

平成 14 年度卒業論文

JLC ストリップファイバー電磁カロリメータに用いる  
マルチアノード光電子増倍管の性能研究

筑波大学第一学群自然科学類 199900441 山内 伸  
主任指導教官 物理学系 受川 史彦

2003 年 2 月

## 概要

電子・陽電子衝突型線形加速器 Japan Linear Collider (JLC) の検出器の一部には粒子のエネルギーを測定する JLC カロリメータがあり，その電磁カロリメータ部にはシャワーから粒子を再構成する際の位置精度を向上させるためにホドスコープ状に配置されたストリップ型シンチレータを用いることが考えられている．

この JLC 電磁カロリメータの開発のため，性能評価用にテストモジュールが製作され，そのビームテストが高エネルギー加速器研究機構陽子シンクロトロン加速器の  $\pi 2$  ビームラインを用いて行われた．その際，モジュールからの信号読み出しには浜松ホトニクス製マルチアノード光電子増倍管 H6568-10 が用いられている．マルチアノード光電子増倍管 (MA-PMT) はアノード部分が分割されており，一本で複数のチャンネル読み出しが可能である．

本研究では，この MA-PMT の性能を評価するために，チャンネル間の応答一様性，線形性，および増幅率等の測定方法の確立，および実際の測定を行った．

浜松ホトニクスのデータシートによるとチャンネル間応答一様性は 14% となっているが，テストモジュールと同じ信号読み出し条件下での測定では，それよりも良い 11% という結果が得られた．応答線形性が 5% 以内で保たれるのは出力電荷が  $\sim 100$  pC までで，200 pC となると， $\sim 20\%$  の線形性からのずれが見られた．さらに，単一光電子に対する信号 (SPP) を直接測定することにより増幅率の絶対値を決定することができた．

# 目次

第1章	序論	1
1.1	物理の概念	1
1.2	JLC 計画	1
1.3	JLC 測定器	2
1.4	JLC カロリメータ	5
1.4.1	カロリメータタワーの構造	5
1.4.2	カロリメータに要求される性能	7
1.5	テストモジュール	7
1.6	本研究の目的	11
第2章	マルチアノード光電子増倍管	12
2.1	光電子増倍管	12
2.2	マルチアノード光電子増倍管	13
第3章	マルチアノード光電子増倍管の特性及び性能評価	17
3.1	測定装置	17
3.2	応答の位置一様性	19
3.2.1	ピクセル内応答一様性	19
3.2.2	ピクセル中心での応答のチャンネル間一様性	27
3.2.3	クロストーク	40
3.3	応答線形性	41
3.3.1	概念	41
3.3.2	電圧の関数としての応答線形性	42
3.3.3	飽和 (サチュレーション)	43
3.4	増幅率	47
3.4.1	概念	47
3.4.2	SPP	48
3.4.3	増幅率	48
第4章	結論	52

# 第1章 序論

## 1.1 物理の概念

高エネルギー物理学の目標は自然の究極の構成要素とそれらの間に働く力の本質的解明にあり，その実証科学としての主要な研究手段は加速器実験にある．これまでの加速器実験において，自然がスピン  $1/2$  の物質粒子であるクォークとレプトンで構成されており，その間にはゲージ対称性が存在することが明らかになっている．ゲージ対称性は，物質粒子とその間の相互作用の在り方を規定する．つまり，ゲージ変換で互いに移り合える物質粒子は一つの多重項を構成し，同一粒子の異なった状態とみなされる．また，このゲージ変換を時空の各点で自由に行っても理論が変わらないという要請から，スピン  $1$  のゲージ粒子の存在と，それによって媒介される普遍的なゲージ力が導き出される．このゲージ対称性として  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  を要求する量子場の理論が標準模型である．この模型の最も本質的な部分である，自発的に電弱対称性  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  を破り質量を作り出す機構を担っているのがスピン  $0$  の基本粒子，未発見であるヒッグス粒子である．

