分布である。ADC 100 counts 付近はクロックジェネレータによるペデスタルである。APD 信号による分布をガウシ アン関数でフィットしたときの平均値からペデスタル値を引いた値を規格化し、各サンプルの光 量測定の結果を図 13 にまとめた。



図 13 光量測定の結果(各シンボルはサンプルの違いを示す)

横軸は逆バイアス電圧となっている。(V_{bias} は負である。)但し、各 APD に対し、ゲイン 50 (420 nm, 25℃)に相当する逆バイアス電圧($V_{reference}$)を横軸 0 に揃えた。横軸 0 の点でのサンプルによる測定値のばらつき(図 14)は1 %程度となった。



3-2 DESY ビームテスト

3-2-1 ビームラインの構成

DESY testbeam 21 において 2003 年 9 月にビームテストを行った。このビームテストの目的は、 入射運動量 1 - 6 GeV/c の陽電子ビームを用い、電磁シャワーの位置測定を行い性能を評価する ことである。図 15 はビームラインの構成を示している。各トリガーカウンターはT1(3×3×1 cm³) T2(5×5×1 cm³)のプラスチックシンチレータで、トラッキングは4つのシングルワイヤードリ フトチェンバーDC(7.2×7.2 cm²)で行った。



~ 2.3 m

図 15 DESY ビームラインの構成

電磁シャワー位置測定器の上流4mmの位置にはプリシャワー測定器(PSD)を設置した。プリシ ャワー測定器は鉛とプラスチックシンチレータで構成され、鉛の厚さと位置に関して可変可能な 構造になっている。図16(a)(c)(d)のように鉛をまとめて設置することも可能であるし、図16(b) のようなサンプリング型に設置することも可能である。断面積は20×20 cm²で厚さ1 cmのプラ スチックシンチレータは2 レイヤーである。鉛の位置や厚さを変化させ電磁シャワーを測定した。



図 16 プリシャワー測定器中の鉛の設置位置の組み合わせ

3-2-2 キャリブレーション

電磁シャワー位置測定器の上流にあるプリシャワー測定器内から鉛を抜き出し、入射運動量3 GeV/c 陽電子ビームを用いて、各ストリップの中心にビームを当て、キャリブレーションを行っ た。なおビームサイズは3×3 cm²で、キャリブレーションにDCは使っていない。図17は典型 的な MIP イベントの ADC 分布である。ランダウ関数:

$$f(x)=p_1\exp\left(-\frac{r+e^{-r}}{2}\right),\qquad r=\frac{x-p_2}{p_3}$$

を用いたフィットにより各 APD が 0.5 MIP(両端の和が 1 MIP = 50 ADC counts)になるように、 キャリブレーションを行った。なお、0 付近がペデスタルである。



図 17 APD の MIP イベントに対する典型的な ADC 分布



図 18 トリガーカウンターによるイベントセレクション

イベントセレクションに使用したトリガーカウンターT1、T2のADC分布を図18に示した。ただし各カウンターは両側(L, R)から読み出した。

260 < T1(L) < 370、270 < T1(R) < 380 、220 < T2(L) < 300、230 < T2(R) < 320 の範囲でイベントセレクションを行った。

3-2-3 位置分解能

電磁シャワー位置測定器で測定した位置情報と4つのドリフトチェンバーを用いたトラッキ ング情報との比較により位置分解能を測定した。これらドリフトチェンバーの分解能は180 μm 程度であり、電磁シャワー位置測定器(SMD)を設置した位置での分解能は0.4mm程度となる。電 磁シャワー位置測定器で電磁シャワーの位置を算出するために、エネルギーの重み付き重心法を 利用し、

Position of EM shower =
$$\frac{\sum_{i} y_{i} \times E_{i}}{\sum_{i} E_{i}}$$

とした。但し、E_iは各ストリップに落ちたエネルギー、y_iは各ストリップの位置を示しており、 最も多くのエネルギーの落ちたストリップを中心に5本のストリップを選んだ。

図 19 は電磁シャワー位置測定器で測定したシャワーマックスの位置での典型的な電子イベントを示す。電子の入射位置付近を中心に電磁シャワーの横方向の広がりが測定された。図 19 (a) (c) はそれぞれ、図 16 (a) (0, 0, 24) (c) (24, 0, 0)の鉛の設置場所に対応している。



図 19 シャワーマックスにおける電磁シャワー位置測定器での電磁シャワーの横方向の広がりの比較



図 20 運動量6 GeV/c 陽電子ビームを入射した際の位置分解能の解析プロット

プリシャワー測定器の設定が図 16(a)(0,0,24)のとき、運動量 6 GeV/c 陽電子ビームを入射し た際の位置分解能の解析プロットを図 20 に示す。図 20(a)は電磁シャワー位置測定器で求めた 電磁シャワーの位置であり、1 cm 幅のストリップ構造が現われている。分布が左右非対称なの は、ビームラインからの測定器のずれのためである。図 20(b)はドリフトチェンバーのトラッ キング情報を、電磁シャワー位置測定器を設置した位置に外挿した入射陽電子の位置、図 20(c) は図 20(a)と図 20(b)の相関であり、階段状のうねりが見られる。このうねりも、電磁シャワー 位置測定器が 1 cm 幅のストリップ構造を持つことに起因する。今回の解析ではこのうねりの補 正は行わなかった。詳しい議論は[15]にある。図 20(d)は図 20(a)と図 20(b)の差の分布である。 図 20(d)の分布をガウシアン関数でフィットしたときのσ値が各入射運動量での位置分解能を示 す。



図 21 プリシャワー測定器の組み合わせによる位置分解能

このように入射運動量1-6 GeV/c において位置分解能を測定した結果が図21 である。図21 (a) (b) (c) (d) はそれぞれ、図16(a) (b) (c) (d) の鉛の設置場所に対応している。図21 より位置分 解能 σは以下のようなエネルギーの関数で与えられる。ただし誤差は統計誤差による。

(a)(0,0,24): $\sigma = \frac{(3.80 \pm 0.02)}{\sqrt{E}} \oplus (0.62 \pm 0.03) \text{ mm}$

(b)(8,8,8) :
$$\sigma = \frac{(4.46 \pm 0.01)}{\sqrt{E}} \oplus (0.00 \pm 0.10) \text{ mm}$$

(c)(24,0,0):
$$\sigma = \frac{(8.12 \pm 0.02)}{\sqrt{E}} \oplus (0.00 \pm 0.07) \text{ mm}$$

(d)(0,0,16):
$$\sigma = \frac{(4.11 \pm 0.01)}{\sqrt{E}} \oplus (0.00 \pm 14.1) \text{ mm}$$

鉛の厚さの合計が24 mmになる設定は(a)(0,0,24)(b)(8,8,8)(c)(24,0,0)の3タイプである。 これらの結果を比較すると鉛と測定器の距離が短くなるにつれ、位置分解能は向上する。さらに (a)(0,0,24)と(d)(0,0,16)を比較すると位置分解能の違いは小さい。以上のことから位置分解能 を上げるためには、レイヤー間の隙間を極力縮小することが重要となる。

