

機関番号：13401  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2007～2010  
 課題番号：19540278  
 研究課題名(和文) APDを用いたシンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターの試作  
 研究課題名(英文) A prototype of a scintillating-tile and fiber calorimeter using APDs  
 研究代表者  
 吉田 拓生 (YOSHIDA TAKUO)  
 福井大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：30220651

研究成果の概要(和文)：素粒子物理学の実験では、高エネルギー粒子同士の衝突反応によって生成される娘粒子のエネルギーを測定するために、シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターが用いられる。この装置は入射した粒子のエネルギーに比例する大きさの光信号を発生するようになっているが、本研究では、その光信号を読み出す受光素子として、従来の光電子増倍管の代わりにアバランシェフォトダイオード (APD) を用いることによって、エネルギー分解能を向上させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：In elementary particle physics experiments, scintillating-tile and fiber calorimeters are used to measure the energies of daughter particles produced in collisions of high-energy particles. This device generates a light pulse whose size is proportional to the energy of the incident particle. In this research, we could successfully improve the energy resolution of the calorimeter by using the avalanche photodiodes (APDs) as photosensors for the calorimeter, instead of photomultiplier tubes generally used for calorimeters.

#### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	200,000	60,000	260,000
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：高エネルギー物理学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子実験、カロリメーター

#### 1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学の実験分野では、目下、ヒッグス粒子の探索、素粒子標準モデルを超える新粒子(超対称性粒子等)の探索などが重要な課題となっている。このため、米国フェルミ国立加速器研究所の陽子・反陽子衝突型加速器 Tevatron や欧州 CERN の陽子・陽子衝突型加速器 LHC を用いて活発な研究が行なわれており、さらに電子・陽電子衝突型線形加速

器 ILC などの次世代型粒子加速器の建設計画も推進されている。

このような大型加速器を使った素粒子実験では、加速した粒子同士の衝突反応によって生成される種々の粒子(電子、 $\gamma$ 線、ハドロンなど)のエネルギーを測定するために、シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターが用いられる。これは、鉛板や鉄板などのシャワー発生材とプラスチックシン

チレーター板を交互に何層も積み重ねた形状をした、いわゆるサンプリングカロリメーターの一種で、高エネルギー粒子が入射したときのシンチレーターの発光量を測定することによって、入射粒子がカロリメーターの中で発達させるカスケードシャワーの大きさ、すなわち入射粒子のエネルギーが測定できるようになっている。また、電磁シャワーとハドロンシャワーの形状の違いを利用して、入射粒子の種類の識別 ( $e/\pi$ 分離) も行えるようになっている。

一般にサンプリングカロリメーターのエネルギー分解能や粒子識別能力を向上させるためには、シャワー発生材やシンチレーター板の厚さを最適化することなどに加えて、シンチレーターの発光量をいかに精度よく測定するかが重要な課題となる。シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターでは、シンチレーター板 (タイル) の中に波長変換材 (Wavelength Shifter) で出来た直径 1mm 程の細い光ファイバー (WLS ファイバー) が埋め込まれていて、カスケードシャワー発生時のシンチレーション光が、そのファイバーの中で波長変換され、ファイバーを通して外に引き出される。外に引き出された光は、通常、光電子増倍管で読み出されるが、我々は、この光を、光電子増倍管よりもはるかに高い量子効率を持ち、高速応答性の点でも引けをとらない受光素子「アバランシェフォトダイオード (APD)」で読み出せば、カロリメーターの性能向上を図ることができるのではないかと考え、本研究を着想するに至った。

カロリメーター中でカスケードシャワーが発生した時のシンチレーターの微弱な発光量を測定する場合、できるだけ量子効率 (受光面のところで光電効果によって光子を電子に変換する効率) の高い受光素子を用いた方が、受光面のところで最初に得られる光電子数が増え、その統計的な相対誤差が小さくなるため、エネルギー分解能が向上する。シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターで用いられる WLS ファイバーの発光波長域 (450~600nm) では、光電子増倍管の量子効率は 20%程度が限度であるのに対し、APD では 80%以上の量子効率を得ることが可能である。特に、我々は以前、シンチレーティングファイバー (Sci-Fi) を用いた荷電粒子飛跡検出器の光子 10~20 個程度の極めて微弱な光信号を効率よく読み出すために、WLS ファイバーとほぼ同じ発光波長域を持つ 3HF 型 Sci-Fi の発光に対して、量子効率が 90%に達する APD を開発し、これによって Sci-Fi の微弱光信号を 100%近い効率で検出する技術を確立したが、この時に培った技術を今回の研究のために役立てたいと考えた。

