



修士学位論文

MPPCによる  
シンチレーターストリップ読み出しの研究

平成 19 年度

信州大学大学院工学系研究科  
物質基礎科学専攻  
素粒子・宇宙物理学講座 高エネルギー分野

西山実穂

## 概要

International Linear Collider(ILC)のカロリメータで用いられる予定であるシンチレータストリップと読み出し方法についての研究を行った。

現在計画中的である ILC 実験は次世代の電子陽電子線形型加速器実験である。ILC 実験ではヒッグス粒子の精密測定、トップクォークの対生成、標準理論を超える物理の探索を目的としている。よって、従来の加速器や測定器よりも高性能であることが望まれている。

Global Large Detector(GLD)は ILC の検出器案の 1 つである。私たちは、検出体がプラスチックシンチレータ、吸収体がタンゲステンの積層型サンプリングカロリメータを GLD の電磁カロリメータとして提案している。このカロリメータでは細分割されたシンチレータストリップ (1.0cm × 4.5cm × 0.3cm) が用いられる。シンチレータを用いるカロリメータでは入射粒子のエネルギーの一部を光に変換し、その光量を測定することにより、入射粒子のエネルギーを測定する。

本研究はシンチレータストリップの光量の一様性を確かめることを目的とし、シンチレータストリップの評価を行った。使用するシンチレータストリップは製造方法に違いがある、クラレ社のシンチレータストリップと extruded のシンチレータストリップの 2 種類である。また、信号の読み出し方法として、波長変換ファイバー読み出し、直接読み出しの 2 種類がある。波長変換ファイバーは Kuraray Y11 1mmφ を使用した。実験室で行った光量比較測定の結果により、光量はクラレの波長変換ファイバー読み出しが一番高く、この光量を基準とし、クラレの直接読み出しが 74.8%、extruded が 50.8% の光量となっていることを解った。またシンチレータストリップの光量を測定するにあたり、光漏れ防止のため、シンチレータストリップを覆う反射材の光量比較測定も行った。使用した反射材は、3M の radiant mirror film ときもと株式会社のレフホホワイトの 2 種類で、レフホホワイトの光量が radiant mirror film の光量の 82.8% になっていることが分かった。

低コスト製造のために extruded のシンチレータストリップの改良は必要不可欠なので、韓国と共同で extrusion 法の研究を進めている。そして、高エネルギー加速器研究機構で、電子ビームを使ったビームテストを行った。ビームテストではいろいろなタイプの extruded のシンチレータストリップを用いて、クラレのシンチレータストリップとの性能を比較することにより、extruded のシンチレータストリップの性能を評価した。このビームテストの結果より、extruded の光量の一様性は波長変換ファイバーを通す穴の大きさ、位置、反射材に関係することが分かった。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>International Linear Collider ( ILC ) 実験</b>	<b>4</b>
1.1	ILC の加速器	4
1.1.1	線形加速器実験	4
1.1.2	ILC の加速器	5
1.2	ILC の物理	5
1.3	GLD 測定器	5
1.4	GLD カロリメータ	8
1.4.1	カロリメータの構造	8
1.4.2	カロリメータの種類	8
1.4.3	エネルギー分解能	9
1.4.4	Particle Flow Algorithm	10
1.4.5	カロリメータの細分割	10
1.4.6	GLD カロリメータ	10
<b>第 2 章</b>	<b>新型光検出器 Multi Pixel Photon Counter(MPPC)</b>	<b>13</b>
2.1	MPPC	13
2.1.1	MPPC の構造と原理	13
2.1.2	MPPC の基礎特性	14
2.2	シンチレータ	14
2.2.1	シンチレータの原理	14
2.2.2	シンチレータストリップの種類	15
<b>第 3 章</b>	<b>シンチレータストリップの光量比較測定</b>	<b>16</b>
3.1	研究目的	16
3.2	MPPC の Gain の決定	16
3.2.1	測定方法	16
3.2.2	測定結果	17
3.3	シンチレータストリップの光量比較測定	17
3.3.1	測定方法	18
3.3.2	測定結果と考察	18
3.4	反射材の光量比較測定	21
3.4.1	測定方法	21

3.4.2	測定結果と考察	22
3.5	ビームテスト	24
3.5.1	富士テストビームライン	24
3.5.2	測定目的	24
3.5.3	ビームラインの構成	25
3.5.4	シンチレータストリップの構成	25
3.6	ビームテストの解析	28
3.6.1	MIP に対する応答	28
3.6.2	光量の一様性	30
第 4 章	結論	41
4.1	測定結果のまとめ	41
4.2	今後の課題	41

## 目 次

1.1	ILCの概念図 by Sigemi Numazawa . . . . .	6
1.2	ILCのデザイン . . . . .	7
1.3	GLDの概観(完成予想図) . . . . .	8
1.4	検出器の概念図 . . . . .	9
1.5	GLDの電磁カロリメータの検出層の概略図(サンプリング型カロリメータ) . . . . .	12
3.1	Gain 測定のセットアップ . . . . .	17
3.2	ダークノイズを用いて測定した結果 . . . . .	18
3.3	シンチレータストリップの光量比較測定のセットアップ . . . . .	19
3.4	ストリップの光量比較の結果 . . . . .	20
3.5	extruded において $\text{TiO}_2$ がはげている様子 . . . . .	21
3.6	セットアップ . . . . .	22
3.7	反射材の光量比較の結果 . . . . .	23
3.8	ビームラインの構成 . . . . .	25
3.9	ビームラインの構成(横から見た写真) . . . . .	26
3.10	波長変換ファイバーを通す穴の比較 . . . . .	27
3.11	穴の位置の比較 . . . . .	28
3.12	A~Fのシンチレータストリップ . . . . .	30
3.13	A1とA2のシンチレータストリップ(extruded) . . . . .	31
3.14	B1とB2のシンチレータストリップ(extruded) . . . . .	32
3.15	ストリップ1~ストリップ4 . . . . .	32
3.16	全イベントとMIPイベント:ストリップ1 . . . . .	33
3.17	全イベントとMIPイベント:ストリップ2 . . . . .	34
3.18	全イベントとMIPイベント:ストリップ3 . . . . .	35
3.19	全イベントとMIPイベント:ストリップ4 . . . . .	36
3.20	光量一様性:ストリップ1 . . . . .	37
3.21	光量の一様性:ストリップ2 . . . . .	38
3.22	光量の一様性:ストリップ3 . . . . .	39
3.23	光量の一様性:ストリップ4 . . . . .	40

# 第1章 International Linear Collider (ILC) 実験

## 1.1 ILCの加速器

### 1.1.1 線形加速器実験

現在最高エネルギーを得ることができる加速器は、陽子・(反)陽子衝突型線形加速器である。陽子は質量が大きいためシンクロトロン放射によるエネルギー損失が、同一のエネルギーに電子を加速する場合と比べて、少ない。また、エネルギーを上げるためには、加速器を大きくし、磁場を強くすればいいので、重心系エネルギーを上げやすい。現在最も高いエネルギーを実現しているのは、アメリカにあるフェルミ国立加速器研究所 (FNAL) の TEVATRON であり、これは重心系エネルギーが 1.96 TeV である。スイスにある欧州合同原子核研究機構 (CERN) で 2008 年稼働予定である陽子・陽子衝突型円形加速器の Large Hadron Collider (LHC) は重心系エネルギーが 14 TeV にも及ぶ。しかし、陽子・陽子衝突型加速器では強い相互作用により、ハドロン中のクォークやグルーオンがジェットを作り出すのでバックグラウンドが多い。

一方、電子・陽電子衝突型加速器では、電子・陽電子は内部構造を持たないので、始状態がはっきりしていてエネルギーの無駄がない。また、バックグラウンドが非常に少ないので、精密測定に向いている。

しかし、円形加速器ではシンクロトロン放射により粒子のエネルギー損失が生じる。この 1 周あたりのエネルギー損失  $\Delta E$  は

$$\Delta E = (E/mc^2)^4/R$$

と表すことができる。ここで、 $E$  は粒子のエネルギー、 $m$  は粒子の質量、 $c$  は光速、 $R$  は加速器の半径である。粒子のエネルギー  $E$  が大きくなるにつれてエネルギー損失  $\Delta E$  が 4 乗で増加し、それ以上の加速が難しくなる。同エネルギーでは、質量の軽い電子ではエネルギー損失  $\Delta E$  が大きくなる。半径  $R$  を大きくすればエネルギー損失  $\Delta E$  を小さくできるが、 $R$  の大きさにはスペース上の限界がある。これまでに電子・陽電子衝突型円形加速器で最も高い重心系エネルギーを実現したのが CERN の Large Electron Positron- (LEP-) の約 200 GeV であり、これ以上の重心系

エネルギーを実現するのは非常に困難である。したがって、これ以上のエネルギーを可能にするためには、円形加速器ではなく線形加速器が必要となる。

### 1.1.2 ILCの加速器

ILCは次世代の電子・陽電子衝突型線形加速器である。図1.1にILCの概念図、図1.2にILCのデザインを示す。全長が約30kmで、前段加速部分と最終収束部分以外では曲線部分を持たないので、シンクロトロン放射によるエネルギー損失はほとんどない。したがって、円形加速器では到達できない高エネルギーが実現可能となる。

しかし、線形加速器であるため、電子・陽電子は加速部分を一度しか通らないので、円形加速器のように衝突しなかった粒子を別の衝突点で再利用するということが不可能である。そのため、加速勾配の向上や、ビームをしぼることによるルミノシティの向上など多くの技術革新が必要とされている。

## 1.2 ILCの物理

ILCではヒッグス粒子の精密測定、トップクォークの対生成、標準理論を超える物理の探索を目的としている。ILCの初期の目標は、将来重心系エネルギーをTeV領域まで上げることを想定しつつ、まず500GeVまでで実験を行うことである。トップクォークの対生成の閾値の重心系エネルギーが350GeV付近に存在すること、ヒッグス粒子が200GeVまでに存在する可能性が非常に高いことがこれまでの研究によりわかっている。よって、これらに対して十分なエネルギーがなければいけないので、重心系のエネルギー500GeVが必要となるのである。その後、TeV領域まで重心系エネルギーを上げる。

LHCは高エネルギーにより、ヒッグス粒子が探索可能である。ILCはLHCに比べて、ヒッグス粒子を精密に測定することが可能である。したがって、LHCとILCを並行して稼動することは、新しい物理を発見し、理解するために重要である。

## 1.3 GLD測定器

検出器は衝突点に近い側から、バーテックス検出器、中央飛跡検出器、カロリメータ、 $\mu$ 粒子検出器の順で置かれる。図1.3にGLDの概観を示す。



図 1.1: ILC の概念図 by Sigemi Numazawa  
この線形加速部分の先に測定器が置かれる。

- パーテックス検出器

パーテックス検出器は電子・陽電子衝突点に極めて近いところに置かれる検出器である。ビーム衝突によって生成された粒子のうち、荷電粒子の飛跡を精密に測定するためのものである。B 中間子や D 中間子の崩壊点を測定することによって、b クォークや c クォークの同定を行う。特に b クォークの同定は、ヒッグス粒子探索において非常に重要である。しかし、パーテックス検出器では  $1 \text{ mm}^2$  あたり数十個の低エネルギーの電子と陽電子がバックグラウンドとして入射してくる。このような状況において、必要な粒子の飛跡を正確に測定するためには、数  $\mu \text{ m}$  という高い位置分解能が要求される。この高い位置分解能を実現させるために高精細画素電荷素子を用い