3-3 KEK ビームテスト

3-3-1 ビームラインの構成

KEK $\pi 2$ ビームラインにおいて 2004 年 3 月にビームテストを行った。このビームテストの目的は、入射運動量 1 - 4 GeV/c の混合ビーム(π^- , e^- , μ^-)を用い、電磁シャワーの位置測定、さらに e / π 識別を行い性能評価することである。この混合ビームの 9 割程度は π^- である[16]。 図 22 はビームラインの構成を示している。トリガーカウンターは T1(3×3×1 cm³)、T2(5×5×0.5 cm³)、T3(12×12×0.5 cm³)を設置し、e⁻の選択のためにはガスチェレンコフカウンターC1、C2(20 cm ϕ × 84 cm)、またトラッキングは4 つのシングルワイヤードリフトチェンバーDC(7.2 × 7.2 cm²)で行った。



図 22 KEK ビームラインの構成

電磁シャワー位置測定器の上流3 cm の位置にはプリシャワー測定器(PSD)を設置した。KEK ビ ームテストでのプリシャワー測定器は鉛4 mm とプラスチックシンチレータ1 mm を1レイヤーと して、6 レイヤーで構成されたサンプリング型で、DESY ビームテストで使用した可変式のものと は異なる。6 レイヤーの合計は4.3 X₀、断面積は20×20 cm²である。シンチレーション光は波長 変換プレートを通して光電子増倍管で読み出されている。なお、タイルファイバー電磁カロリメ ータ[17]またはストリップファイバー電磁カロリメータ[15]が電磁シャワー位置測定器の下流 に設置されていた(図22 EMCAL)。

本ビームテストでは混合ビーム(π⁻, e⁻, μ⁻)を用いたため、(T1&T2):inclusive トリガー、(T1&T2&C1&C2):e⁻トリガーを使用し実験を行った。

3-3-2 キャリブレーション

入射運動量4 GeV/c 混合ビーム(π^- , e⁻, μ^-)中で inclusive トリガーを用い、各ストリップの 中心にビームを当て、キャリブレーションを行った。図 23 は典型的な MIP イベントの ADC 分布 である。ガウシアン関数を用いて±2 シグマの範囲でフィットを行い、各 APD が 0.5 MIP (両端の 和が 1 MIP)になるように、キャリブレーションを行った。但し、KEK ビーテストではノイズによ る影響が大きく、DESY ビームテストの時のような整ったランダウ分布を得ることができなかっ たため、ガウシアン関数を用いてフィットを行った。



図 23 APD の MIP イベントに対する典型的な ADC 分布

ここで、 e^{-} サンプル、 π^{-} サンプルのイベントセレクションに用いた T1、T2、C1、C2、T3 の各 ADC 分布を図 24、25 に示した。なお T1、T2 は両読みのため T1 (L, R)、T2 (L, R)の分布を載せ、各 カウンターのカット値を表 3 にまとめた。

eサンプル	200 < T1(L) < 400	200 < T1(R) < 400	145 < T2(L) < 330	230 < T2(R) < 450
	300 < C1	300 < C2		
πサンプル	200 < T1(L) < 400	200 < T1(R) < 400	145 < T2(L) < 330	230 < T2(R) < 450
	250 < T3 < 500			



表 3 イベントセレクションのカット値

図 24 トリガーカウンターT1、T2の ADC 分布



図 25 チェレンコフカウンターC1、C2、トリガーカウンターT3のADC分布

ここで、入射運動量 4 GeV/c の e⁻サンプル中で π ⁻の contamination を見積もる。なお e⁻サン プル中で π ⁻のイベント数を計測するために図 25(c)に示した T3 カウンターを用いて、e⁻サンプ ル中でシャワーを起こしていないイベントを数えた。図 26 はプリシャワー測定器の ADC 分布を 示しており、図 26 (a)は e⁻サンプルでイベント数は 1317、さらに図 26 (b)は e⁻サンプルに含 まれる π ⁻でイベント数は 6 となるため、contamination は 0.5 %以下である。



図 26 プリシャワー測定器の ADC 分布

3-3-3 位置分解能

3-2-3節で述べた DESY ビームテストと同様の解析方法を用いて位置分解能の解析を行った。 図 27 は e⁻サンプルを入射した際の位置分解能の解析プロットで、図 27 (a) (b)の入射運動量は 4 GeV/c である。図 27 (a) は電磁シャワー位置測定器で求めた電磁シャワーの位置と、ドリフトチ エンバーのトラッキング情報を電磁シャワー位置測定器の設置位置に外挿した位置との相関、図 27 (b) は両者の差の分布であり、この分布をガウシアン関数でフィットしたときのofが各入射運 動量での位置分解能を示している。図 27 (c) は1 - 4 GeV/c までの各運動量を持つビームが入 射したときの位置分解能を測定した結果である。位置分解能ot以下のようなエネルギーの関数 で与えられる。ただし誤差は統計誤差による。

$$\sigma = \frac{(7.35 \pm 0.10)}{\sqrt{E}} \oplus (0.00 \pm 0.43) \text{ mm}$$

プリシャワー測定器との距離を考慮に入れると、図 21(c)の結果とほぼ同等であることから、 DESY ビームテストの測定は KEK ビームテストでも再現された。



図 27 e⁻サンプルを入射した際の位置分解能の解析プロット

電磁シャワー位置測定器の e / π 識別の性能を評価することは、混合ビーム(π^- , e^- , μ^-)を使用できる KEK ビームテストでの主目的である。ここでは e^- サンプルと π^- サンプルを用いて、ヒットしたストリップの本数を指標にした場合と、測定エネルギーを指標にした場合の2通りの方法で e / π 識別の性能を評価する。

入射運動量1 - 4 GeV/c の e⁻サンプルと π⁻サンプルについて、ヒットしたストリップの本数 の分布を示したものが図 28 で、測定したエネルギーの分布を示したのが図 29 である。なお、ノ イズを除去するため 0.4 MIP 以上のエネルギーデポジットがあったストリップを「ヒットしたス トリップ」と定義した。



図 28 入射運動量 1-4 GeV/c の e⁻サンプルと π ⁻サンプルについて、ヒットしたストリップの本数の分布 を示した図



図 29 入射運動量 1-4 GeV/c の e サンプルと π サンプルについて、 測定したエネルギーの分布を示した

ここで、electron efficiency(ϵ_e)と pion rejection factor(r_{π})を定義する。電磁シャワー位 置測定器のヒットしたストリップの本数の情報を使用した場合には、

$$\epsilon_{e}(N_{str}) = \frac{N_{e}^{sel(\geq N_{str})}}{N_{e}^{tot}}$$
$$r_{\pi}(N_{str}) = \frac{1}{\epsilon_{\pi}(N_{str})} = \frac{N_{\pi}^{tot}}{N_{\pi}^{sel(\geq N_{str})}}$$