また、光電子増倍管のような電子管式の受

光素子は、磁場の中で使用すると、受光素子としての性能が著しく低下するが、APD のような半導体受光素子は、磁場の影響をほとんど受けない。このため、APD は、素粒子実験のように荷電粒子の運動量を測定するために必ず磁場を必要とする環境の中でも、磁場を気にすることなく使用することができる。さらに、APD は受光面の直径が数 mm 程度で、非常にコンパクトであるため、スペースの節約にも貢献できる。

これまでに国内外で実用化されたシンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターでは、その光信号を読み出すために専ら光電子増倍管が用いられている。一方、APD は、 $\text{PbWO}_4$  などの無機結晶を用いたカロリメーターで使用された例はあるが、シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターではまだ使われたことがない。これは、APD では 2 次電子増倍率 (アバランシェ増倍率、Gain) が低く、ノイズも大きいため、量子効率が高いにもかかわらず、結局 S/N 比が低くなってしまおうと危惧されているからである。しかし、我々は、APD を  $-50^\circ\text{C}$  程度まで冷却することによって、ノイズが減少すると同時に 2 次電子増倍率が增大することを見だし、S/N 比を飛躍的に向上させることに成功した。本研究の中でもこの手法を活用する。しかし、APD には、2 次電子増倍率が大きくなると、2 次電子増倍率自体のバラツキが大きくなり、その結果、2 次電子数のバラツキ (過剰雑音) が増大するという欠点はまだあり、APD を用いることによってカロリメーターのエネルギー分解能が向上するか否かは、この欠点と「量子効率が高いことによる 1 次光電子数の統計的な相対誤差の減少」という長所とのどちらが優勢であるかによって決まる。

## 2. 研究の目的

本研究では、以上のような考察に基づき、はじめにシンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターの雛形を試作し、その受光素子として APD を用いた場合と光電子増倍管を用いた場合のそれぞれの場合でカロリメーターの性能評価を詳しく行い、比較検討する。特に、どちらの受光素子を用いた方が高いエネルギー分解能を得ることができるか、という観点から比較する。

もちろん、APD と光電子増倍管では高い感度を持つ波長領域が異なるので、それぞれの受光素子に対して最も適した種類のシンチレーティングタイルや WLS ファイバーを選択する必要がある。光電子増倍管に対しては、既に多くの研究者によって様々な研究結果が論文発表されているが、APD に対しては、本研究の中で種々のサンプルを入手し、実際に光量を測定することによって、最も光量の多い

組み合わせを決定する必要がある。これもまた本研究の目的の1つである。

今回の研究で、APDを用いることによってカロリメーターの性能が向上し、エネルギー分解能や粒子識別能力( $e/\pi$ 分離)が向上することが示されれば、次世代の大型加速器を用いた素粒子実験において、ヒッグス粒子や超対称性粒子の探索をより一層効率よく行えるようになるという点で、当該分野の研究推進に貢献することができる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 雛型シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターの設計・製作

はじめに、シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターの試作器の設計・製作を行うに当たって解決しておくべき以下の様々な課題について、検討および予備実験を行う。

##### ① APDの選択

試作器の読み出しに用いるAPDの有力候補として、我々が以前シンチレーティングファイバーの読み出し用に開発したAPD(浜松ホトニクスSPL2367)と欧州CERNの無機結晶カロリメーターのために開発されたAPD(浜松ホトニクスS8664-55)を比較し、どちらが本研究の目的により適しているかを判定する。

##### ② シンチレーティングタイルおよびWLSファイバーの選択

APDと光電子増倍管では波長感度特性が異なるので、様々な発光・吸収スペクトルを持つ種々のシンチレーティングタイルやWLSファイバーの中からそれぞれの受光素子に最適のものを選択する必要がある。本研究では、候補となるシンチレーティングタイルやWLSファイバーのサンプルを実際に入手し、光量を測定することによって、最も光量の多い組み合わせを選択する。