$SU(2)_L \times U(1)_Y$  が自発的に破れるのは  $\langle H \rangle = 246 \text{ GeV}$  というエネルギースケールにおいてであり，それ故にこの値が標準模型の適用限界となる．この限界より上のスケールで適用される理論の一つに超対称模型 (SUSY 模型) 理論がある．SUSY 理論が妥当であるかどうかは， $150 \text{ GeV}/c^2$  以下の質量のヒッグス粒子の存在に依っている．

以上より，標準模型最後の未発見粒子であるヒッグス粒子の発見，そしてヒッグス粒子とトップクォークの性質の詳細な研究が不可欠である．また，標準模型を超える新粒子・新現象の発見・研究が急務とされている．これらの研究には現在よりもさらに高いエネルギースケールでの実験が必要とされている．

## 1.2 JLC 計画

陽子衝突型円形加速器は，陽子の質量 ( $m_p = 938 \text{ MeV}/c^2$ ) が電子の質量 ( $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ ) と比較すると非常に重いため，制動輻射によるエネルギー損失が少なく電子より高いエネルギーまで加速することができる．現在，ヨーロッパにある欧州合同素粒子研究機構 (CERN) では The Large Hadron Collider (LHC) と呼ばれる重心系エネルギー  $14 \text{ TeV}$ ，輝度  $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  の陽子・陽子衝突型円

形加速器の建設が進められている。

電子衝突型円形加速器では、電子の質量が軽いため曲線部で曲げられたときにシンクロトロン放射が起こる。このエネルギー損失は質量の4乗に反比例し、半径の2乗に反比例する。このため、重心系エネルギーが高い加速器を作るためには、曲率を小さくするために広大な土地が必要になる。現在、世界最高エネルギーを記録している電子陽電子衝突型円形加速器は、CERNにあった The Large Electron Positron Collider (LEP) であり、その周長は26.6 km、重心系エネルギーは約200 GeVであった。制動放射によるエネルギー損失の欠点を補うためには、円形ではなく線形の加速器を使えば電子を効率良く加速できる。衝突に費やされるエネルギーを陽子衝突円形加速器と同程度にできる上、新しい物理現象の探索においては陽子衝突型加速器よりバックグラウンドが少ないため、より精密な測定が可能である。

1986年、高エネルギー物理学研究所(現在の高エネルギー加速器研究機構)からヒッグス粒子の発見やトップクォークの精密測定、標準模型を超える物理を研究することを目的とした Japan Linear Collider (JLC) 計画が提案された [1]。この加速器は2つのダンプリングリングと約30 kmの線形の加速器から構成され、電子と陽電子を高エネルギーまで加速し衝突させる。その衝突点にはJLC検出器が置かれ、そこで起こるさまざまな現象を捕らえる。JLC加速器を図1.1に、JLC検出器の外観図を図1.2に示す。第一期計画(JLC-I)では、ヒッグス粒子の発見やトップクォークの精密測定を目標とし、重心系エネルギーは250～500 GeV、ビーム輝度は $1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を目指している。その後、TeV領域へのエネルギー増強をはかる。

### 1.3 JLC 測定器

電子陽電子衝突過程は全重心系エネルギーが反応の素過程に使用されるため、終状態の識別が容易であり、確実な新粒子探索や精密実験ができるという特徴がある。さらに、JLCのエネルギー領域ではジェットのエネルギー集中がますます顕著になり、またカロリメータの分解能も良くなるので、トップ以外のクォークが鋭いジェットとして観測でき、ジェット不変質量によるゲージボソンやトップクォークの再構成が可能となる。このような加速器の潜在能力を100%引き出すためには、終状態に生成されるニュートリノを除く全ての粒子を精度良く検出する高性能の測定器が必要である。

以上の理念より、JLC測定器の満足すべき基本性能が以下のように設定された。

- 1 広い角度領域が測定可能。
- 2 主要な崩壊モードであるクォークジェットへの崩壊において、 $W^\pm$  ボソンと $Z^0$  ボソンがジェット不変質量を用いて識別可能であること。

3 クォークジェットの識別ができる。

4 軽いヒッグス粒子の生成過程 ( $e^+e^- \rightarrow Z^0 H$ ) において,  $Z^0$  崩壊からのレプトン対を使った質量欠損法<sup>1</sup>によるヒッグス粒子の分解能が, ビームエネルギーの拡がり 200 MeV と同等であることを必要条件とする。