と定義する。但し、N^{tot}_{e/π} は各サンプルの全イベント数、N^{sel(≥Nstr)} は本数の単位(N_{str})による カット値以上のヒットストリップを持つイベント数を示している。図 30 はヒットしたストリッ プの本数(カット値)に対する efficiency をプロットした。この結果、カット値が4本の場合、 入射運動量4 GeV/c において $\epsilon_e(4) = 95\%$ r_π(4) = 12となった。



図 30 ヒットしたストリップの本数に対する efficiency



図 31 測定エネルギーの閾値(MIP 単位)に対する efficiency

同様に電磁シャワー位置測定器で測定したエネルギー情報を使用した場合の electron efficiency(ϵ_e)と pion rejection factor(r_{π})を定義する。

$$\varepsilon_{e}(E) = \frac{N_{e}^{sel(\geq E)}}{N_{e}^{tot}}$$

$$r_{\pi}(E) = \frac{1}{\epsilon_{\pi}(E)} = \frac{N_{\pi}^{tot}}{N_{\pi}^{sel(\geq E)}}$$

但し、N^{sel($\geq E$)} はエネルギー単位(E)のカット値以上のエネルギーが落ちたイベント数を示す。 図 31 は測定エネルギーのカット値(MIP 単位)に対する efficiency をプロットした。この結果カット値が 12MIP の場合、入射運動量 4 GeV/c において ϵ_e (12MIP) = 95% r_π(12MIP) = 17となった。

3-3-5 ストリップ方向の解析



図 32 ストリップの長さ方向の位置依存性

解析において、各ストリップ型プラスチックシンチレータの測定は、前述の通り両端に直付け された APD で読み出された光量の和を取った。1本のストリップの両端の和を取る読み出し結果 について示す。図 32 はストリップの長さ方向の位置依存性を示しており、図 32 (a) (b) は MIP イベントを用い、図 32 (c) は入射運動量 2 GeV/c の 電磁シャワーのシャワーマックス付近(4.3 X₀)での測定である。但し、図 32 (c)の左端が下がっているのは、測定器セッティングのずれに より十分なシャワーが当たらなかったためである。両端の和を取った場合、MIP に対しては 14% 程度の位置依存の違いが見られるが、電磁シャワーに対しては 8 %程度となり、位置依存による 影響は小さくなる。MIP と電磁シャワーを入射し、幅 1 cm 長さ 20 cm 厚さ 1 cm のストリップ型 プラスチックシンチレータ中でのシンチレーション光の振る舞いをシュミレーションすること で、この影響の詳細な違いが明らかになる可能性もあるため、今後の課題としたい。ただし DESY 実験、KEK 実験で本測定器の性能評価(位置分解能、e / π 識別)を行う際には、測定器の中心に ビームを入射しているため、ストリップの長さ方向の位置依存による影響はさらに小さい。

第4章

電磁カロリメータ

本章ではMulti-pixel Photon Counter(MPPC)読み出しの電磁カロリメータプロトタイプの設 計、製作及びベンチテストについて述べる。なおこの測定器はDESY でのビームテストを想定し て設計・製作したものである。

4-1 電磁カロリメータの構造



図 33 電磁カロリメータのデザイン

新しい電磁カロリメータの製作に向け、図 33 のようなタングステン(3.5 mm)とプラスチック シンチレータ(3 mm)のサンプリング型カロリメータをデザインした。吸収体にタングステンを用 いることにより、電磁シャワーのモリエール半径は縮小され、鉛の場合と比べると 56%となる。 これにより、クラスターのオーバーラップの減少が期待される。また検出体であるプラスチック シンチレータのセグメンテーションには幅 1 cm 長さ 4.5 cm という、これまでに無い細分化構造 を持たせた。1-3 節で述べたように、ジェットのエネルギー分解能を向上させる解析手法である PFA を意識したためである。

プラスチックシンチレータの読み出しには、MPPC を用いた。MPPC は、極微弱な光の粒を数え る光子カウンティング用光半導体素子である。MPPC の各ピクセルはガイガーモード APD で構成 され、各 APD ピクセルは光子を検出するとパルス信号を出力する。さらに全 APD ピクセルの出力 の総和が MPPC の出力信号となる。100 V 以下の低バイアス電圧で動作するため扱い易い。また 磁場の影響を受けず、APD よりもさらにコンパクトなパッケージで製造可能かつ低価格なため、 量産に適した新しい光検出素子である。浜松ホトニクス社と信州大学を含む研究機関が共同開発 を行った。本実験に用いた MPPC (spec 表[18])は、受光面 1mm 角、1600 ピクセル、パッケージサ イズ 3×4×1.3 mm³というコンパクトなものであり、各プラスチックシンチレータに組み込んで 使用した (図 34)。なおこのサイズのパッケージに 1600 ピクセルの MPPC を納めることが可能に なったため、測定器のプラスチックシンチレータの厚さ 3 mm が実現した。



図 34 MPPC の写真と MPPC のプラスチックシンチレータへの組み込み図

4-2 MPPC 読み出しによる光量測定の比較

4-2-1 波長変換ファイバー読み出しと直付け読み出しの比較

MPPCを用いて1チャンネル相当のサイズ(1×4.5×0.3 cm³)のストリップ型プラスチックシン チレータを読み出すベンチテストを行った。読み出し方法は図 35 の 2 通りを試みた。ストリッ プ型プラスチックシンチレータの中心に1 mm 径の波長変換ファイバー(Kuraray Y-11 multi cladding)[11]を挿入し MPPC で読み出す方法と、MPPC をストリップ型プラスチックシンチレー タに直付けする方法である。後者は電磁シャワー位置測定器の APD 直付け読み出しの経験を踏襲 したものである。直付け読み出しの性能が波長変換ファイバー読み出しの性能と同等であれば、 よりシンプルな形状の測定器を製作できることになる。また、MPPC 直付け読み出しは直観的興 味により採用したものであったが、後日 MPPC の青色光感度が高いことも分かったので、今後は 直付け読み出しの積極的利用と研究が発案時以上に期待される。



図 35 ベンチテストのセットアップ

MPPC からの信号は AMP (HAMAMATSU C5594-44) [19]を通し CAMAC ADC (LeCroy2249W) で読み出し た。各ストリップ型プラスチックシンチレータは反射材 (3M Radiant Mirror Film) で覆い、中心 付近コリメータ上にβ線源を置き、両者の光量を測定し比較した。なお、トリガープラスチック シンチレータの信号はマルチアノード光電子増倍管 (MAPMT: HAMAMATSU H6568) で読み出し、ディ スクリミネータ (DISCR. : Hoshin23) とゲートジェネレータ (G.G. : Kaizu1500) を経て ADC ゲートと した。 上記ベンチテストで測定した ADC 分布を図 36 に示す。測定環境は 25 °C (恒温槽使用)、0ver Voltage (V_{over}) = V_{bias} - V_0 = 2.1 (V) であった。但し V_{bias} は MPPC に印加した逆バイアス電圧、 V_0 はブレイクダウン電圧(ガイガーモードが起き始める電圧) である。図 36(a) は波長変換ファ イバー読み出し(緑) と直付け読み出し(黒)の ADC 分布を示す。平均値を比較すると、直付け読 み出しは波長変換ファイバー読み出しの 60 %程度の光量を得たので、ビームテスト用プロトタ イプでは波長変換読み出しに加え直付け読み出しのレイヤーも製作することにした。ここで測 定された光量を光電子数(p. e.) で示すために、同条件(25 °C V_{over} = 2.1 (V)) で微弱な LED 光 を当て、ADC 分布を取った(図 36(b))。この測定に使用した MPPC は 25 °C V_{over} = 2.1 (V) のと き 1 p. e. ~12 ADC counts となった。よって測定された光量は、波長変換ファイバー読み出し では 21 p. e. 直付け読み出しでは 13 p. e. に相当する。