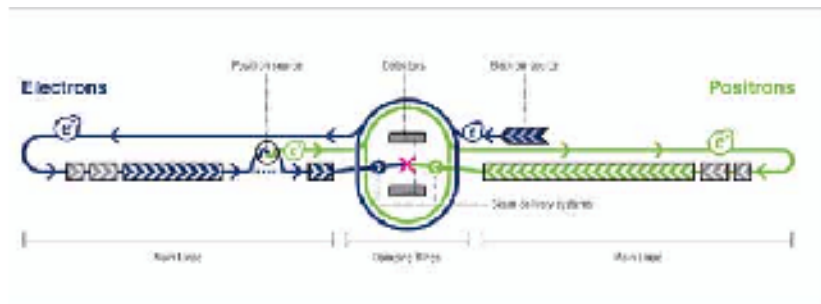


図 1.2: ILC のデザイン

ることが考えられている。

- 中央飛跡検出器

中央飛跡検出器は、ジェット中の荷電粒子の飛跡を調べ、その運動量を測定する装置である。これらの荷電粒子は超伝導ソレノイドの作る磁場で曲げられる。この曲げられた曲率半径から運動量が測定できる。ヒッグス粒子探索において、高い運動量分解能が要求される。

- カロリメータ

カロリメータは発生したエネルギーを測定する装置である。GLD カロリメータではサンプリング型カロリメータが用いられ、反応の違いから電磁カロリメータとハドロンカロリメータに分けて構成されている。カロリメータについては次の節で詳しく述べる。

- $\mu$  粒子検出器

$\mu$  粒子の同定を行う検出器である。 $\mu$  粒子は寿命が長く、重い粒子なので、電磁シャワーを起こさずカロリメータを突き抜ける。したがって、飛跡検出器で精度よく検出された  $\mu$  粒子の飛跡と、 $\mu$  粒子検出器で検出された飛跡が一致するかを調べるので、それほど高い位置分解能は要求されておらず、 $\sim 1\text{cm}$  程度である。

図 1.4 に検出器のデザインを示す。

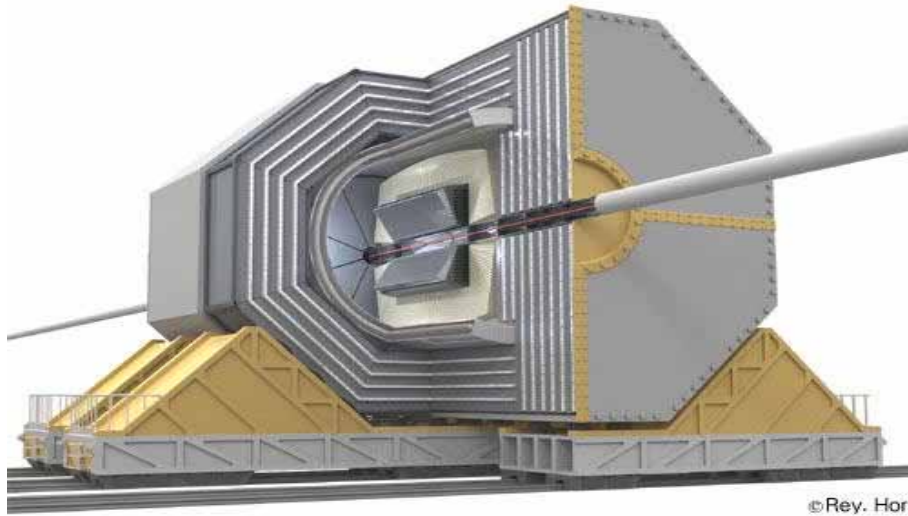


図 1.3: GLD の概観 (完成予想図)

## 1.4 GLD カロリメータ

### 1.4.1 カロリメータの構造

カロリメータはシャワーという現象により、粒子の全エネルギーを測定する。シャワーとは高エネルギーの粒子が物質に入射したときに、原子核との相互作用により指数関数的に粒子数を増加させる現象で、これは新たな粒子を生成できるエネルギーを下回るまで続く。このシャワーには電子、陽電子、光子などによる電磁シャワーと、ハドロンによるハドロンシャワーがある。電磁シャワーを測定するのが電磁カロリメータ、ハドロンシャワーを測定するのがハドロンカロリメータとなっている。カロリメータでは、このシャワーのエネルギーを精度よく測定することにより、入射粒子のエネルギーを測定する。

### 1.4.2 カロリメータの種類

カロリメータには全吸収型カロリメータとサンプリング型カロリメータがある。

全吸収型カロリメータはカロリメータ内で失う全エネルギーを測定できるので、エネルギー分解能が優れている。しかし、コストが高く、大量生産が困難である。

サンプリング型カロリメータは吸収体と検出体を交互に並べた積層構

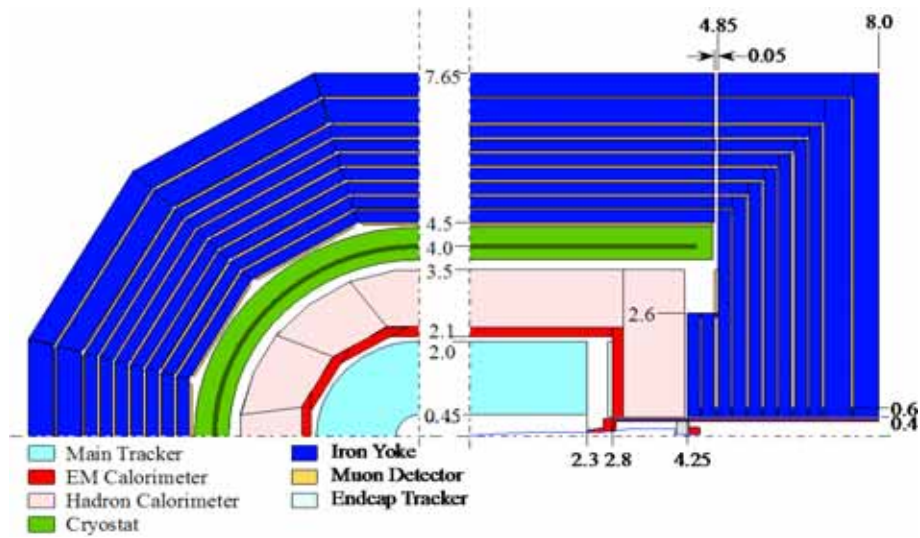


図 1.4: 検出器の概念図  
 左側がビーム軸上から見た断面図。  
 右側が検出器を横から見た図。  
 数値の単位は m。

造になっている。吸収体には効率よくシャワーをおこさるために密度の大きい物質である、鉛、鉄、タングステンなどが用いられる。検出体にはプラスチックシンチレータ、ガス、半導体などが用いられる。サンプリング型カロリメータのエネルギー分解能は全吸収型カロリメータに劣るが、サイズも小さくでき、コストも低い。GLD カロリメータではサンプリング型カロリメータが用いられる。

### 1.4.3 エネルギー分解能

粒子がカロリメータに入射したときのエネルギー分解能は次式で表される。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{\sigma_{stochastic}}{\sqrt{E}} \oplus \sigma_{constant}$$

ここで、 $A \oplus B = \sqrt{A^2 + B^2}$  である。E は GeV 単位で表される入射粒子のエネルギーである。 $\sigma_{stochastic}$  は統計項で、入射粒子により形成されるシャワー自体の揺らぎ、カロリメータ自体の検出層と吸収層の積層構造に起因するものである。 $\sigma_{constant}$  は定数項で、シャワーの漏れ、エネルギーの較正などに起因するものである。

電磁カロリメータの目標値は

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{15\%}{\sqrt{E}}$$

となっている。

#### 1.4.4 Particle Flow Algorithm

ジェットを精度よく測定できないとジェットの再構成において精密にもとの粒子を特定できない。そこで、ジェット中の粒子のエネルギーを精度よく測定する方法として、Particle Flow Algorithm (PFA) を用いる。ILC 実験において重要なイベントの多くは複数の粒子が生成されるジェットを多く含む。ジェットを構成する粒子は、約 65% が荷電粒子、25% が光子、10% が中性ハドロンである。このジェットを構成する粒子のうち、カロリメータでは中性粒子のみエネルギー測定を行う。この手法が PFA である。

#### 1.4.5 カロリメータの細分割

1 粒子が単独でカロリメータに入射してくるということはかなりまれで、ジェットとして多数の粒子が近接して入射してくることが多い。ILC ではジェットのエネルギー分解能が高いことが要求されているので、ジェットのエネルギーを精度よく測定する必要がある。よって、PFA によるジェットの再構成により、近接して入射してきた粒子を正確に区別して検出しなければいけない。そこで、GLD カロリメータではシンチレータストリップを用いて、カロリメータの細分割を行っている。

#### 1.4.6 GLD カロリメータ

GLD カロリメータではサンプリング型カロリメータを提案している。電磁カロリメータでは吸収体にタンゲステン (厚さ: 3mm) + 検出体にシンチレータ (厚さ: 2mm) + 空気 (厚さ: 1mm) を 33 層、ハドロンカロリメータでは吸収体に鉄 (厚さ: 20mm) + 検出体にシンチレータ (厚さ: 5mm) + 空気 (厚さ: 1mm) を 46 層となっている。

図 1.5 に GLD の電磁カロリメータで考えられているサンプリング型カロリメータを示す。奥行き方向を x 軸、横方向を y 軸とする。電磁カロリメータでは 1.0cm × 4.5cm × 0.3cm のストリップシンチレータを x 軸方向に並べた X 層と Y 層から構成されるサンプリング型カロリメータが考えられている。X 層と Y 層の 2 層の組み合わせによって、1cm × 1cm のピ

クセル検出器と同等の位置測定が可能になっている。2 章で述べる MPPC という新型光検出器を読み出しに使う。

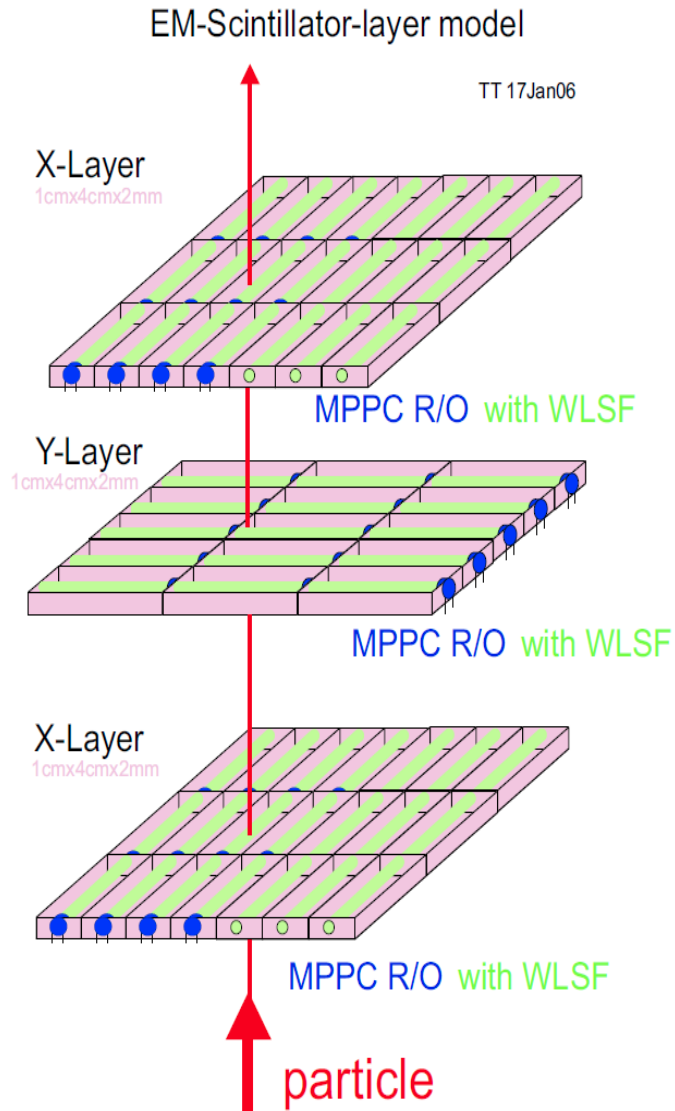


図 1.5: GLD の電磁カロリメータの検出層の概略図 (サンプリング型カロリメータ)