1 は三体以上の終状態の事象や超対称性粒子の崩壊等に特徴的な横運動量欠損の存在する事象の測定精度を向上させるためのものである。また, 他の粒子を漏らさず測定することにより, ニュートリノの運動量の間接測定を保証する。2, 3 は終状態を基本粒子で再構成するために必要な性能で, 特に 3 はヒッグス粒子やトップクォークの再構成において重要となる。4 は予想されるヒッグス崩壊幅が数 MeV 程度と狭いため, これを測定するための精度が必要なことによる。

JLC 検出器はバーテックス検出器, 中央飛跡検出器, カロリメータ, ミューオン検出器から成り, ミューオン検出器を除き, カロリメータを含む全ての検出器は超伝導磁石で作られる 2 Tesla または 3 Tesla の磁場中に設置される。これは, カロリメータのエネルギー分解能を上げ, 出来るだけ検出器の不感領域をなくすために必要なことである。

### Electron - Positron Linear Collider JLC - Schematic Diagram -

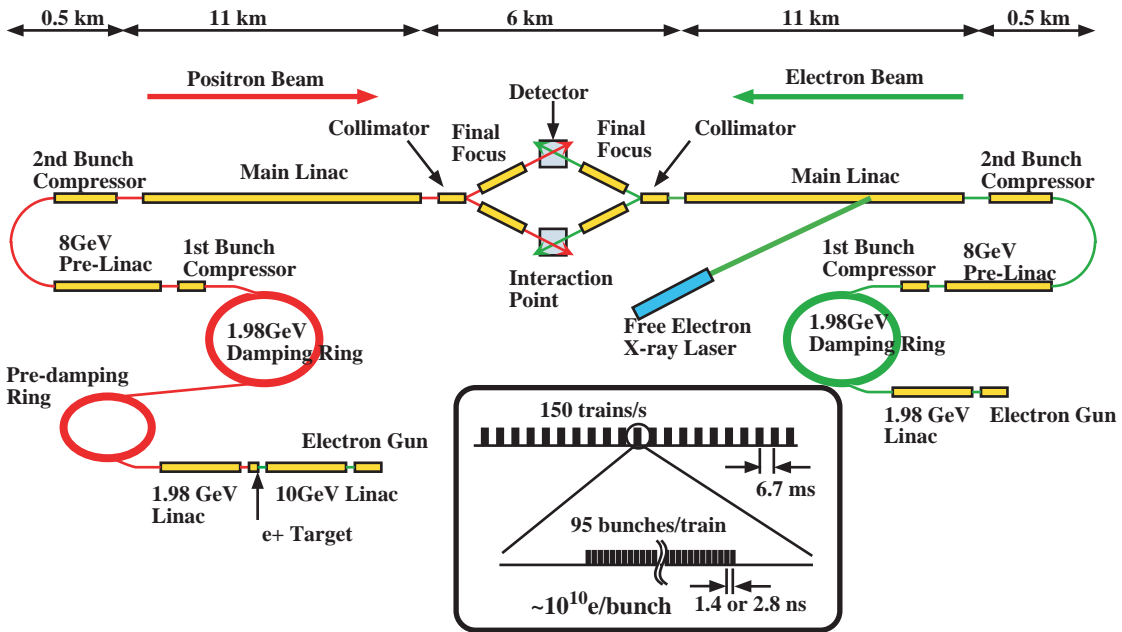


図 1.1: JLC 線形加速器。

<sup>1</sup>終状態 2 体のうちの一方の運動量とエネルギーから, もう一方の質量をエネルギー保存則により計算する方法である。

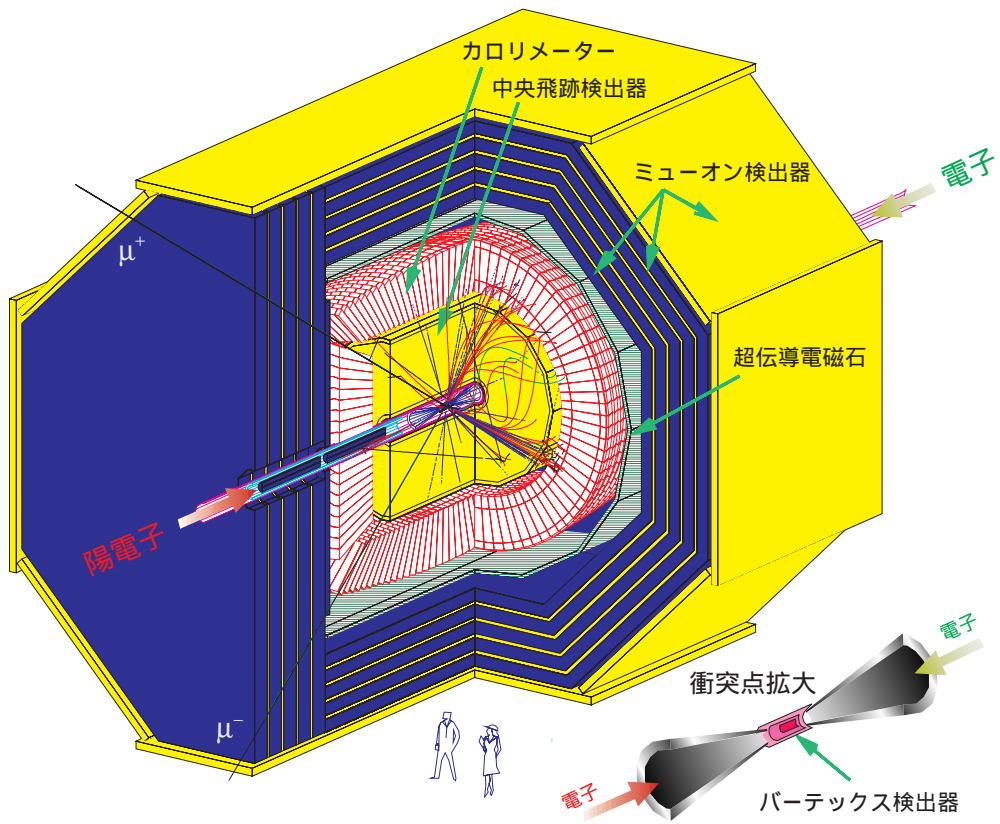


図 1.2: JLC 検出器 .



## 1.4 JLC カロリメータ

カロリメータは衝突により発生した粒子のエネルギーを測定する役割を果たす。ハドロンに対するエネルギー分解能を上げるために、JLC では補償型と呼ばれる鉛とプラスチックシンチレータからなるサンプリングカロリメータを用いる。このカロリメータは、プリシャワー部 (PS)、位置検出部 (SHmax, SHtail)、電磁カロリメータ部 (EMC)、ハドロンカロリメータ部 (HCAL) から構成され、EMC 部は  $27 X_0$ 、HCAL 部は  $6.1 \lambda_I$  の厚さをもつ。ここで、 $X_0$  は放射長、 $\lambda_I$  は原子核相互作用長である。