図 36 波長変換ファイバー読み出しと直付け読み出しによる光量測定の ADC 分布

4-2-2 反射材の種類による比較と波長変換ファイバー径による比較

4-2-1節で述べたものと同様のセットアップで以下の測定を行った。

(1)読み出し方法の違い(波長変換ファイバー読み出しと直付け読み出し)による光量の比較
 (2)反射材の種類(3M Radiant Mirror フィルムと PET フィルム)による光量の比較
 (3)波長変換ファイバー径の太さ(1 mm と 0.7 mm)の違いによる光量の比較

図 37 に光量測定の結果をまとめた。横軸は Over voltage(V_{over})を示す。縦軸は測定された光量

を示す。光電子数(p.e.)の単位で示すために、図 36(b) と同様に各 V_{over}ごとに 1 p.e. に相当す る ADC count を測定し、結果を表 4 にまとめた。

	unit				
V _{over}	V	1.76	2.76	3.76	4.76
1 p.e.	ADC counts	10.61	16.53	21.61	28.02

表 4 1 p.e. に相当する ADC count

(1)は緑と赤の比較により、4-2-1節と同様、直付け読み出しは波長変換ファイバー読み出しの 60%程度の光量となった。(2)は緑と青または赤とピンクの比較により、PET フィルムは 3M Radiant Mirror フィルムの 50%程度の光量となった。(3)は緑と黒の比較により、波長変換ファ イバー径 0.7 mm は 1 mm の 70%程度の光量となった。以上によりビームテスト用プロトタイプ の反射材には 3M Radiant Mirror フィルムを使用し、波長変換ファイバー読み出し用のファイバ ー径は 1 mm を使用することとした。



図 37 読み出し方法、反射材の種類、波長変換ファイバー径の太さの違いによる光量の比較

反射材の厚さによる光量の比較を行うため、3 種類の厚さの異なる PET フィルム(100、75、38 μm)を用いて、波長変換ファイバー読み出しで測定した。図 38 に光量測定の結果を示す。フィ ルムの厚さが 75%に減少すると光量は 90 %程度となり、フィルムの厚さが 38 %に減少すると光 量は 70 %程度となる。4-3-1 節で詳しく述べるが、メガストリッププレートのストリップ間にお ける光学的分離を計るための溝に反射材(PET フィルム)を挿入する。このベンチテストの結果を 踏まえて、さらに厚い 125 μmの PET フィルムをビームテスト用プロトタイプの溝に使用するこ ととした。



図 38 反射材の厚さの違いによる光量の比較

4-3 メガストリッププレート

プラスチックシンチレータのセグメンテーションには幅1 cm 長さ4.5 cm 厚さ3 mm という、 これまでに無い細分化構造を持たせた。そのため約500 チャンネルのストリッププラスチックシ ンチレータ構造を実現するために、メガストリッププレートを製作した。これは一枚のプラスチ ックシンチレータプレートに溝を掘り、その溝に反射材を挿入することにより、複数のストリッ プ構造を製作する手法である。細分化された各ストリップの組み上げおよび位置合わせにおいて、 メガストリップ構造にはメリットがあると予想されたため、今回の試作に至った。ここではメガ ストリッププレートの構造と光クロストークに関するベンチテストについて述べる。



4-3-1 メガストリッププレートの構造

図 39 メガストリッププレートのサイズとプラスチックシンチレータ層1レイヤーの構成

図 39 は1 枚のメガストリッププレートのサイズとプラスチックシンチレータ層1レイヤーの 構成を示す。1 枚のメガストリッププレートのサイズは 45(長さ)×90(幅)×3(厚さ) mm³である。 この1 枚のプレートに 9 本のストリップ構造を実現するために、幅 0.3 mm、深さ 2.4 mm の溝を プレートの表と裏から掘った。両者の間隔は 0.2 mm である。幅 0.3 mm のこの溝に反射材 (PET フィルム、厚さ 125 μ m)を挿入することにより光学的な分離を行った。各ストリップ構造枠内 には MPPC はめ込み用のカット(3×4.1×1.4 mm³)を施し、波長変換ファイバー読み出し用のプ レートにはファイバー用の穴も開けた。図 39 に示すようにプラスチックシンチレータ層 1 レイ ヤーはメガストリッププレート 2 枚から構成されており、白アクリルで製作したフレーム内には め込むことでアライメントを行った。

4-3-2 光クロストークの測定

メガストリッププレートの光クロストークを調べるためにベンチテストを行った。このベンチ テストはメガストリップ構造における隣り合うストリップの光学的分離の程度を確認するため に行った。測定は図 40 (a) のように隣のストリップ領域のクロスマークの位置 (ストリップ長さ 方向中央、ファイバー横 1.5 - 2.0 mm) のコリメータ上に β線源を設置したときに、MPPC のマー クのあるストリップで測定される光量を ADC 分布により評価した。測定環境は 25 ℃、V_{over} = 2.76 V、反射材はメガストリップの溝には PET フィルム(125 μm)、メガストリップの両面には PET フィルム(38 μm)を使用した。メガストリッププレートの下にはトリガープラスチックシンチレ ータを設置し、MPPC 信号の読み出し方法は 4-2-1 節と同様とした。図 40(b) は光クロストークに よる信号に MIP 信号を重ね書きした。各平均値よりメガストリッププレートにおける隣り合うス トリップ領域での光クロストークは 0.077 MIP 程度となった。



図 40 測定図(a)と光クロストークによる ADC 分布(b)

4-4 フレキシブルケーブル(Flexible printed cable: FPC)

カロリメータを製作する上でレイヤー間の隙間の距離は極力小さくする必要がある。読み出し に費やすスペースも例外ではない。そこで厚さを237µmに抑えることが可能なフレキシブルケ ーブルを採用した。フレキシブルケーブルには9個のMPPCがはんだ付けされており、図41のよ うにメガシンチプレートにはめ込む。また図42のような多層構造になっており、表面はシール ドを施した。なお図42①②はコネクタ部分の補強構造にあたる。