## 第2章 新型光検出器 Multi Pixel Photon Counter(MPPC)

### 2.1 MPPC

MPPCは数光子から数千光子程度の微弱光測定のために近年開発された半導体光検出器である。

今まで、微弱光の測定には主に光電子増倍管が使われてきた。しかし、光電子増倍管は磁場中では使用できないこと、小型化が非常に難しく、コストが高いこと、動作させるのに高電圧を必要とすることなど、高エネルギー実験には不向きな性質があった。よって、小型で安く、光電子増倍管に匹敵するほどの性能を持つ光検出器が望まれてきた。そこで、浜松ホトニクスとILCカロリメータグループなどが研究・開発したのが、MPPCである。MPPCは、小型、光電子増倍管に並ぶ増幅率 (Gain) と光子検出効率、磁場に対する耐性、70V程度の低電圧で動作することといった優れた性質を持っている。

測定で用いたのは、受光面 1.0mm × 1.0mm に APD が 40 ピクセル × 40 ピクセル=1600 ピクセルで、型番が 00001137 の MPPC である。

#### 2.1.1 MPPCの構造と原理

MPPCは多数の微小 APD (アバランシェフォトダイオード) のピクセルを 2次元に並列接続した構造になっている。ピクセル化された APD をガイガーモードで動作させ、各ピクセル信号の和を並列に読み出す。各 APD ピクセルでは、入射光電子数によらず一定の大きさの信号を出力する。また APD ピクセルは、それぞれクエンチング抵抗が接続されていて、出力電流が流れるようになっている。すべての APD ピクセルは 1つの読み出しチャンネルにつながっているため、それぞれの APD ピクセルから出てきた信号は重なり合い、1つの大きな信号となる。この信号の高さや電荷量を測定することにより、MPPC が検出した光電子の数を見積もることができる。

1つの光電子が入射したときに検出される信号が 1 photoelectron (p.e.) である。

### 2.1.2 MPPCの基礎特性

- 増幅率 (Gain)

1つのピクセルのガイガー放電による電子の増倍率として定義できる。増倍率は

$$\frac{1 \text{ ピクセルが出力する電荷量}}{\text{素電荷}}$$

で表すことができる。MPPCの増倍率は $10^5 \sim 10^6$ となっている。

- ダークノイズ

MPPCは固体素子なので、主に熱励起による電子が電子雪崩を起こすことにより発生すると考えられている。このため、ダークノイズの大きさは1 p.e.相当であり、光子が1個入射したときと見分けがつかない。

- ピクセル間クロストーク

ピクセル間クロストークとはあるピクセルで電子雪崩が発生したとき、その雪崩中で光が発生し、周囲のピクセルに伝播して、別の電子雪崩を引き起こすことである。この現象が頻繁に起きると、MPPCの出力が実際に検出されるべき信号より大きくなってしまう。この問題については現在ピクセル同士を光学的に分離させるなどの改良が進められている。

- 光子検出効率

光子検出効率とは1つの光子の入射による信号を検出する確率のことである。MPPCの光子検出効率は

$$QE \times \epsilon_{\text{Geiger}} \times \epsilon_{\text{geometry}}$$

で表すことができる。ここで、QEは1つの光子に対して電子・正孔の対生成の確率を表す量子効率、 $\epsilon_{\text{Geiger}}$ はアバランシェ増幅を起こす確率、 $\epsilon_{\text{geometry}}$ はMPPCの受光面において光子に対し感度のある有効面積の割合である。

## 2.2 シンチレータ

### 2.2.1 シンチレータの原理

シンチレータとは粒子が通過したときに光を出す物質である。この光をシンチレーション光という。



粒子が通過するとき、物質中の電子が励起状態になる。励起された電子が元の状態に戻るときにシンチレーション光がでる。

広く使用されているシンチレータはヨウ化ナトリウムなどの無機のアルカリハライド結晶、有機の液体、プラスチックである。

### 2.2.2 シンチレータストリップの種類

シンチレータストリップは、クラレのシンチレータストリップと *extruded* のシンチレータストリップの2種類を用いて測定を行った。この2つは製造方法が異なる。クラレのシンチレータストリップは  $1.0\text{cm} \times 4.5\text{cm} \times 0.3\text{cm}$  の大きさに切り出してから波長変換ファイバーを通す穴を開け、表面を研磨するといった機械加工により製造されている。機械加工による製造のため、精度のよいシンチレータストリップの製造が可能だが、コストが非常に高い。一方、*extruded* のシンチレータストリップはチューブのようなもので、幅  $1.0\text{cm}$  で厚さ  $0.3\text{cm}$  のシンチレータを押し出すようにして製造され、 $4.5\text{cm}$  の長さに切る。この製造では自動的に反射材のための  $\text{TiO}_2$  ペイント、波長変換ファイバー（断面積： $1\text{mm}$ ）を通す穴が作られる。よって、コストが低く抑えられ、量産に向いている。電磁カロリメータではカロリメータの細分化により、シンチレータストリップが1千万個程度必要となるので、低コストで製造できる *extruded* のシンチレータを用いる方向で考えられている。読み出し方法としては、波長変換ファイバー読み出し、直接読み出しの2種類を用いた。

## 第3章 シンチレータストリップの光量比較測定

### 3.1 研究目的

シンチレータを用いるカロリメータでは入射したエネルギーを光に変換し、その光量を測定することにより、入射エネルギーを測定する。したがって、ストリップシンチレータの種類、読み出し方法、反射材の種類に対する依存性を調べることを本研究の目的とする。

### 3.2 MPPCのGainの決定

MPPCのGainを求めるには以下の式を用いる。

$$Gain = \frac{d \times S}{e \times A}$$

ここで、 $d$ は1photoelectron (p.e.)の信号に相当するADCカウント、 $S$ はADCの分解能： $0.25pC/count$ 、 $e$ は素電荷 ( $1.6 \times 10^{-19}C$ )、 $A$ は測定に用いたアンプの増幅率 (63倍)である。この式において、ペDESTALと1p.eのピークをガウス関数でフィットし、それぞれのピークの中心値を求め、その差を $d$ とした。

#### 3.2.1 測定方法

MPPCに光を当てなくてもダークノイズにより1p.e.相当の信号が観測可能であるので、MPPCに光を当てない状態で測定を行った。測定のセットアップは図3.1である。測定は恒温槽による温度管理 (設定温度：25 )の下で行った。MPPCに印加するバイアス電圧は78Vに設定し、MPPCからの信号はAMPで63倍に増幅し、ADCに入力し、電荷量を測定する。また、完全に遮光するために装置全体を遮光シートで覆って恒温槽の中に入れ、恒温層全体も遮光シートで覆った。

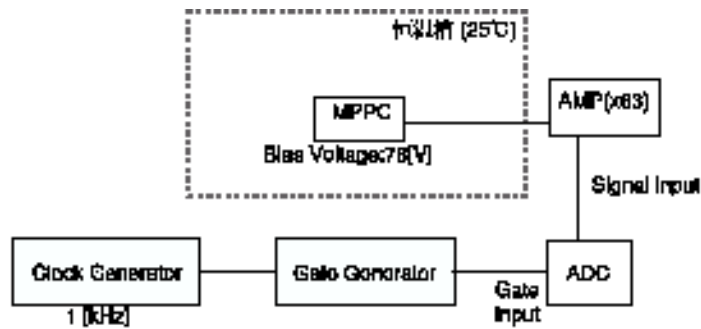


図 3.1: Gain 測定のセットアップ

### 3.2.2 測定結果

Gain の測定結果の ADC 分布は図 3.2 である。右側の ADC 分布は左側の ADC 分布をログスケールにしたものである。

この ADC 分布から、ペDESTAL と  $1p.e.$  の中心値を求めた。その結果より、

$$d = (1p.e. \text{の中心値}) - (\text{ペDESTALの中心値}) = 25.51 \pm 0.03 \quad (\text{ADC counts})$$

という値が得られた。この  $d$  の値を、Gain を求める式

$$\text{Gain} = \frac{d \times S}{e \times A}$$

に代入すると

$$\text{Gain} = (6.33 \pm 0.01) \times 10^5$$

という値が得られた。

### 3.3 シンチレータストリップの光量比較測定

シンチレータストリップの光量  $N_{p.e.}$  を求めるには以下の式を用いる。

$$N_{p.e.} = \frac{M}{d} (\text{photoelectrons})$$

ここで、 $M$  とは  $\beta$  線源  $^{90}\text{Sr}$  を用いて測定したときの ADC カウントをガウス関数でフィットしたときの中心値、 $d$  は ADC カウントにおける  $1 p.e$  に相当する信号である。 $d$  は Gain を求めるときに測定した値  $d = 25.51$  を用いる。

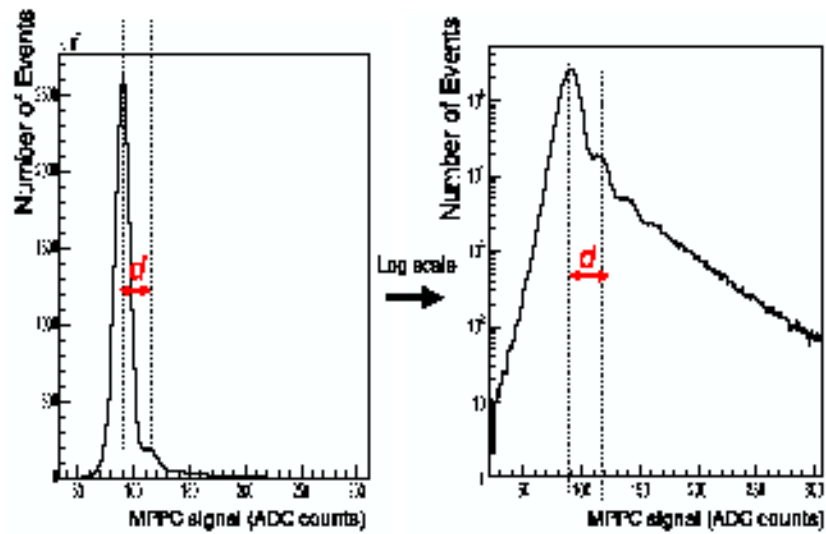


図 3.2: ダークノイズを用いて測定した結果

### 3.3.1 測定方法

この測定で比較したのは

シンチレータ : シンチレータストリップ (クラレ) + 波長変換ファイバー読み出し + radiant mirror film (3M)

シンチレータ : シンチレータストリップ (クラレ) + 直接読み出し + radiant mirror film (3M)

シンチレータ : シンチレータストリップ (extruded) + 波長変換ファイバー読み出し +  $\text{TiO}_2$

の3種類である。

測定のセットアップは図 3.3 である。恒温槽の設定温度は 25℃、MPPC に印加するバイアス電圧は 78V である。また、完全に遮光するために装置全体を遮光シートで覆い恒温槽の中に入れて、恒温槽全体も遮光シートで覆った。