### 1.4.1 カロリメータタワーの構造

JLC カロリメータのビーム軸に垂直な断面図を図 1.3 に示す。JLC カロリメータはバレルカロリメータとエンドキャップカロリメータからなり、これらのカロリメータは多くのタワーから構成されている。バレルカロリメータタワーの構造を図 1.4 に示す。1 つのタワーは電磁カロリメータとハドロンカロリメータ及び位置測定器からなり、電磁カロリメータ (ハドロンカロリメータ) は奥行き方向に 3 (4) セクションに分かれている。電磁カロリメータは衝突点に近い方からプリシャワー (PS)、EM1、EM2、ハドロンカロリメータは HAD1~4 と名前が付けられ、各セクションごとに信号読み出しが行われる。電磁カロリメータのタワー横方向の長さは、3 Tesla の場合衝突点に最も近いところで 4 cm でありハドロンカロリメータでは 15 cm である。また、電磁カロリメータの厚さは  $27 X_0$  であり、ハドロンカロリメータの厚さは  $6.09 \lambda_I$  である。電磁/ハドロンカロリメータ共に吸収層には鉛、検出層にはプラスチックシンチレータを採用し、アクリル板がシンチレータの補強材として入れられている。鉛板、シンチレータ板及びアクリル板を 1 組として 1 レイヤーとする。さらに、PS と EM1 及び EM1 と EM2 の間、それぞれ  $2.89 X_0$  と  $11.43 X_0$  の位置に位置検出器であるシャワーマックス測定器とシャワーテール測定器が入れている。これらの測定器はストリップ状のプラスチックシンチレータ及びアクリル板から構成されており、電磁シャワーの横方向の広がりを精度良く測定し、電子及び光子がカロリメータに入射した時、それらの入射位置を特定する役割を果たす。また、PS で起きたシャワーの広がり様子から電子や光子とハドロンを区別することもできる。