図 41 フレキシブルケーブルの写真

	ガラスェポ キシ	200µm		
0	熱硬化タイプ接着剤	40µ m		
3	日面カバーレイ	12.5µm		
٩	カバーレイ接着剤	25 µ/m		
\$	スルーホールメッキ	25 µ/m		
6	山面銅箔	9µm		
Ø	し1 面ベースポリイミド	25 µ m		
8	ホンティングシート	35 µ/ m	\geq	237µm
9	L2面銅箔	9µm		
\bigcirc	L2/L3面ベースポリイミド	25 µ m		
\odot	L3面銅箔	9µm		
\bigcirc	スルーホールメッキ	25µ/m		
3	L3面カバーレイ接着剤	25µm		
(Φ)	L3面力バーレイ	12.5µm		

図 42 フレキシブルケーブルの内部構造



図 43 1 レイヤーの組み立て

4-3-1節で述べた通り、溝に反射材を挿入したメガストリッププレート2枚(波長変換ファイ バー読み出しの場合はファイバーも挿入)をアクリルフレームに設置し(図 43 (1))、両面から3M Radiant Mirror filmで挟み(図 43 (2))、さらに遮光のためのブラックシートで覆う(図 43 (3))。 最後に MPPC のはんだ付けされたフレキシブルケーブル(FPC)をはめ込み(図 43 (4))、ゲインモニ ター用のチップ LED を置き(図 43 (5))、読み出し層が完成する。なお遮光シートの固定にはスプ レーのりを、FPC の固定には遮光テープを使用した。 4-5節のプラスチックシンチレータ層とタングステンとを支持するためのアクリル製スライド(図44(a))、測定器をカバーするフレーム(図44(b))、読み出しボードを設置するラック(図44(c))を製作した。測定器全体の概略図を図44に示す。ビームテストではこの全体を架台上に固定し、さらに遮光シートで覆った(図45)。



図 44 測定器のセッティング図



図 45 製作したプロトタイプの写真

完成した電磁カロリメータのプロトタイプは図 45 の写真の通りである。測定器付近の多数の ツイステッドペアケーブルは温度モニターのためのセンサーである。

4-7 レイヤーの組み合わせ

ベンチテストの結果、波長変換ファイバー読み出し(1)と直付け読み出し(2)の両方を試すこ とにした。また、今回の実験のコラボレーターである Kyungpook National University が製作し たプラスチックシンチレータ(押し出し方式で表面がTiO₂でコーティングされている)(3)のテス トも行った。MPPC の数に限りがあったため、今回は(1)(2)(3)を各13層ずつ製作し、図46のよ うな組み合わせにより、それぞれ26層のプロトタイプをテストした。



図 46 3種類の読み出しレイヤーと組み合わせ

4-8 MPPC のダイナミックレンジに関するシミュレーション

DESY でのビームテストでは入射運動量1-6 GeV/c の陽電子ビームを使用する。サイズが1 ×4.5×0.3 cm³のストリップ型プラスチックシンチレータを持つプロトタイプに1600 ピクセル の MPPC を使用した場合、入射運動量6 GeV/c の電磁シャワーのエネルギー測定が十分な精度で 可能であることをシミュレーションで見積もった。4-2-1節(図 36(a))で示したように、1 MIP に対して最も光量が多い場合で~21 p.e.が測定された。GEANT4[20]により作成したプロトタイ プカロリメータのシミュレーションによると、1 MIP 相当である入射運動量 2 GeV/c のμ⁻粒子 に対して各ストリップに落ちたエネルギーの平均は~0.47 MeV である(図 47(a))。よって運動量 6 GeV/c 陽電子が入射したときの各ストリップに落ちたエネルギーの分布(図 47(b))から、最大 は~74 MIP となった。よって~1500 p.e.程度が測定できれば良いと見積もられる。



図 47 プロトタイプの各ストリップに落ちたエネルギー分布

ここで、1つの MPPC に入射する光電子数と信号を出力するピクセル数との関係を見る。MPPC はガイガーモード領域で使用するためサチュレーションが起こる。その応答曲線 N_{fired} は、ピク セル数を $N_{pix} = 1600$ 、入射光電子数を N_{pe} とすると、以下で与えられる。

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{pix}} (1 - e^{-N_{\text{pe}}/N_{\text{pix}}})$$

比較のため、直線N_{fired} = N_{pe}を補助線として図 48 に記入した。1500 p. e. 程度の光電子の入 射に対して、応答するピクセル数は 1000 程度と考えられる。



図 48 MPPC の応答曲線と入射光電子数との関係

この応答曲線に現れる MPPC のサチュレーション効果により、プロトタイプカロリメータの線 形性とエネルギー分解能がどの程度影響を受けるかをシミュレーションした。



図 49 は入射運動量1-6 GeV/c の陽電子をプロトタイプカロリメータに入射したときのエ ネルギー和(単位はピクセル数)を示す。プロトタイプ中の各ストリップの読み出しに 1600 ピク

セルの応答曲線N_{fired} = N_{pix} $(1 - e^{-N_{pe}/N_{pix}})$ を適用した場合のエネルギー和(赤)と直線 N_{fired} = N_{pe}を適用した場合のエネルギー和(緑)を示している。1600 ピクセルで読み出すことに より、入射運動量 6 GeV/c で 13 %程度線形性からのずれが見られる。図 50 は入射運動量 1 -6 GeV/c の陽電子をプロトタイプカロリメータに入射したときのエネルギー分解能を示す。ただ し誤差は統計誤差による。

MPPC を適用しない場合(緑)の分解能:
$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(12.1 \pm 0.16)}{\sqrt{E}} \oplus (2.1 \pm 0.3) \%$$

MPPC を適用した場合(赤)の分解能: $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(12.1 \pm 0.15)}{\sqrt{E}} \oplus (1.4 \pm 0.4) \%$

となり、入射運動量6 GeV/c までの領域ではほとんど影響は見られないと予測される。

以上のことから 1600 ピクセルの MPPC は、性能を落とさずに入射運動量 6 GeV/c の電磁シャワーを測定することが可能なダイナミックレンジであると予測される。



図 50 エネルギー分解能の比較

5章

ハドロンカロリメータ

本章では GEANT4 シミュレーションによるサンプリング型ハドロンカロリメータの研究につい て述べる。1-3 節で触れたように、現在 ILC では4 つの測定器コンセプトが提案されている。ハ ドロンカロリメータについても4 通りのアプローチが行われている。GLD では鉛とプラスチック シンチレータのサンプリング型ハドロンカロリメータを提案しているが、シミュレーションによ り他との比較を試みる。

- ▶ アナログ読み出しとデジタル読み出しの比較
- ▶ 検出体にプラスチックシンチレータを使用した場合とガスを使用した場合の比較
- ▶ 吸収体に鉛を使用した場合と鉄を使用した場合の比較