### 3.3.2 測定結果と考察

測定結果として得られた ADC 分布は図 3.4 である。

ADC 分布において、

- ピンク

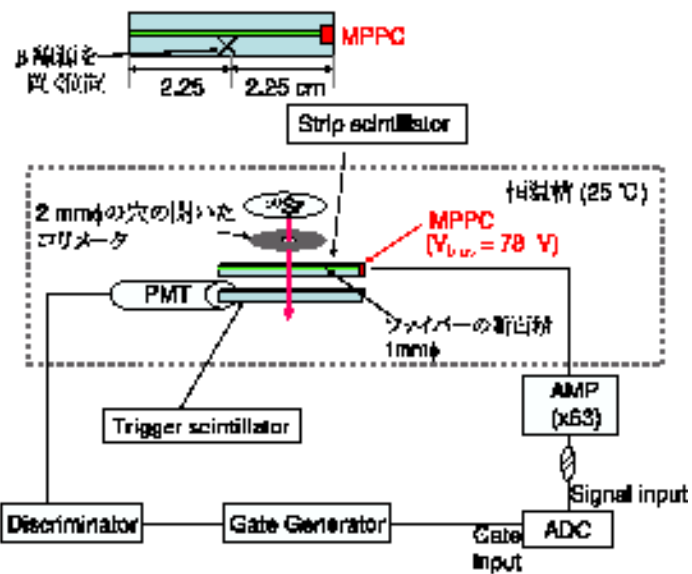


図 3.3: シンチレータストリップの光量比較測定のセットアップ

シンチレータ

- 青  
シンチレータ
- 黒  
シンチレータ
- 赤

それぞれをガウス関数でフィットしたライン

である。ADC 分布より、光量が多い順から、シンチレータ、シンチレータ、シンチレータ となっていることがわかる。

それぞれの結果より、ガウス関数でフィットして求めた中心値の値  $M$  を用いて、光量を求める式

$$N_{p.e.} = \frac{M}{d}$$

に代入すると、光量は

- シンチレータ

$$N_{p.e.} = 25.00 \pm 0.02 p.e.$$

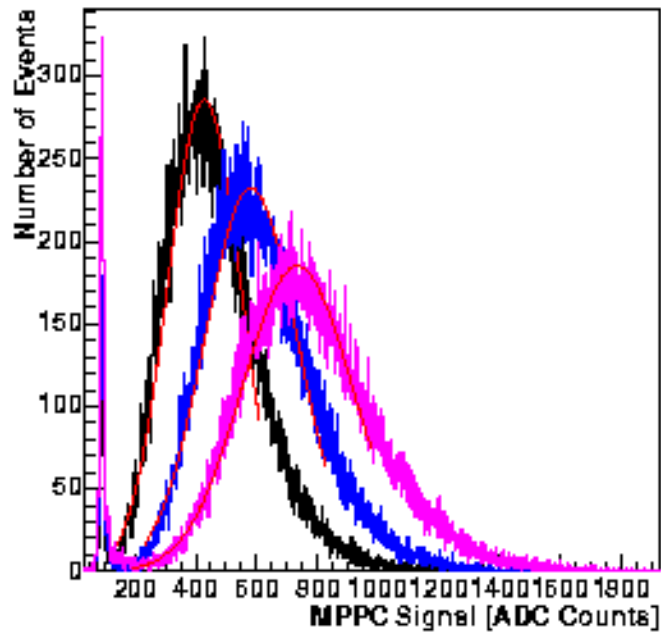


図 3.4: ストリップの光量比較の結果

- シンチレータ

$$N_{p.e} = 18.59 \pm 0.03 p.e.$$

- シンチレータ

$$N_{p.e} = 12.72 \pm 0.02 p.e.$$

となった。この結果により、シンチレータ の光量を基準にすると、シンチレータ の光量が74.8%、シンチレータ の光量が50.8%となっている。よって、シンチレータ の光量は、シンチレータ の光量の約半分とないっていることがわかった。

シンチレータ での光量が少なかった原因として考えられるのは

- WLSF と MPPC の受光面にずれがあった
- 光漏れ

である。

- WLSF と MPPC の受光面とのずれについて

顕微鏡で確認したところ、波長変換ファイバーとMPPCの受光面のずれは少なかった。波長変換ファイバーとMPPCの受光面とのずれに関しては、シンチレータでの測定についても言えることなので、そこまで大きな影響があるとは考えにくい。

- 光漏れについて

extrudedのシンチレータストリップを調べてみると、側面のTiO<sub>2</sub>のペイントがはげていることが確認できた。光漏れしていた可能性がある。TiO<sub>2</sub>のペイントがはげてる様子は図3.5のとおりである。しかし、装置全体と恒温槽全体も遮光シートで覆っていたことより、この光漏れの影響が大きいとは考えにくい。



図 3.5: extruded において TiO<sub>2</sub> がはげている様子

### 3.4 反射材の光量比較測定

光量はシンチレータストリップの光量比較測定と同じように

$$N_{p.e.} = \frac{M}{d} (\text{photoelectrons})$$

の式を用いる。ここで、 $M$ とは $\beta$ 線源を用いて測定したときのADCカウントでの中心値、 $d$ はADCカウントにおける1 p.eに相当する信号である。 $d$ はGainを求めるときに測定した値 $d = 25.51$ を用いる。

#### 3.4.1 測定方法

測定にはクラレのシンチレータストリップを用いた。使用した反射材は

- radiant mirror film (3M)  
厚さ：30  $\mu\text{m}$
- 高性能レフホワイト GR25DM (きもと株式会社)  
厚さ：57  $\mu\text{m}$

の2種類である。

セットアップは図 3.6 である。恒温槽の設定温度は 25  $^{\circ}\text{C}$ 、MPPC に印加するバイアス電圧は 78V である。また、完全に遮光するために装置全体を遮光シートで覆い恒温槽の中に入れて、恒温槽全体も遮光シートで覆った。

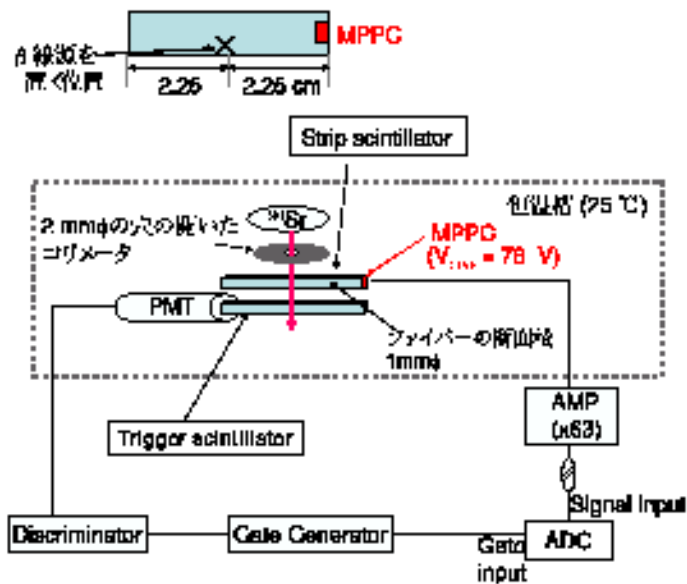


図 3.6: セットアップ

### 3.4.2 測定結果と考察

測定結果として得られた ADC 分布は図 3.7 である。ADC 分布において、

- 青  
radiant mirror film



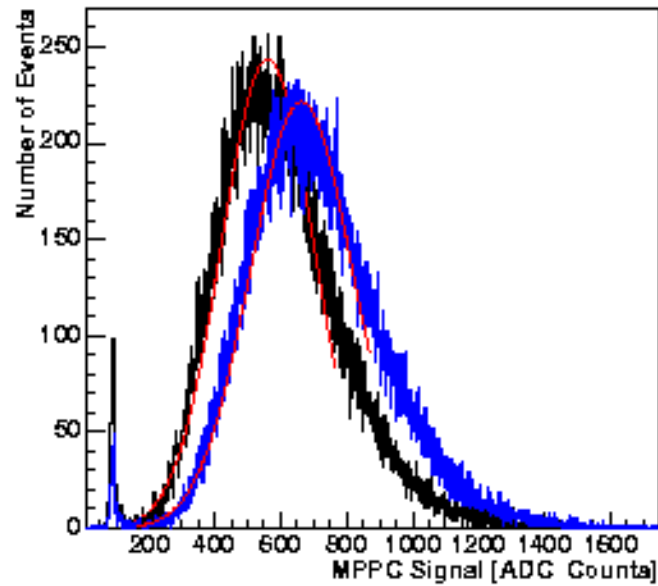


図 3.7: 反射材の光量比較の結果

- 黒  
レフホワイト
- 赤  
ガウス関数でフィットしたライン

である。ADC分布より、**radiant mirror film**の光量が少しレフホワイトより高いことが分かる。

この2つの結果より、ガウス関数でフィットして求めた中心値の値  $M$  を用いて、光量を求める式

$$N_{p.e.} = \frac{M}{d}$$

に代入すると、光量は

- **radiant mirror film**

$$N_{p.e.} = 22.08 \pm 0.02 p.e.$$

- レフホワイト

$$N_{p.e.} = 18.30 \pm 0.02 p.e.$$

となった。**radiant mirror film**での光量を基準とすると、レフホワイトでの光量は82.8%となっている。

測定より、**radiant mirror film**での光量はレフホワイトでの光量より高いことより、光の反射率も**radiant mirror film**のほうが高いといえる。しかし、**radiant mirror film**は現在製造中止になっていることから、大量に反射材を使う測定やビームテストでは用いることができない。レフホワイトの反射率は**radiant mirror film**よりは若干劣るが、82.8%の光量があることより、**radiant mirror film**に近い反射率を持つといえる。したがって、**radiant mirror film**の代わりにレフホワイトを使用することが可能であると判断できる。

### 3.5 ビームテスト

ILCカロリメータグループは高エネルギー加速研究機構(KEK)で富士テストビームラインを使い、2007年11月にビームテストを行った。

#### 3.5.1 富士テストビームライン

富士テストビームラインのビームは電子ビームである。KEKB加速器は電子リングと陽電子リングの2リング構造を持ち、Belle検出器の反対側に電子リングの長い直線部がある。この部分は高い真空度ではあるが、高電流の電子ビームため、わずかな残留ガスなどによる制動放射によってできた光子が大量に発生する。これまでは捨てられてきたこの光子を効率よく取り出し、コンバータで電子に変換する。この電子を実験エリアまで取り出すことによりテストビームを作っている。

#### 3.5.2 測定目的

実験室で行ったストリップシンチレータの光量比較測定ではシンチレータ(extruded) + 波長変換ファイバー +  $\text{TiO}_2$ ペイントの光量が一番低く、一番高い光量を持つシンチレータストリップ(クラレ) + 波長変換ファイバー読み出し + **radiant mirror film**(3M)の約半分であった。また、DESYで行われた前回のビームテストでも同様の結果が出ている。そこで、このビームテストではextrudedのシンチレータストリップの光量が低い原因を探るため、クラレのシンチレータストリップとの性能比較をすることにより、extrudedのシンチレータストリップの性能評価を行うことが目的である。

### 3.5.3 ビームラインの構成

ビームラインの構成は図 3.8 と図 3.9 である。

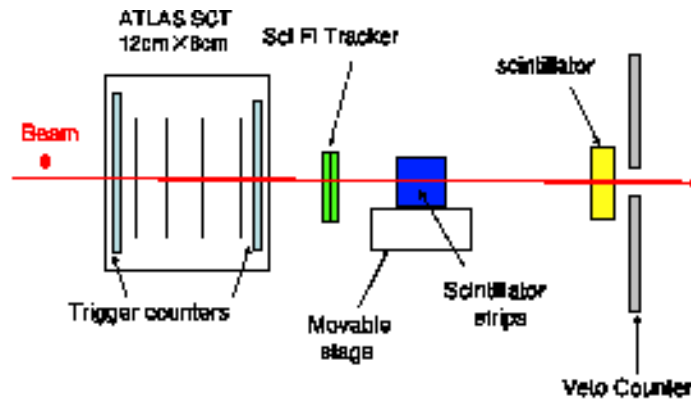


図 3.8: ビームラインの構成

今回のビームテストで使用した電子ビームは

- スポットの大きさ： $\sim 3\text{cm} \times 4\text{cm}$
- エネルギー：3GeV
- レート：15Hz (エネルギーが3GeVにおいて)

である。

### 3.5.4 シンチレータストリップの構成

今回ビームテストに用いたシンチレータストリップは  
シンチレータストリップ (クラレ)

- シンチレータストリップ (厚さ:3mm) + 波長変換ファイバー読み出し + レフホワイト
- シンチレータストリップ (厚さ:3mm) + 直接読み出し + レフホワイト
- シンチレータストリップ (厚さ:2mm) + 直接読み出し + レフホワイト