##### ③ カロリメーターの構造の決定

本研究では、電磁カロリメーターの雛型を試作することにし、試作器の中のシャワー発生材として鉛板を用いる。鉛板やシンチレーティングタイルの形状、WLSファイバー用の溝の形状などがエネルギー分解能を左右する重要なパラメーターとなるが、これらについては、既に多くの研究者によって様々な研究結果が論文発表されているので、それらをよく調査するとともに、実際にモンテカルロシミュレーションによるエネルギー分解能の計算なども行い、シャワーの揺らぎのみに由来するエネルギー分解能が、素粒子実験で一般的に要求される「100GeVの電子に対して1.5%以下」という

条件を満たすように設計する。

以上の諸課題の検討結果に基づき、雛型カロリメーターを試作する。受光素子として、従来の光電子増倍管だけでなく、本研究の課題であるAPDも使えるようにする。これまでの我々の研究の結果、APDは $-30^{\circ}\text{C}$ 程度まで冷却することによってS/Nが飛躍的に向上する。本研究でも、APDを真空容器の中に設置し、ペルチエ素子を用いて $-30^{\circ}\text{C}$ 程度まで冷却できるようにする。

#### (2) 雛型シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターの性能評価

試作した雛型シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターに対して、宇宙線 $\mu$ 粒子を照射し、性能評価を行う。カロリメーターに入射した宇宙線 $\mu$ 粒子は、カロリメーター中でカスケードシャワーを発生させることなく、カロリメーターを貫通する。この場合、カロリメーターから得られる信号は、Minimum Ionizing Particle (MIP) 1本がカロリメーター中のシンチレーティングタイルを通過するときのエネルギー損失( $dE$ )に相当する信号である。高エネルギーの電子線や $\gamma$ 線がカロリメーターに入射した場合は、シンチレーティングタイルと交互に挿入されている鉛板によってカスケードシャワーが発生するため、同時に多数の粒子がシンチレーティングタイルを通過することになるが、そのときに得られる信号は、MIP 1個分の信号を、タイルに入射する荷電粒子の数だけ重ね合わせたものとほぼ等価であると考えられる。このため、MIP 1個分のエネルギー損失( $dE$ )をできるだけ高精度で測定できる受光素子を用いた方が、電子線や $\gamma$ 線に対しても、より高いエネルギー分解能が得られることになる。ここでは、カロリメーターに宇宙線 $\mu$ 粒子を照射したときに得られる光信号をAPDで読み出した場合と光電子増倍管で読み出した場合の結果を比較する。特に、シンチレーティングタイルを通過する宇宙線のエネルギー損失( $dE$ )に対するエネルギー分解能について詳細に比較する。なお、APDを用いたときのエネルギー分解能は、APDの冷却温度や2次電子増倍率(Gain)の関数となるので、これらの条件を変えながら測定し、最もよい精度が得られる条件を見出す。

### 4. 研究成果

#### (1) 雛型シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターの設計・製作

上述の諸課題を検討した結果、120mm $\times$ 120mm $\times$ 4.5mm厚の鉛板22枚の間に120mm $\times$ 120mm $\times$ 4.0mm厚のプラスチックシンチレーティングタイル(以下、タイルと略す)を

21枚、サンドイッチ状に挟み込んだ構造の電磁カロリメーターを作製した。鉛の厚さの合計は18放射長となる。実際の素粒子実験で測定するべき100GeV付近の電磁シャワーを吸収するには20放射長以上の鉛が必要であるが、本研究では、日本国内で得られる電子ビームの最高エネルギーが3 GeV程度であることから、このビームを用いてテスト実験を行うことを想定し、このエネルギーの電磁シャワーを吸収できる厚さをシミュレーションによって決定したところ、18放射長となった。図1は、この雛型カロリメーターに3 GeVの電子が入射したときの電磁シャワーの発達の様子をシミュレーションによって描いたものである。