を行い、ハドロンカロリメータ製作に際し最適な読み出しと物質について考察する。 但しシミ ュレーションに用いたハドロンカロリメータの構造は図 51 のようなサンプリング型カロリメー タとし、吸収体と検出体は4:1(鉛の場合は補償型)を採用した。また、検出体のセルサイズは 1 cm×1 cm、1 レイヤーあたりのセル数は10000(100×100)、としてシミュレーションを行った。 物質設定の詳細はセクション毎に記した。



図 51 シミュレーションに用いたハドロンカロリメータの構造

なお以下のシミュレーションはバージョン: GEANT4.6.2、ハドロンモデル: GHE ISHA [21] による もので、ヒットの定義は 0.1 MIP 以上とした。

5-1 アナログ読み出しとデジタル読み出し

アナログ読み出しとは、ヒットしたセルのエネルギー情報と位置情報を利用して解析を行う、 従来の方法である。一方デジタル読み出しとは、ヒットの有無情報と位置情報のみを利用して解 析を行う方法である。セルのエネルギー情報が不要となることにより、ADC が不要となり、読み 出しの簡略化およびコストの削減が期待される。このシミュレーションでは π^- (運動量 1,2,4,8,16,32 GeV/c)を入射し、1cm×1cmの各セルに対し、測定器の基本性能である線形性と エネルギー(またはヒット数)分解能の観点からアナログ読み出しとデジタル読み出しの比較を 行った。設定は、鉛8 mm、プラスチックシンチレータ2 mm、100 レイヤーとした。



図 52 線形性の比較

図 52 はπ⁻の入射運動量に対する測定エネルギー和(アナログ読み出し:青)と全ヒット数(デ ジタル読み出し:赤)をプロットしたものである。入射運動量 10 GeV/c 以上ではデジタル読み出 しにサチュレーションの影響がみられるが、入射運動量 10 GeV/c 以下の領域ではアナログ読 み出しと同等の線形性がみられる。



図 53 分解能の比較

そこで、入射運動量1-8 GeV/c の線形性の見られる領域において、アナログ読み出しとデジ タル読み出しのエネルギー(またはヒット数)分解能を比較した(図 53)。ただし誤差は統計誤差 による。

> アナログ読み出しの分解能: $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(49.6 \pm 1.8)}{\sqrt{E}} \oplus (7.8 \pm 2.6) \%$ デジタル読み出しの分解能: $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(48.1 \pm 1.8)}{\sqrt{E}} \oplus (9.7 \pm 2.0) \%$

今回のシミュレーションでは1 cm×1 cmのセルサイズでデジタル読み出しを試みたため、サチ ュレーションの影響の少ない領域は入射運動量10 GeV/c 以下となり、以上の結果を得た。線 形性の見られる領域においてはアナログ読み出しとデジタル読み出しのエネルギー(またはヒッ ト数)分解能は同等となった。入射運動量10 GeV/c 以上の領域で使用するためにはセルサイズ によるサチュレーションの補正や解析方法を検討する必要がある。

5-2 検出体:プラスチックシンチレータとガス

ハドロンカロリメータの検出体にプラスチックシンチレータを使用した場合とガス測定器を 使用した場合をシミュレーションにより比較した。GLDでは、ハドロンカロリメータの検出体に プラスチックシンチレータを、SiDではガス測定器(RPC)を想定している。プラスチックシンチ レータの利点は、メンテナンスの容易さが挙げられる。しかし、ハドロンカロリメータに使用し た際にはガスに比べて中性子への感度が高いことが弱点にも成り得る。PFAにおいて中性子のヒ ットがトラッキングを妨げる可能性があるからだ。そこでプラスチックシンチレータでハドロン カロリメータを作った際に PFA においてトラッキングを妨げる可能性のある中性子の効果をコ ントロールできるのか、そしてガスの場合と同等の性能を得ることができるのかがポイントとな る。設定は、鉛 8 mm、プラスチックシンチレータ/ガス 2 mm、100 レイヤーとし、

- ▶ ハドロンシャワーの横方向の広がり
- ▶ エネルギー分解能

(cm)



の観点からプラスチックシンチレータとガス(ここでは Xe を設定)の場合を比較する。

図 54 ガス測定器(a)とプラスチックシンチレータ(b)を使用した場合のヒットセル

(cm)

Z (Layer)

Z (Layer)

図 54(a)はガスを設定した測定器に運動量 4 GeV/c のπ⁻を入射したときの 3 次元のイベント ディスプレイである。青い点はヒットしたセルを示している。これに対して図 54(b)はプラスチ ックシンチレータを設定した測定器に運動量 4 GeV/c のπ⁻を入射したものである。ガス測定器 の場合と比べて連続する青いヒット点の作るトラックから離れたヒットが多数ある。プラスチッ クシンチレータの場合で、粒子の入射方向に対する各セルがヒットした時間情報を図 55 にプロ ットした。ここで時刻 0 は粒子発生点(測定器前面より 10 cm 上流の点)である。



図 55 プラスチックシンチレータの場合に粒子の入射方向に対する各セルがヒットした時間

緑の点は中性子のヒットである。これは、中性子とプラスチックシンチレータに含まれる水素 の弾性散乱反応からの反跳陽子によるシンチレーション光である。また、ヒット時間5 ns 以上 の赤の点は上記弾性散乱により減速された中性子が原子核に吸収され、この複合核が励起され、 さらに基底状態に戻るときに放出される y線由来の e⁻や e⁺である。つまりトラックから離れた ヒットは中性子散乱に起因するヒットであり、さらにこれらのヒットは遅れて起こることが分か る。この性質を利用すれば、中性子に起因するヒットの取捨選択を時間情報でコントロールでき る。



図 56 ヒット時間の分布

ヒット時間の分布を示したものが図 56 である。ヒット時間が 5 ns 付近に分布の肩が確認でき、 ヒット時間 5 ns 以上の分布の盛り上がりが図 52 の中性子に起因するヒットに対応する。5 ns 以上のセルをカットするとプラスチックシンチレータとガスの場合のヒット時間の分布は重な る。

ここでハドロンシャワーの横方向の広がりを評価するためにシャワー半径を定義する。座標軸 の定義は図 51 の通りとし、図 57 に示すようにヒットセルの座標(x(i), y(i), z(i))とおく。1 イベントに含まれるN個のヒットセルに対して



と定義する。このRとR(m)について時間カットを利用し、プラスチックシンチレータとガスの 場合のハドロンシャワーの横方向の広がりを比較する。



図 58 ハドロンシャワーの横方向の広がり

図 58 はハドロンシャワーの横方向の広がりを示す。図 58 (a) (b) はプラスチックシンチレータ の場合、図 58 (c) (d) はガスの場合、図 58 (a) (c) は R 分布、図 58 (b) (d) は R (m) 分布を示す。平均 値の比較を表 5 にまとめた。単位は cm である。

	R		R(m)	
	no time cut	after time cut	no time cut	after time cut
scintillator	7.3	4.3	7.8	4.9
gas	4.9	3.9	5.3	4.2