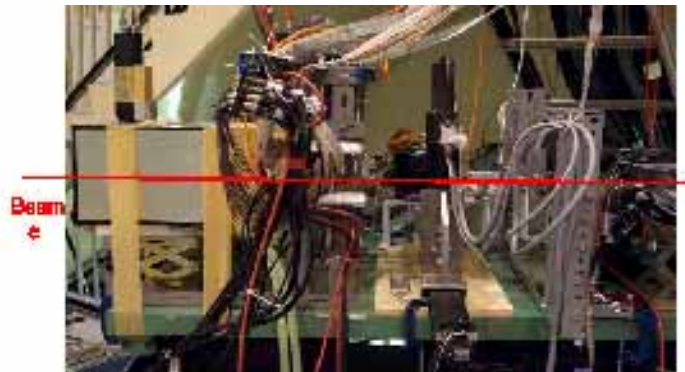


図 3.9: ビームラインの構成 (横から見た写真)

シンチレータストリップ (extruded)

- シンチレータストリップ (厚さ: 3mm) + 波長変換ファイバー読み出し +  $\text{TiO}_2$
- シンチレータストリップ (厚さ: 3mm) + 波長変換ファイバー読み出し + レフホワイト
- シンチレータストリップ (厚さ: 3mm) +  $\text{TiO}_2$

となっている。今回のビームテストでは extruded のシンチレータストリップに  $\text{TiO}_2$  がペイントされていないものが新たに加わった。

extruded のシンチレータストリップには製造方法によりいくつか問題があることがわかっている。

- 断面積が  $1\text{mm}\phi$  の波長変換ファイバーを通す穴が、ファイバーに比べて大きすぎる
- 波長変換ファイバーを通す穴がシンチレータストリップに対して中央に開いていない

今回ビームテストに用いたシンチレータストリップにも同様の問題があった。その様子を図 3.10 と図 3.11 に示す。

図 3.10 より、クラレのシンチレータストリップでは、波長変換ファイバーを通す穴ファイバーと同じ大きさ ( $1\text{mm}\phi$ ) になっている。しかし、extruded のシンチレータストリップでは、波長変換ファイバーに対して

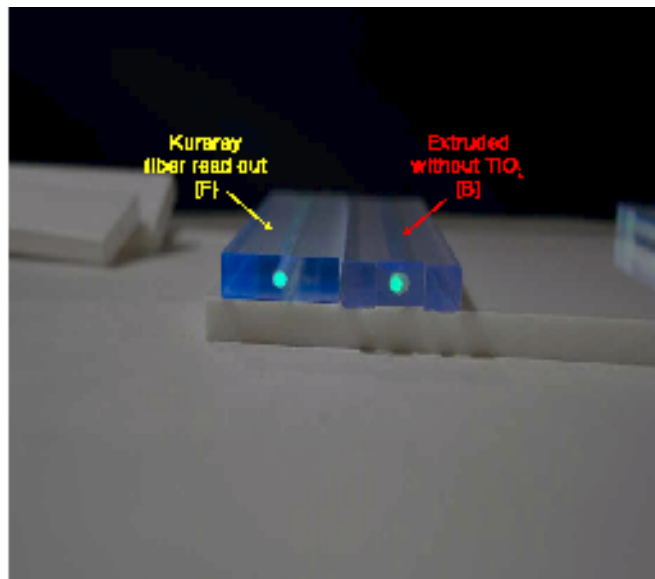


図 3.10: 波長変換ファイバーを通す穴の比較

穴が大きすぎる。これでは波長変換ファイバーの位置が正確に定まらず、MPPCの受光面とのずれを生じる原因となる。

図 3.11 より、波長変換ファイバーを通す穴の位置がシンチレータストリップ（クラレ）では中央にあるのに対して、シンチレータストリップ（extruded）では中央からずれているものもある。これでは波長変換ファイバーの位置が正確に定まらず、このこともまた MPPC の受光面とのずれを生じる原因となる。

したがって、シンチレータストリップを表 3.1 のように構成した。

表 3.1 より、A~Cまでは extruded のシンチレータストリップ、D~Fまではクラレのシンチレータストリップになっている。D は厚さが 2mm、それ以外はすべて厚さが 3mm である。図 3.12 はそれぞれのシンチレータストリップである。

表 3.1 より、A と B の extruded のシンチレータストリップに関しては、それぞれ A1、A2、B1、B2 と 2 種類に分ける。A1 は波長変換ファイバーを通す穴がシンチレータストリップの中央からずれているもの、A2 は中央にあるものである。B1 は波長変換ファイバーに対して穴が大きすぎるもの、B2 は穴の大きさが波長変換ファイバーの断面の大きさとほぼ同じものである。ただし、これらの見分けは人間の目で見えて判断したものである。A1 と A2 の違いは図 3.13、B1 と B2 の違いは図 3.14 のとおりである。

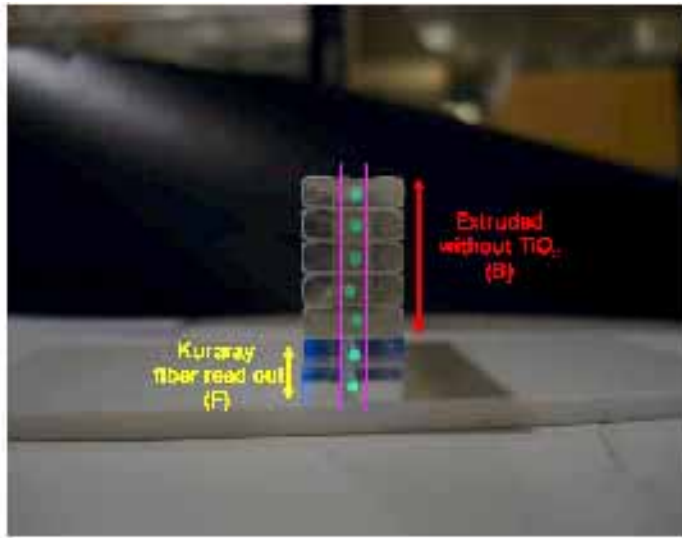


図 3.11: 穴の位置の比較

## 3.6 ビームテストの解析

### 3.6.1 MIP に対する応答

図 3.16~ 図 3.19 は MIP に対する応答を表している ADC 分布である。黒い線は全イベントの ADC 分布、青い線は MIP イベントの ADC 分布で、縦軸はログスケールにしたイベント数、横軸は ADC カウントでの MPPC の信号である。図 3.16~ 図 3.19 は、

#### 1 段目

左：シンチレータストリップ (extruded) 厚さ 3 mm + TiO<sub>2</sub> ペイント + 波長変換ファイバー読み出し 波長変換ファイバーと MPPC の受光面が悪い ただし、今回のビームテストでは波長変換ファイバーなし

右：シンチレータストリップ (extruded) 厚さ 3 mm + TiO<sub>2</sub> ペイント + 波長変換ファイバー読み出し 波長変換ファイバーと MPPC の受光面がよい

#### 2 段目

左：シンチレータストリップ (extruded) 厚さ 3 mm + 反射材 + 波長変換ファイバー読み出し 波長変換ファイバーを通す穴が大きい

右：シンチレータストリップ (extruded) 厚さ 3 mm + 波長変換ファイバー読み出し + 反射材 波長変換ファイバーを通す穴の大きさがよい

#### 3 段目

表 3.1: シンチレータストリップ

	シンチのタイプ	読み出し	遮光	厚さ (mm)	
A1	Extruded	ファイバー	TiO <sub>2</sub>	3	ファイバーなし
A2					ポジション good
B1			反射材		大きい穴
B2					穴の大きさ good
C1			直接		TiO <sub>2</sub>
D	クラレ	直接	反射材	2	
E				3	
F		ファイバー			基準

左：シンチレータストリップ (extruded) 厚さ 3 mm + TiO<sub>2</sub> ペイント + 直接読み出し

右：シンチレータストリップ (クラレ) 厚さ 2 mm + 反射材 + 直接読み出し

4 段目

左：シンチレータストリップ (クラレ) 厚さ 3 mm + 反射材 + 直接読み出し

右：シンチレータストリップ (クラレ) 厚さ 3 mm + 反射材 + 波長変換ファイバー読み出し

となっている。また 1 層につき 4 つのストリップの信号を読み出し、4 つのシンチレータストリップに図 3.15 のように左からストリップ 1 ~ ストリップ 4 と番号をふった。

基準となるのはクラレのシンチレータストリップの波長変換ファイバー読み出しである。なぜなら、MIP イベントとペDESTAL がきちんと分かれていることより、MIP イベントの信号だけをきちんと取り出すことがで

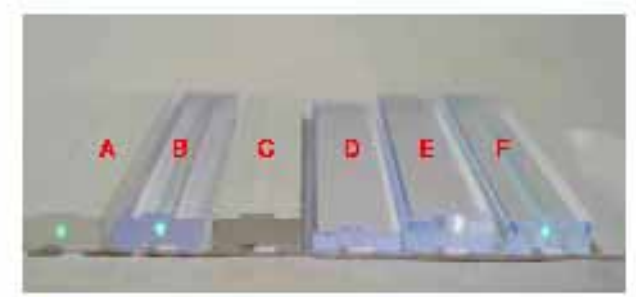


図 3.12: A~Fのシンチレータストリップ

きるからである。ADC分布より、*extruded*のシンチレータストリップに反射フィルムを使った波長変換ファイバー読み出しで波長変換ファイバーを通す穴の大きさが適当なものが、基準のADC分布のようにMIPイベントとペDESTALがきちんと分かれているのがわかる。逆に、波長変換ファイバーを通す穴が大きいものはMIPイベントとペDESTALがはっきりとわかれていない。このことから、波長変換ファイバーを通す穴の大きさは重要であるということがわかった。

### 3.6.2 光量の一様性

図 3.20~ 図 3.23 は光量の一様性を表しているグラフである。縦軸はMPPCの信号（ADCカウント）、横軸はビームの位置（mm）で、シンチレータストリップのMPPC側がグラフの右側、逆側がグラフの左側となっている。

MIPに対する応答のADC分布と同様に、図 3.20~ 図 3.23 は、MIPに対する応答と同じように並んでいる。また、ストリップ1~ストリップ4に関するも同様である。

光量の一様性の結果でもMIPに対する応答の結果と同様にクラレのシンチレータストリップの波長変換ファイバー読み出しを基準とする。なぜなら、MPPC側と逆側で光量にあまり差が小さいからである。





図 3.13: A1 と A2 のシンチレータストリップ (extruded)

extruded のシンチレータストリップに反射フィルムを使った波長変換ファイバー読み出しで波長変換ファイバーを通す穴の大きさが適当なものが、MPPC 側と逆側で光量の差が小さいことがわかる。逆に、波長変換ファイバーを通す穴の大きいものは少し差がある。このことから、波長変換ファイバーを通す穴の大きさは重要であるということがわかった。また、extruded のシンチレータストリップに  $\text{TiO}_2$  ペイントをしてあるのは波長変換ファイバー読み出しで MPPC 側の光量の半分しか逆側での光量がないことがわかる。直接読み出しは MPPC 側での光量と逆側での光量の差が大きい。このことから、反射材については  $\text{TiO}_2$  ペイントよりも反射フィルムのほうが良いことがわかった。

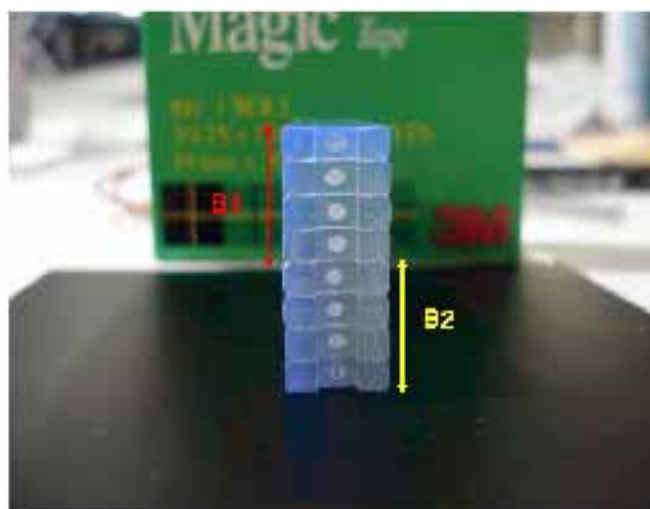


図 3.14: B1 と B2 のシンチレータストリップ (extruded)