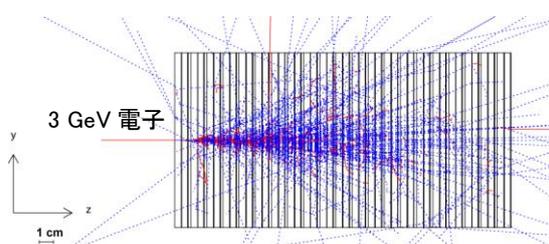


図1 シミュレーションによる電磁シャワー

作製した雛型カロリメーターの受光素子として用いる APD には、上述の二つの候補から S8664-55 を選択した。カロリメーターでは通常、各タイルを別々に読み出す必要はなく、入射粒子に沿って複数枚のタイルを纏めて読み出せばよい。S8664-55 は、WLS ファイバーの発光波長域における量子効率が約 80% で、もう一つの候補である SPL2367 の 90% に比べるとやや低いが、受光面が 5mm×5mm と大きく、ひとつの APD で複数のタイルを纏めて読み出すことができるので、カロリメーター用としては好都合である。一方、SPL2367 は受光面が直径 1.5mm なので、タイル一枚一枚を別々の APD で読み出し、それを後で足し上げることになる。

S8664-55 は、逆バイアス電圧をかけたときに pn 接合面付近にできる空乏層が厚いため、受光面の面積が大きい割には端子間の静電容量が 80 pF と小さい。一方、SPL2367 は、受光面の面積が S8664-55 の 7% 程度しかない割に、静電容量が 30 pF もある。このため、S8664-55 を用いた方が、タイル 1 枚当たりの静電容量を圧倒的に小さくすることができ、APD の直後に接続されるプリアンプのノイズ（通常、入力側の静電容量に比例する）が低減され、S/N 比の向上につながるものと考えられる。

一方、APD と比較するための光電子増倍管（Photomultiplier Tube、以下、PMT と略す）には、浜松ホトニクス の H3178-61 を選択した。これは、WLS ファイバーの 500nm 付近の

発光波長域で通常の PMT よりも若干高い量子効率を持つ Green-Extended PMT と呼ばれるタイプの PMT であり、シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーター用の PMT として定番になっているものである。ただし、量子効率が高いと言っても、波長 500nm の光に対して、普通の PMT が 12% 程しかないところが、せいぜい 16% 程度に増えるだけである。

作製する雛型カロリメーターで用いるタイルと WLS ファイバーの種類を決定するために、タイルの候補として Bicron の BC-408 と BC-412 を、WLS ファイバーの候補として Kuraray の Y-11 と Y-8 を選択し、それらを実際に組み合わせて光量を測定したところ、最も光量の多かったのは、どちらの受光素子に対しても BC-408 と Y-11 の組み合わせであったので、これらを用いることに決定した。図 2 は、そのときに各受光素子で得られた平均光電子数である。実際に雛型カロリメーターで用いるサイズのタイル 1 枚に溝を掘り、そこに WLS ファイバーを埋め込んだサンプルを用意して、そのタイルに宇宙線  $\mu$  粒子を照射したときの発光を APD や PMT で読み出した。APD でも PMT でも、BC-408 と Y-11 を組み合わせたときに最も光電子数が多くなるが、APD と PMT を比較すると、APD では、量子効率が高いことを反映して、PMT の 5 倍以上の数の光電子が得られていることが分かる。

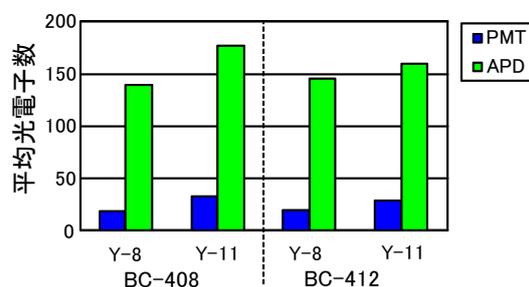


図2 平均光電子数の測定値

## (2) 雛型シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターの性能評価

以上のようにして製作した雛型電磁カロリメーターの受光素子として APD や PMT を用いた場合の性能評価を行った。カロリメーターの発光を読み出す際には、21 枚のタイルを 7 枚ずつ三つのグループ（Super Layer）に分け、各 Super Layer に受光素子を 1 個ずつ取り付けて、読み出した。

はじめに、宇宙線  $\mu$  粒子（MIP）がカロリメーターを貫通したときのエネルギー損失（ $dE$ ）に対するエネルギー分解能を、APD の Gain と温度の関数として測定し、最もエネルギー分解能が良くなる Gain と温度の組み合わせを見出す実験を系統的に行った。ただし、ここで各受光素子から得られる信号の波高分布は、図 3 に示すように、ランダウ分布と