表 5 ハドロンシャワーの横方向の広がりの平均値

時間カット無しの場合、R分布、R(m)分布ともにプラスチックシンチレータの方がガスの場合よ りも横方向の広がりが大きい。これが中性子に起因するヒットによるものである。時間カットを 行うことにより、プラスチックシンチレータの中性子に起因するヒットセルをカットし、ガスの 場合とほぼ同等の横方向の広がりにコントロールできることが分かる。

次にエネルギー分解能についての比較を行った。図 59 は運動量 4 GeV/c のπ⁻を入射した場 合の時間カットに対するエネルギー分解能を示している。なお時間カット無しの場合のエネルギ ー分解能は、時間カット 1000 ns の位置に記入した。プラスチックシンチレータの場合もガスの 場合もエネルギー分解能は時間カットにほぼ依存しないことが分かる。また、入射運動量4 GeV/c におけるエネルギー分解能はプラスチックシンチレータの場合が27%、ガスの場合が 31%となり、プラスチックシンチレータの場合の方が優位であることが分かる。



図 59 時間カットによるエネルギー分解能の比較(運動量 4 GeV/c の π・を入射)

5-3 吸収体:鉛と鉄

ここではハドロンカロリメータの吸収体に、鉛を使用した場合と鉄を使用した場合の比較をシ ミュレーションした。鉄の利点は加工が容易である点と、鉛よりも低価格である点が挙げられる。 鉄と鉛の場合の性能が同等であれば、吸収体に鉄を採用することが可能となる。検出体はプラス チックシンチレータとし、鉛/鉄 20 mm、プラスチックシンチレータ 5 mm、50 レイヤーと設定 し、次に示す 2 つの観点から鉛と鉄の比較を行う。

- ▶ ハドロンシャワーの奥行き方向の発達
- ▶ ハドロンシャワーの横方向の広がり



図 60 運動量 4 GeV/c の π を入射し、1000 イベント重ね書きした描像

図 60 は運動量 4 GeV/c のπ⁻を入射し、1000 イベント重ね書きしたもので、青い点はヒットしたセルを示す。図 60 (a) (b) は鉛の場合、図 60 (c) (d) は鉄の場合、図 60 (a) (c) は時間カット無しの場合、図 60 (b) (d) は時間カットをした場合を示している。これらのシャワーの描像から、時間カットによる変化を視覚的に確認できるが、変化の詳細を調べるためにシャワーの奥行き方向の発達と横方向の広がりの分布を用いて以下のように評価する。



図 61 ハドロンシャワーの奥行き方向の分布

図 61 はハドロンシャワーの奥行き方向の分布である。図 61 (a) は鉛の場合、図 61 (b) は鉄の場合を示す。平均値の比較を表 6 にまとめた。単位は cm である。

	no time cut	after time cut
Pb	11.4	9.7
Fe	11.1	10.7

表 6 ハドロンシャワーの奥行き方向の分布の平均値

時間カットの有無に関わらず、鉛と鉄の場合のハドロンシャワーの奥行き方向の分布はほぼ同等 である。この結果は 2-2 節で述べた吸収長(鉛の場合は λ_1 =17.1 cm、 鉄の場合は λ_1 =16.8 cm) の関係とも一致する。



図 62 ハドロンシャワーの横方向の広がり

図 62 はハドロンシャワーの横方向の広がりを示す。図 62(a)(b)は鉛の場合、図 62(c)(d)は鉄の場合、図 62(a)(c)は R 分布、図 62(b)(d)は R(m)分布を示す。平均値の比較を表 7 にまとめた。

	R		R(m)	
	no time cut	after time cut	no time cut	after time cut
Pb	9.4	4.9	8.7	5.2
Fe	7.0	5.8	6.7	5.6

表 7 ハドロンシャワーの横方向の広がりの平均値

時間カット無しの場合、鉛の方が鉄より横方向の広がりが大きいことが分かる。時間カット有りの場合、鉛の場合と鉄の場合の横方向の広がりはほぼ同等の結果を得た。

以上のことから現段階ではアナログ読み出し、鉄とプラスチックシンチレータのサンプリング 型ハドロンカロリメータを提案する。

第6章

結論・考察

リニアコライダー実験に向けた細分化されたカロリメータの開発研究について述べた。研究内 容は、電磁シャワー位置測定器の製作とその性能評価(1)、電磁カロリメータテストモジュール の試作(2)、およびハドロンカロリメータに関するシミュレーション(3)であり、これら3の研究 を結ぶキーワードは細分化であった。

電子陽電子リニアコライダー実験では重心系エネルギー500 GeV から1 TeV 領域を実現し、ヒ ッグス粒子やトップクォークの精密測定により標準模型を超える新しい物理を探索することを 目的としている。ヒックス粒子の探索において、2 粒子のクォーク対への崩壊、つまりジェット を精度よく測定することが不可欠となる。そこでジェットのエネルギー分解能を向上させるため、 Particle Flow Algorithm (PFA) という解析手法が研究され、測定器には細分化された構造が要求 される。ジェット中の中性粒子のエネルギー測定を担うカロリメータの役割は大きく、このよう な未踏エネルギー領域での素粒子反応の精密測定に最適な、細分化されたカロリメータを開発研 究する必要があった。

まず、電磁シャワー位置測定器(1)を製作した。この測定器は、幅1 cm 長さ 20 cm 厚さ1 cm のストリップ型プラスチックシンチレータのアレイ構造を持つ。各ストリップの両端にアバラン シェフォトダイオード(APD)を直付けし、常温での信号読み出しを行った。その性能評価をする ために 2 度のビームテストを行った。ドイツ電子シンクロトロン研究所(Deutsches Elektronen Synchrotron: DESY)においては入射運動量 1 - 6 GeV/c の陽電子ビームを用いて位置分解能の評 価を行った。この測定器の上流に可変型プリシャワー測定器を設置し、(a) (0, 0, 24)、(b) (8, 8, 8)、 (c) (24, 0, 0)、(d) (0. 0. 16)の設定で 1 - 6 GeV/c の入射運動量を持つ電磁シャワーを測定した結 果、位置分解能は

(a) (0,0,24):
$$\sigma = \frac{(3.80 \pm 0.02)}{\sqrt{E}} \oplus (0.62 \pm 0.03) \text{ mm}$$

(b) (8,8,8): $\sigma = \frac{(4.46 \pm 0.01)}{\sqrt{E}} \oplus (0.00 \pm 0.10) \text{ mm}$
(c) (24,0,0): $\sigma = \frac{(8.12 \pm 0.02)}{\sqrt{E}} \oplus (0.00 \pm 0.07) \text{ mm}$
(d) (0,0,16): $\sigma = \frac{(4.11 \pm 0.01)}{\sqrt{E}} \oplus (0.00 \pm 14.1) \text{ mm}$

となった。これらの結果を比較すると鉛と測定器の距離が短くなるにつれ位置分解能は向上する ため、レイヤー間の隙間を極力縮小することが重要となる。また、高エネルギー加速器研究機構 (KEK)においては入射運動量 1 - 4 GeV/c の混合ビーム(π^- , e^- , μ^-)を用いて e/π 識別の評価を 行った。その結果入射運動量 4 GeV/c に対して、