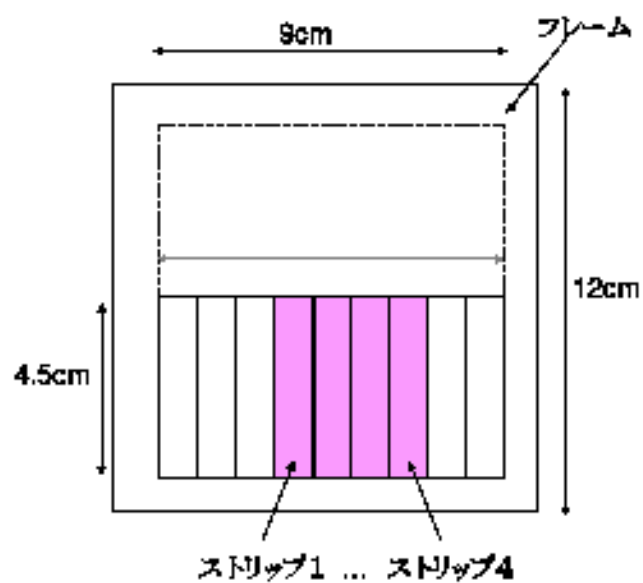


図 3.15: ストリップ1 ~ ストリップ4

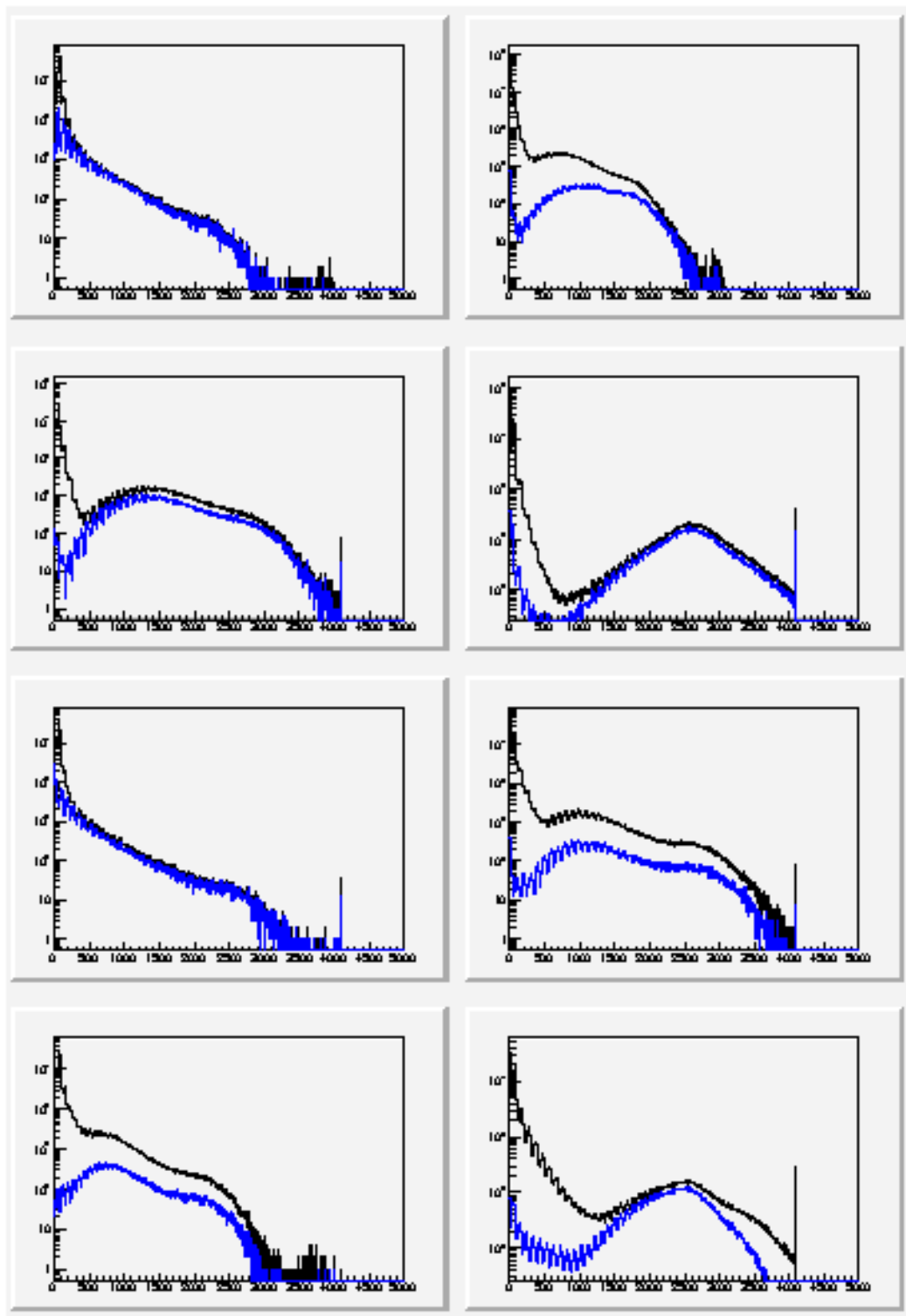


図 3.16: 全イベントと MIP イベント:ストリップ1

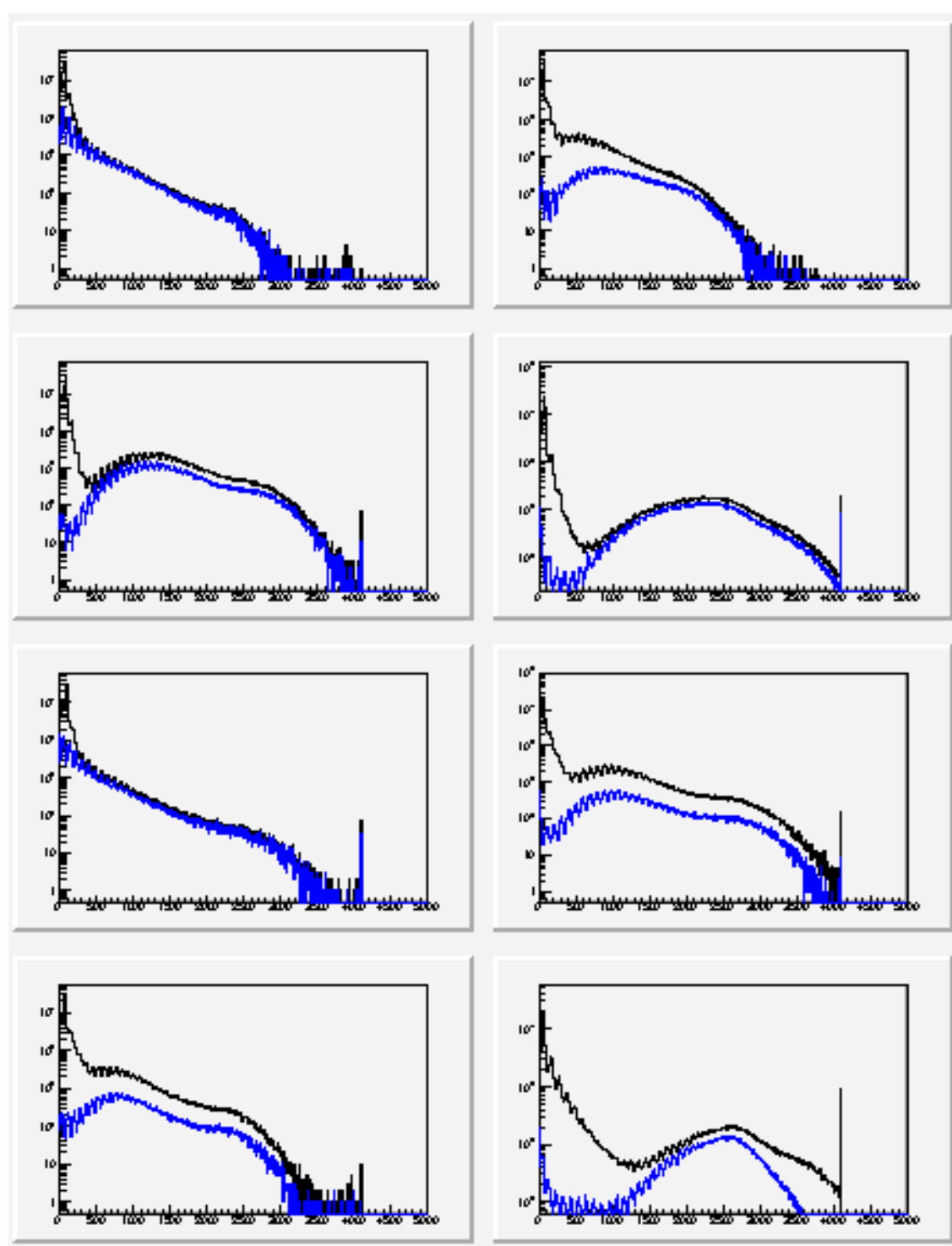


図 3.17: 全イベントと MIP イベント:ストリップ 2

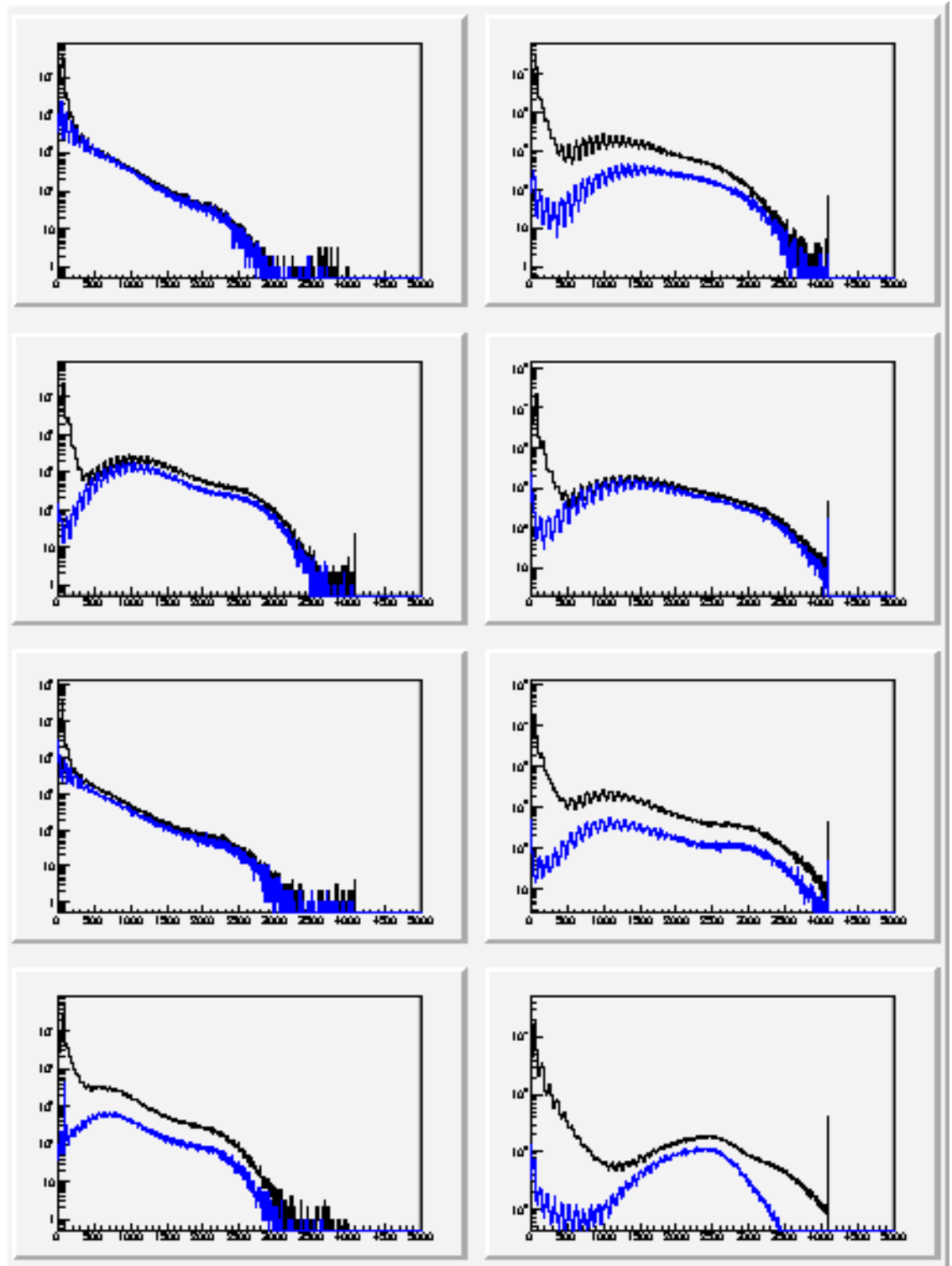


図 3.18: 全イベントとMIP イベント: ストリップ3

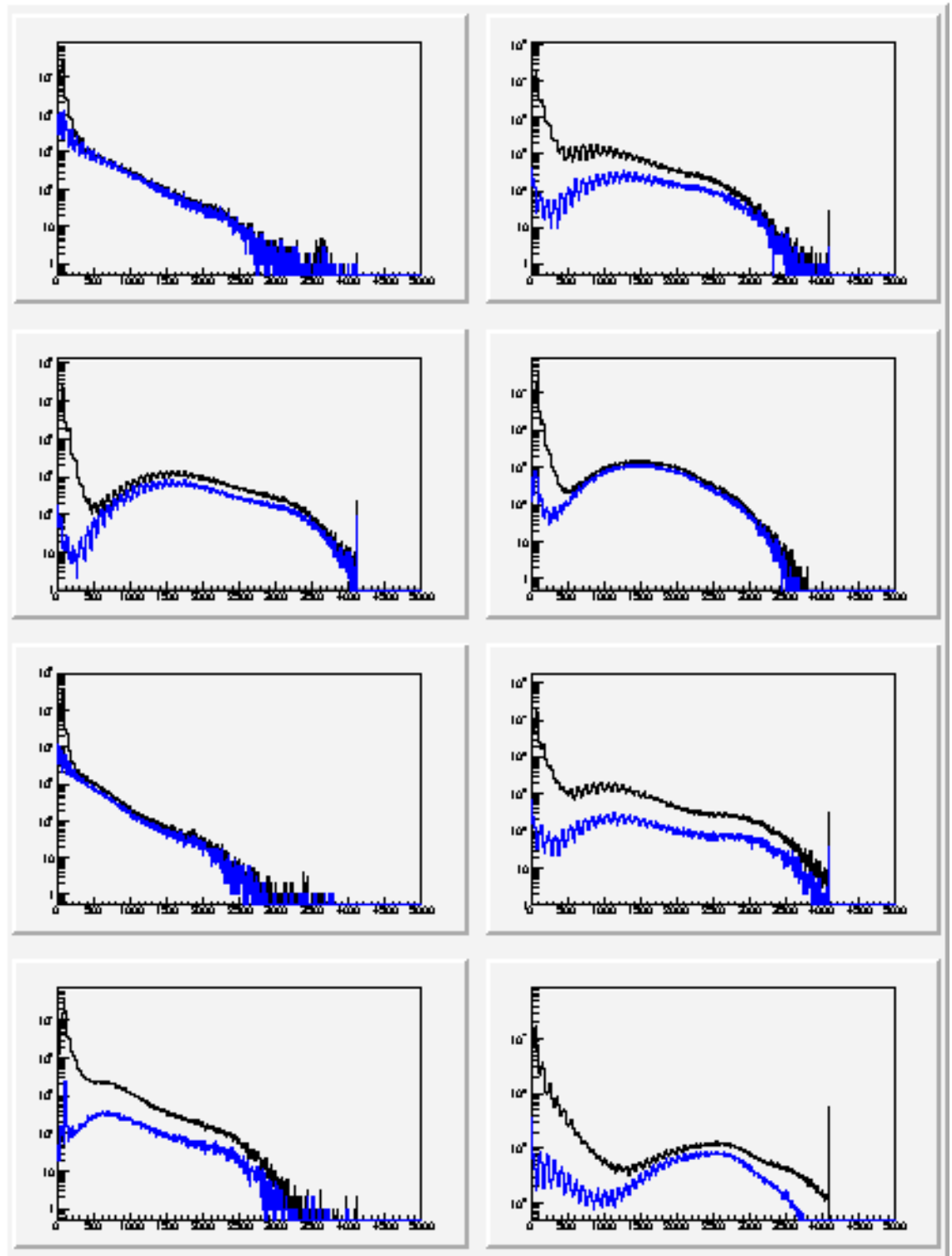


図 3.19: 全イベントとMIP イベント: ストリップ4

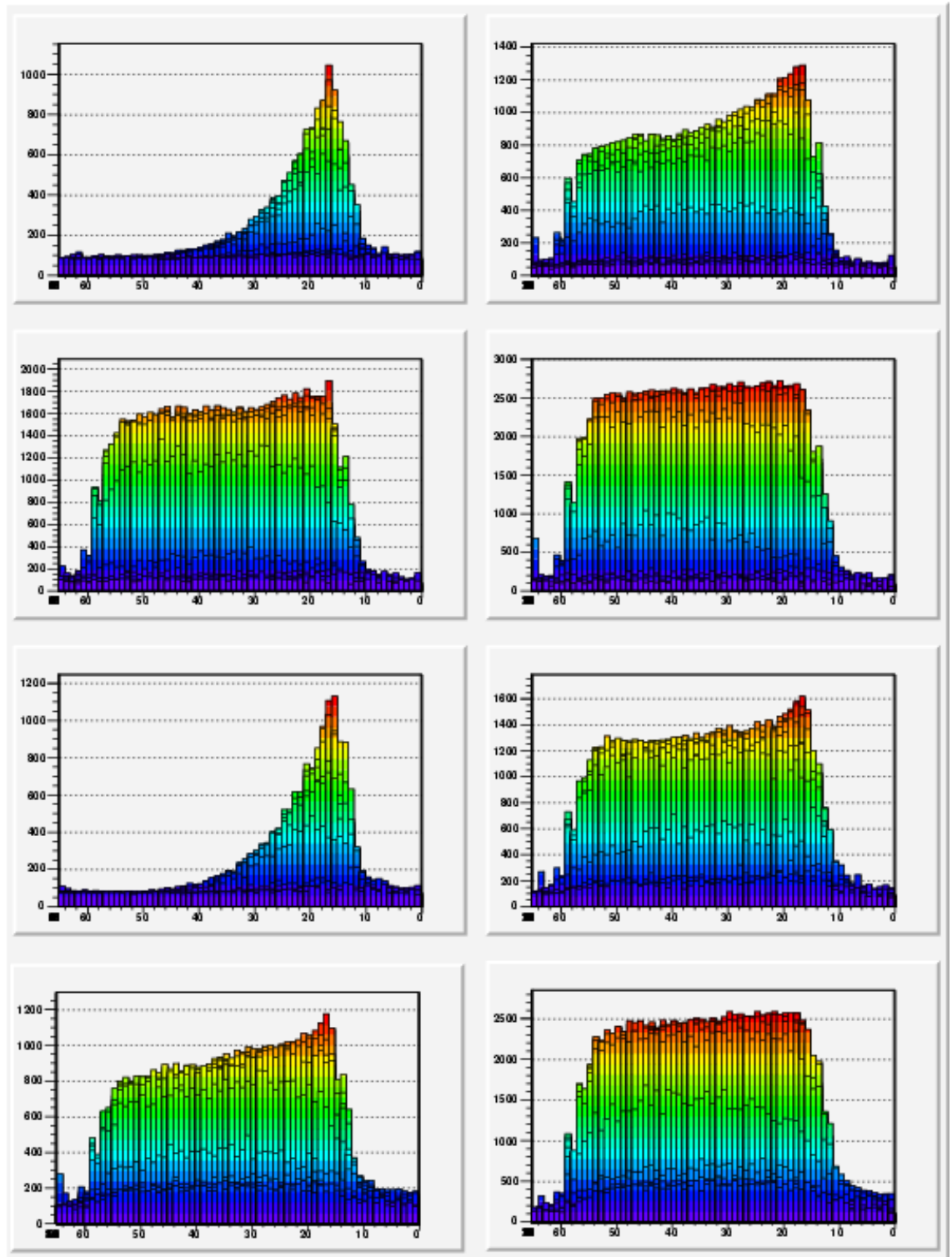


図 3.20: 光量一様性 : ストリップ 1

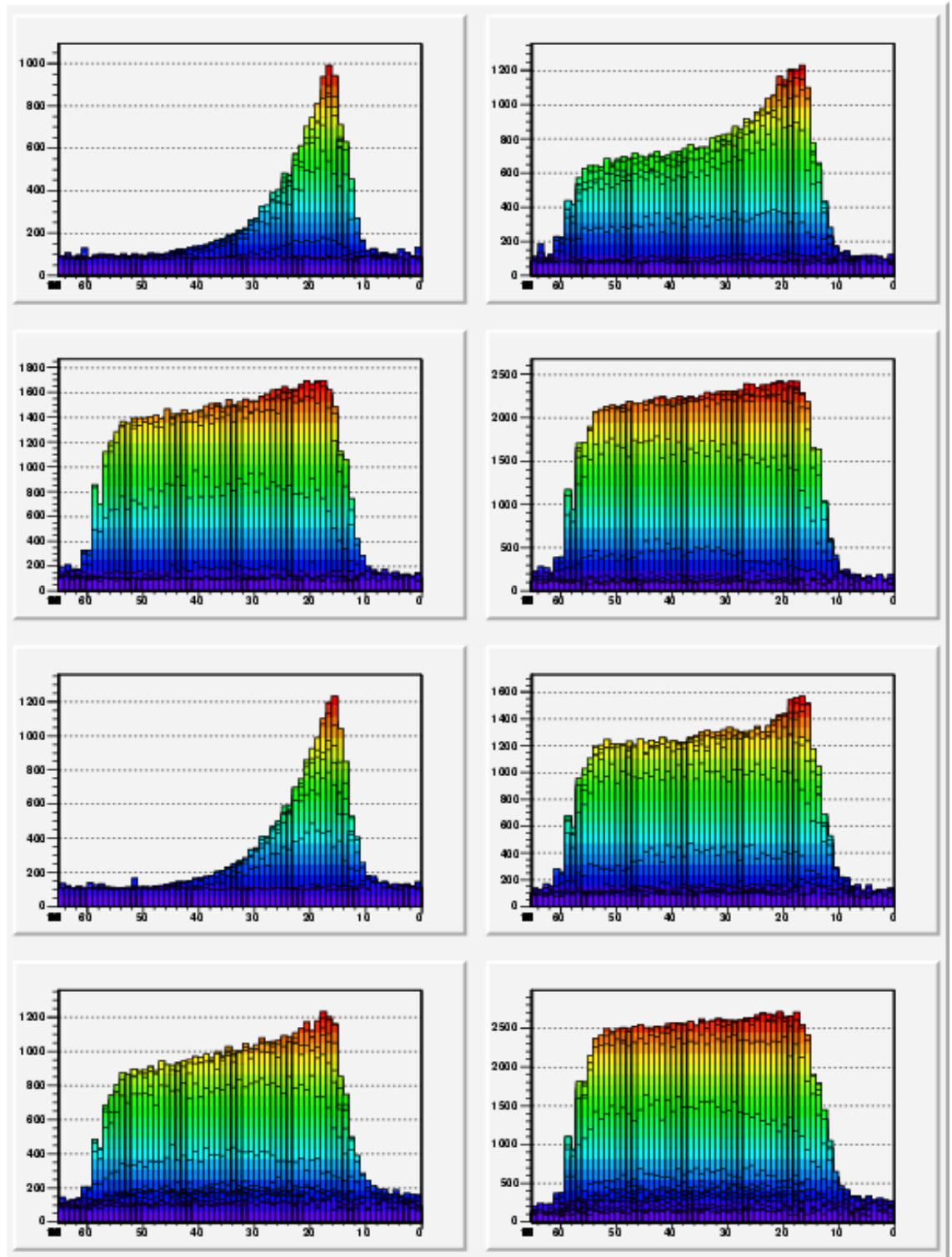


図 3.21: 光量の一様性：ストリップ2



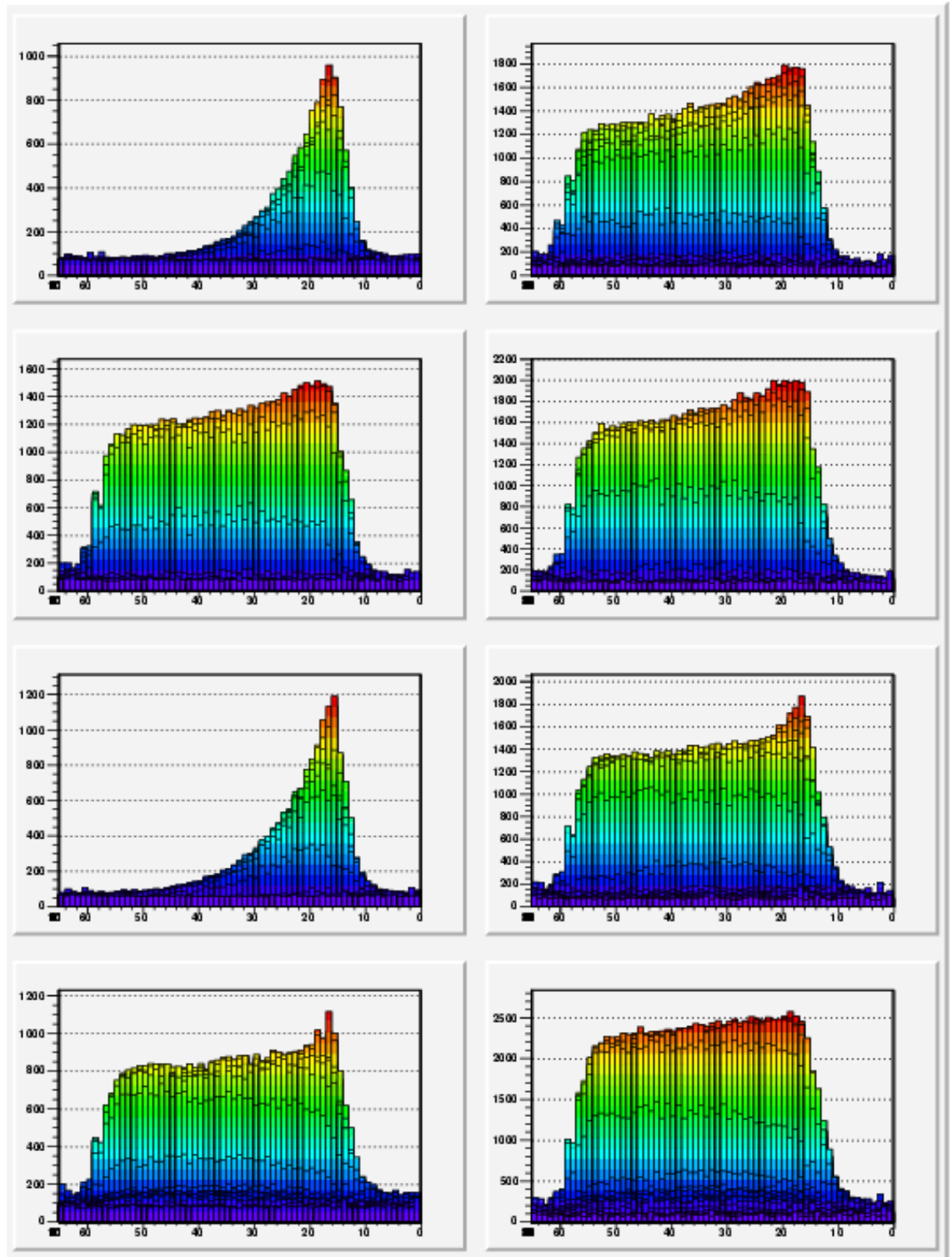


図 3.22: 光量の一様性：ストリップ3

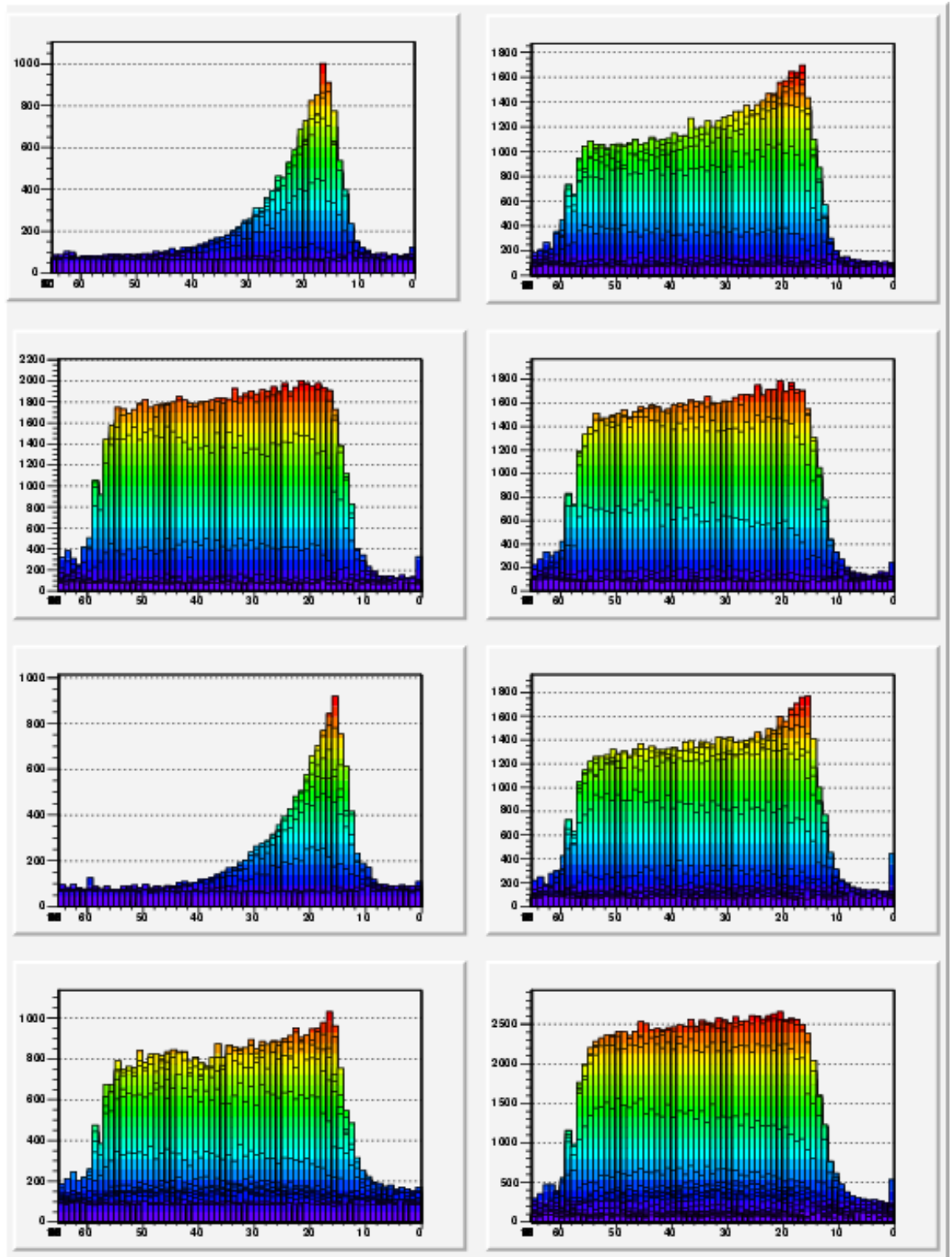


図 3.23: 光量の一様性：ストリップ4

## 第4章 結論

### 4.1 測定結果のまとめ

- ベンチテスト
  - *extruded* のシンチレータストリップの光量はクラレのシンチレータストリップの約半分になっている。
- ビームテスト