エンドキャップカロリメータは電磁カロリメータ (1 セクション) とハドロンカロリメータ (1 セクション) からなる。カロリメータを構成する物質の厚さは電磁/ハドロンカロリメータ共にバレルカロリメータと等しく、カロリメータの奥行き方向の深さもほぼ等しい。エンドキャップカロリメータの構造はバレルカロリメータの構造とは異なり、タワーの両端に信号を読み出すためのライトガイドが取り付けられている。また、エンドキャップカロリメータに位置測定器は入れられていない。



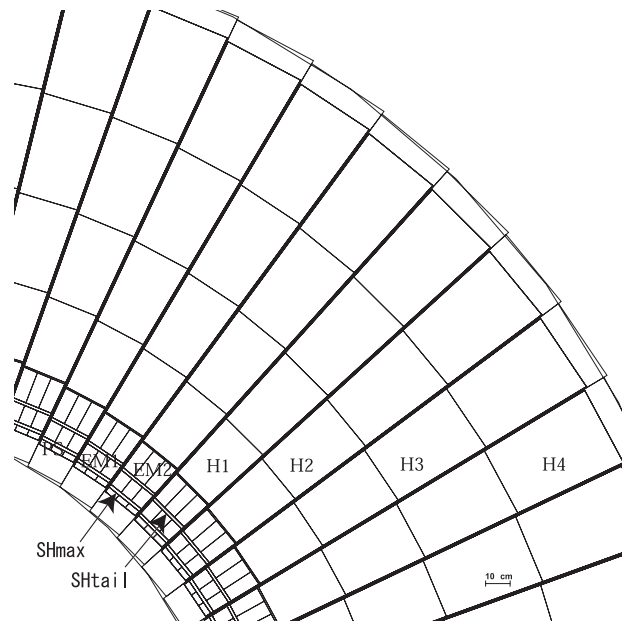


図 1.3: JLC カロリメータのビーム軸に垂直な断面図．電磁カロリメータ 3 セクション (PS , EM1~2) とハドロンカロリメータ 4 セクション (HAD1~4) からなる．PS と EM1 及び EM1 と EM2 の間に位置測定器 (SHmax , SHtail) が入れられる．