エネルギーカット値が 12 MIP のとき、 $\epsilon_e(12MIP) = 95\%$ r_{π}(12MIP) = 17

ストリップカット値が4本のとき、 $\epsilon_e(4) = 95\%$ $r_{\pi}(4) = 12$

で e/π 識別が可能となった。磁場中で動作可能でコンパクトな APD をプラスチックシンチレー タに直付けし、読み出しを試みた本測定器の性能は、波長変換ファイバーを使用した光電子増倍 管読み出しの電磁シャワー位置測定器[19]と同等の性能を得た。現在の GLD 電磁カロリメータは 次に述べるタングステンとプラスチックシンチレータの MPPC 読み出しを想定しているが、電磁 カロリメータ内で本測定器を使用することは現段階でもオプションとして可能である。また、APD をストリップ型プラスチックシンチレータの両端に直付けし、常温での読み出しを試みたことは、 MPPC 直付け常温読み出しの電磁カロリメータプロトタイプ製作への大きなステップとなった。

次に、タングステンとプラスチックシンチレータのサンプリング型カロリメータ(2)を製作し た。吸収体にタングステン(厚さ3.5 mm)を用いることにより、電磁シャワーのモリエール半径 の縮小を図った。また検出体であるプラスチックシンチレータのセグメンテーションには幅1cm 長さ 4.5 cm 厚さ 3 mm という、これまでに無い細分化構造を持たせた。約 500 チャンネルのスト リップ型プラスチックシンチレータ構造を実現するために、メガストリッププレートを製作した。 これは一枚のプラスチックシンチレータプレートに溝を掘り、その溝に反射材を挿入することに より、複数のストリップ構造を製作する手法である。細分化された各ストリップの組み上げおよ び位置合わせにおいて、メガストリップ構造にはメリットがあると予想されたため、今回の試作 に至った。将来の膨大なチャンネル数を実現するための一案になると期待される。各チャンネル の読み出しには、MPPCを用いた。MPPCは、浜松ホトニクス社と信州大学を含む研究機関が共同 開発した、極微弱な光子数を数える光子カウンティング用光半導体素子である。100 V 以下の低 バイアス電圧で動作するため扱いやすく、磁場の影響を受けず、コンパクトで量産に適した新し い光検出素子である。本実験に用いた MPPC は、受光面 1 mm 角、1600 (40×40) ピクセル、パッケ ージサイズ 3×4×1.3 mm³というコンパクトなものであり、メガストリップに組み込んで使用し た。この MPPC を用いて、2 種類の読み出し方法を試した。波長変換ファイバーをプラスチック シンチレータに埋め込んだ wave length shifting fiber (WLSF)読み出しと、WLSF を使用せず、 プラスチックシンチレータに MPPC を直付けする Direct 読み出しである。この方法は電磁シャワ ー位置測定器(1)の APD 直付け読み出しの経験を踏襲したものである。製作した電磁カロリメー タの性能評価をするために、DESY において入射運動量1-6 GeV/cの陽電子ビームを用いてビ

ームテストを行うため、ベンチテストと測定器の設計及び製作を行った。なお、このビームテストは大量の MPPC の性能を実践の場で試す側面も持つ。

また、GEANT4 シミュレーションによるハドロンカロリメータの研究(3)を行った。1×1 cm²と いう細分化されたセルを想定し、アナログ読み出しとデジタル読み出しの比較、検出体にプラス チックシンチレータを使用した場合とガスを使用した場合の比較、さらに吸収体に鉛を使用した 場合と鉄を使用した場合の比較を行い、ハドロンカロリメータ製作に際し最適な読み出しと物質 について考察した。結果は、サチュレーションを起こさない領域(セルサイズ1×1 cm²の場合に は入射運動量 10 GeV/c 程度まで)においては、デジタル読み出しはアナログ読み出しと同等の性 能を期待できることが分かった。さらに高いエネルギーを持つ入射粒子に対しては解析方法を確 立する必要がある。また、検出体にプラスチックシンチレータを使用した場合には、時間カット の導入により中性子に起因するヒットの除去が可能となる。さらに吸収体に鉄を使用することで、 性能を落とすことなく、加工が容易で低価格な測定器を実現できるものと考える。以上のことか ら現段階ではアナログ読み出し、鉄とプラスチックシンチレータのサンプリング型ハドロンカロ リメータを提案する。

以上、電磁シャワー位置測定器の製作とその性能評価(1)、電磁カロリメータテストモジュー ルの試作(2)、およびハドロンカロリメータに関するシミュレーション(3)の3つの研究を重ねた ことによる利点は、(1)から(2)への技術的な応用が可能となったこと、測定器の製作、実験、シ ミュレーションの多面から細分化されたカロリメータの研究にアプローチできたこと、が挙げら れる。

参考文献

- [1] ILC Reference Design Report ILC Global Design Effort and World Wide Study
- [2] The SiD Concept Group, SiD Detector Outline Document, http://physics.uoregon.edu/~lc/wwstudy/concepts/ (2006).
- [3] The LDC Concept Group, LDC Detector Outline Document, http://www.ilcldc.org (2006).
- [4] GLD Concept Study Group, GLD Detector Outline Document, physics/0607154(2006).
- [5] The 4th Concept Group, Detector Outline Document, http://physics.uoregon.edu/~lc/wwstudy/concepts/ (2006).
- [6] http://www-glc.kek.jp/detector/concept-j.html
- [7] GLD Concept Study Group, GLD detector outline document, arXiv:physics/0607154
- [8] T. Sjostrand et al., PYTHIA 6.2 Physics and Manual, arXiv:hep-ph/0108264
- [9] http://www.linear-collider.org/reference.html
- [10] W-M Yao et al., Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics vol. 33 (2006) 1.
- [11] http://www.kuraray.co.jp/
- [12] http://www.3m.com/
- [13] http://jp.hamamatsu.com/products/sensor-ssd/pd078/pd079/pd082/S8664-55/index_ja.html
- [14] F. Kajino et al., Nucl. Instr. and Meth. A 383 (1996) 260.
- [15] A. Nagano et al., Nucl. Instr. and Meth. A 557 (2006) 460.
- [16] KEK Progress Report 1975, 1976
- [17] A. L. Sanchez et al., Nucl. Instr. and Meth. A 546 (2005) 535.
- [18] http://jp.hamamatsu.com/products/sensor-ssd/4010/S10362-11-025C/index_ja.html
- [19] http://jp.hamamatsu.com/products/sensor-etd/pd002/pd413/pd417/C5594-44/index_ja.html
- [20] J.Allison et al., Nucl. Instr. and Meth. A 506 (2003) 250.
- [21] Zbigniew Jakubowski and Michael Kobel, Instr. and Meth. A 297 (1990)60.
- [22] K. Kawagoe et al., Nucl. Instr. and Meth. A 487 (2002) 275.

謝辞