いう左右非対称な形の分布になるので、エネルギー分解能を、分布の半値幅÷最頻値×100%で定義した。

測定の結果、APDのGainについては、どの温度領域でもGainが50~100のときにエネルギー分解能が最も良くなることが分かった。Gainが50以下では、信号が小さくなるため、プリアンプから発生するノイズなどの影響を大きく受け、エネルギー分解能が低下する。一方、Gainが100を越えて大きくなると、信号も大きくなるが、それを上回る勢いでAPDの過剰雑音も大きくなり、エネルギー分解能が悪化することが分かった。

さらに、APDのGainを50~100に保った状態でAPDの温度を室温(+25°C)から-30°Cまで下げていくと、APDの暗電流によるショットノイズが低減されるので、その分だけエネルギー分解能が向上するが、室温で28%だった分解能が、-30°Cでせいぜい26%に向上する程度であった。しかし、シミュレーションによって求めたMIPのエネルギー損失のバラツキのみから得られるエネルギー分解能の極限值は25%であったので、APDを-30°Cに冷却したときの26%という分解能は、ほぼこの極限值を実現しているものと考えられる。

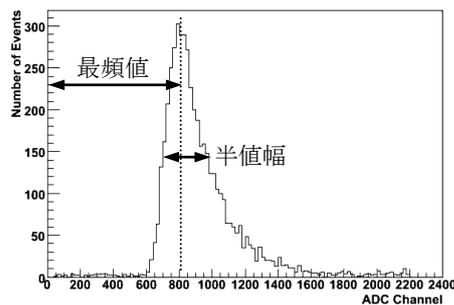


図3 カロリメーターの信号の波高分布。横軸は波高分析に用いたADCのチャンネル。

一方、光電子増倍管を使った場合のエネルギー分解能は33%となり、APDよりも悪くなった。本研究の結論として、シンチレーティングタイル・ファイバー型カロリメーターの受光素子としてAPDを用いると、PMTを用いた場合に比べて過剰雑音は増えるが、その欠点よりも、光電子数が増えることによって統計的な相対誤差が減少する効果の方が優勢となり、結果的にエネルギー分解能が向上することが分かった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ①T. Aaltonen, S.H. Kim, T. Yoshida, 他 583名(574番目), Search for

Supersymmetry with Gauge-Mediated Breaking in Diphoton Events with Missing Transverse Energy at CDF II, Phys. Rev. Lett. 104巻, 1号, 011801-1~8, 2010, 査読有り

- ②T. Aaltonen, S.H. Kim, T. Yoshida, 他 603名(593番目), Search for Associated Production of the Standard-Model Higgs Boson in the All-Hadronic Channel, Phys. Rev. Lett. 103巻, 22号, 221801-1~8, 2009, 査読有り

- ③T. Aaltonen, S.H. Kim, T. Yoshida, 他 597名(587番目), Search for standard model Higgs boson production in association with a W boson at CDF, Phys. Rev. D 78巻, 3号, 032008-1~16, 2008, 査読有り

- ④A. Abulencia, S.H. Kim, T. Yoshida, 他 622名(612番目), Search for Heavy Long-Lived Particles that Decay to Photons at CDF II, Phys. Rev. Lett. 99巻, 12号, 121801-1~7, 2007, 査読有り

[学会発表] (計7件)

- ①井上博貴, 清水佑介, 吉田拓生, APDを用いたカロリメーターのエネルギー分解能の研究, 2010年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2010年11月27日, 富山大学

- ②井上博貴, 吉田拓生, 小森亮太, 川口達紀, 北村真吾, 本田善徳, APDによるカロリメーターのエネルギー分解能向上, 2009年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2009年12月5日, 金沢大学

- ③奥村容子, 吉田拓生, 井上博貴, 山口光司, 吉村香, APDを用いた雛型カロリメーターの作製とその性能評価, 2008年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2008年11月29日, 福井大学

- ④井上博貴, 吉田拓生, 奥村容子, 山口光司, 吉村香, カロリメーターの光量増加に有効な反射材の研究, 2008年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2008年11月29日, 福井大学

- ⑤石川直樹, 吉田拓生, 奥村容子, 林幸治, カロリメーターのエネルギー分解能向上の研究, 2007年度日本物理学会北陸支部定例学術講演会, 2007年12月1日, 富山県立大学

[その他]

ホームページ等

<http://serv.apphy.u-fukui.ac.jp/~yoshida/calorim/calorim2.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 拓生 (YOSHIDA TAKUO)

研究者番号：30220651

(2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし ( )

研究者番号：