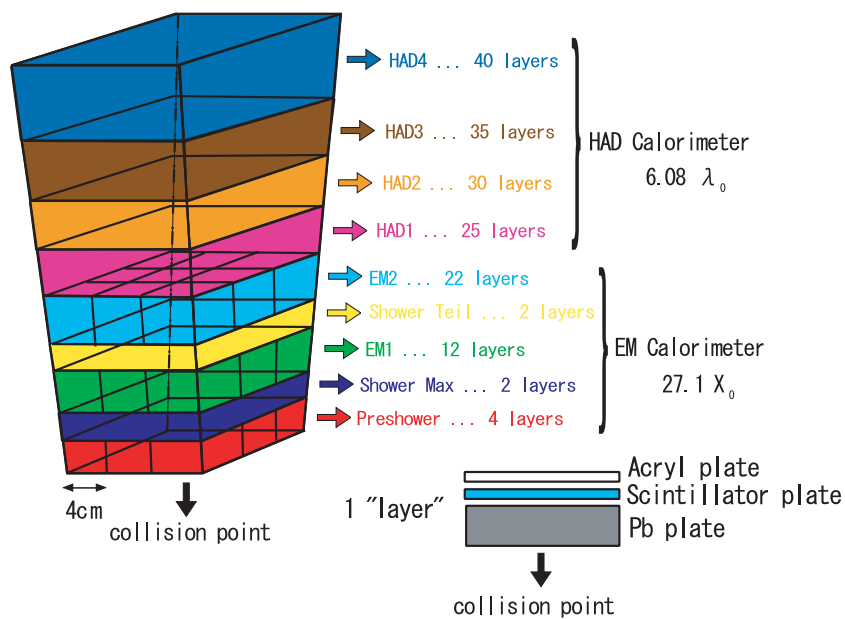


図 1.4: バレルカロリメータタワーの構造．各レイヤーは鉛板，プラスチックシンチレータ板及びアクリル板から構成されている．鉛板とシンチレータ板の厚さの比が 4:1 の補償型カロリメータである．

## 1.4.2 カロリメータに要求される性能

先に述べたように、ヒッグス粒子は主として  $e^+e^- \rightarrow Z^0 H$  の反応で生成される。この反応は  $Z^0$  粒子がレプトン対に崩壊するチャンネルにおいて最も容易に検出されるが、このチャンネルへの崩壊比は全体の 7% しかない。統計精度の高い測定を行うためには 70% もの崩壊比を持つ  $Z^0$  粒子のクオーク対への崩壊を測定すること、すなわちジェットを精度良く測定することが不可欠である。また、 $Z^0$  粒子がジェットに崩壊する反応に対しては、 $W^\pm$  対生成や  $Z^0$  対生成が大きなバックグラウンドとなりうる。 $W^\pm$  対生成はバーテックス測定器を用いた  $b$  タギングによって効率良く除去することができるが、 $Z^0$  対生成チャンネルにおける  $Z^0 \rightarrow b\bar{b}$  の崩壊は、2 ジェットの不变質量分布によってのみ  $H \rightarrow b\bar{b}$  と区別する事ができる。このため、2 ジェットの不变質量を高精度で再構成できる測定器が不可欠である。

$W^\pm$ 、 $Z^0$  を不变質量から識別するために、JLC カロリメータにはエネルギー分解能に対して次の要求がある。

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{15\%}{\sqrt{E}} \oplus 1\% \quad (\text{電子, 光子}) . \quad (1.1)$$

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{40\%}{\sqrt{E}} \oplus 2\% \quad (\text{ハドロン}) . \quad (1.2)$$

ここで  $E$  は GeV 単位であり、 $\oplus$  は二乗和  $A \oplus B \equiv \sqrt{A^2 + B^2}$  を表す。

## 1.5 テストモジュール

JLC 検出器の性能に対する要求を満たすカロリメータの開発のため、テストモジュールが作成され、高エネルギー加速器研究機構陽子シンクロトン加速器の  $\pi^2$  ビームラインにおいて、粒子ビームを用いたテスト<sup>2</sup>を行い、その性能を評価した。

ストリップファイバー電磁カロリメータと呼ばれるストリップ直交型の新デザイン電磁カロリメータテストモジュールの構造を図 1.5 に示す。

波長変換ファイバー (Wave Length Shifting Fiber : WLS) が挿入された  $1 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 2 \text{ mm}$  のストリップシンチレータ (図 1.6) を 20 本ならべ、それに直交して同様に 20 本のストリップシンチレータをならべる。この直交した 2 層のシンチレータはそれぞれ  $x$  軸、 $y$  軸の読み出しとなり、実効  $1 \text{ cm}$  角の粒状度 (グラニュラリティ) を実現している。このシンチレータ 2 層に  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 4 \text{ mm}$  の鉛層を合わせて 1 レイヤーとしている。4 レイヤーを 1 スーパーレイヤーとして第 6 スーパーレイヤーまでである。