  - *extruded* のシンチレータストリップでは、波長変換ファイバーと MPPC の受光面の位置は重要である。
  - *extruded* のシンチレータストリップの反射素材として、 $\text{TiO}_2$  ペイントよりも反射フィルムのほうがよい。

ビームテストでの光量の一様性の結果において、クラレのシンチレータストリップ+ファイバー読み出し+反射フィルムと、*extruded* のシンチレータストリップ+  $\text{TiO}_2$  ペイント+ファイバー読み出しでファイバーと MPPC の受光面の位置が良いものの比較をする。*extruded* のシンチレータストリップでの MPPC の近くでの光量はクラレのシンチレータストリップの約半分程度になっている。しかし、*extruded* のシンチレータストリップの中央での光量は同位置でのクラレのシンチレータストリップの光量の半分以下となっている。これらはベンチテストで得られた測定結果に近い。

### 4.2 今後の課題

ベンチテストとビームテストの結果より、*extruded* のシンチレータストリップは波長変換ファイバーと MPPC の受光面がきちんと合っているものを選び、反射フィルムを使用すれば、GLD カロリメータでの使用が可能であることがわかった。GLD カロリメータで使用するシンチレータストリップの数は 1000 万個以上なので、使えるシンチレータストリップを選ぶという作業は非常に大変である。したがって、これらの問題を解決

するためには `extruded` のシンチレータストリップの改良が必要不可欠である。

## 参考文献

- [1] GLC Project
- [2] 横山将志 魚住聖, Multi Pixel Photon Counterの研究開発  
高エネルギーニュース第26巻3号
- [3] 高エネルギー加速器研究機構, ウェブページ  
<http://www.kek.jp>
- [4] 浜松ホトニクス株式会社, ウェブページ  
<http://jp.hamamatsu.com/>
- [5] 坪川貴俊, MPPCの性能評価方法の研究  
信州大学大学院工学系研究科 修士学位論文 2007年
- [6] 前田高志, リニアコライダー実験用カロリメータのための光検出器  
MPPCの開発研究  
筑波大学大学院 数理物質科学研究科 修士学位論文 2007年
- [7] 原康夫著, 素粒子物理学, 裳華房
- [8] GLENN F.KNOLL 著, 木村逸郎/阪井英次訳, 放射線計測ハンドブック,  
日刊工業新聞社

## 製造会社

- 株式会社クラレ

東京本社

〒100-815 東京都千代田区大手町 1-1-3 大手センタービル

大阪本社

〒530-8611 大阪府大阪市北区梅田 1-12-39 新阪急ビル

- 株式会社きもと

〒160-0022 東京都新宿区 2-19-1

- 3M

〒158-8583 東京都世田谷区玉川台 2-33-1

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、竹下徹教授、長谷川准教授には適切なご指導や助言を頂き、深く感謝致します。

魚住聖さんには技術的、基本的な指導、また神戸へ移ってからも以前と変わらない指導をして頂きました。心より感謝致します。研究室のみなさまにはいろいろと支えになってもらい、本当にありがとうございました。

ILCカロリメータグループのみなさまにはミーティングやビームテストでお世話になりました。ありがとうございました。