ストリップシンチレータで生成された光はシンチレータに挿入された WLS により収集され、同時に長波長 (緑色光) へと変換される。緑色光はクリアファイバー

<sup>2</sup>T517 実験。2002 年 11 月から 12 月にかけて行われた。

を通り光電子増倍管によって読み出される．1 レイヤーに  $20 \text{ strips} \times 2 (x, y) = 40$  本のストリップシンチレータがあり， $4 \text{ layers} \times 6 \text{ superlayers} = 24$  レイヤー存在するので，全体でのファイバーの数は  $40 \times 24 = 960$  本となる．図 1.5 (上) の赤色のストリップのように，同じスーパーレイヤー内の同軸方向，同位置に挿入されたシンチレータ 4 本の信号をまとめて，240 チャンネルの信号を光電子増倍管を用いて測定する．このようにテストモジュール全体で読み出されるチャンネルの数が非常に多いため，光電子増倍管として 1 本で複数のチャンネルの読み出しが可能なマルチアノード光電子増倍管 (MA-PMT) が用いられた．実際に用いられたのは 1 本で 16 チャンネルの読み出しが可能なタイプである．

クリアファイバーと MA-PMT の接続を図 1.7 に示す．4 本のクリアファイバーはまとめられ，MA-PMT の各ピクセル中心に固定されている．その間隔は 4.5 mm となっている．

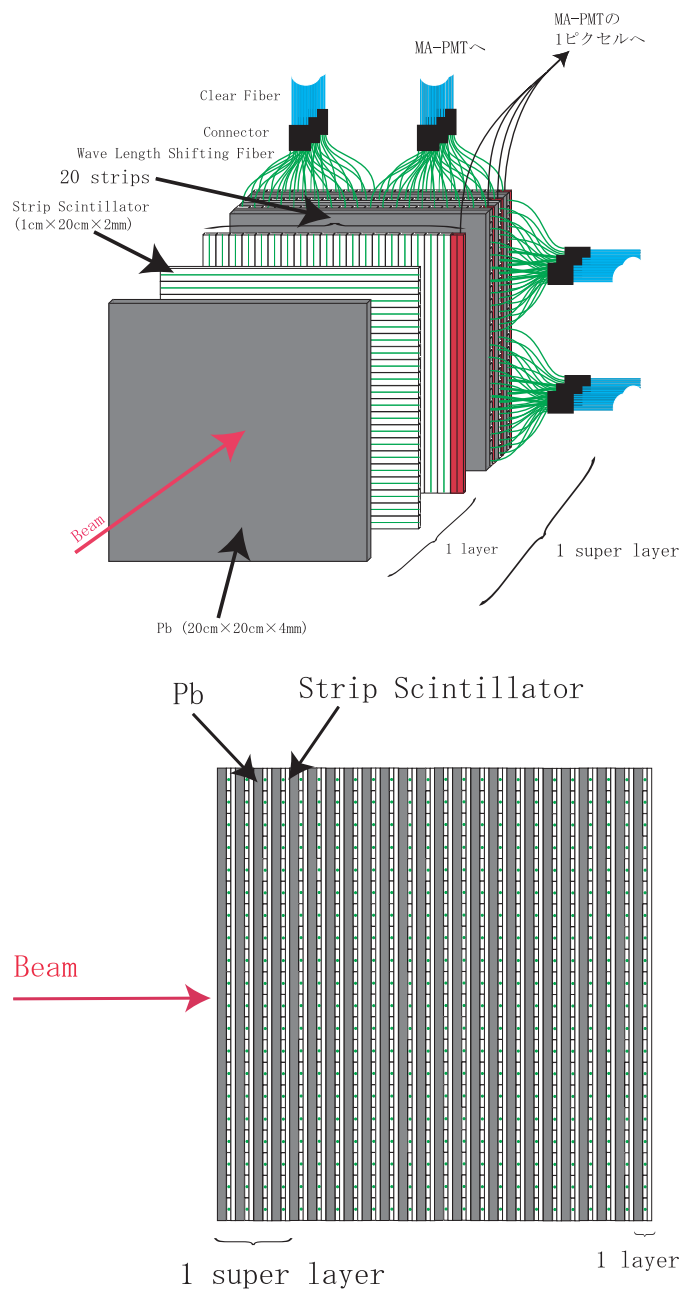


図 1.5: ストリップファイバー電磁カロリメータの構造．1 レイヤーは鉛層とシンチレータ 2 層からなり，1 スーパーレイヤーは 4 レイヤーからなる．図上段の赤色のストリップのように，同じスーパーレイヤー内の同軸方向，同位置に挿入されたシンチレータ 4 本の信号を，まとめて MA-PMT の 1 ピクセルに入射している．

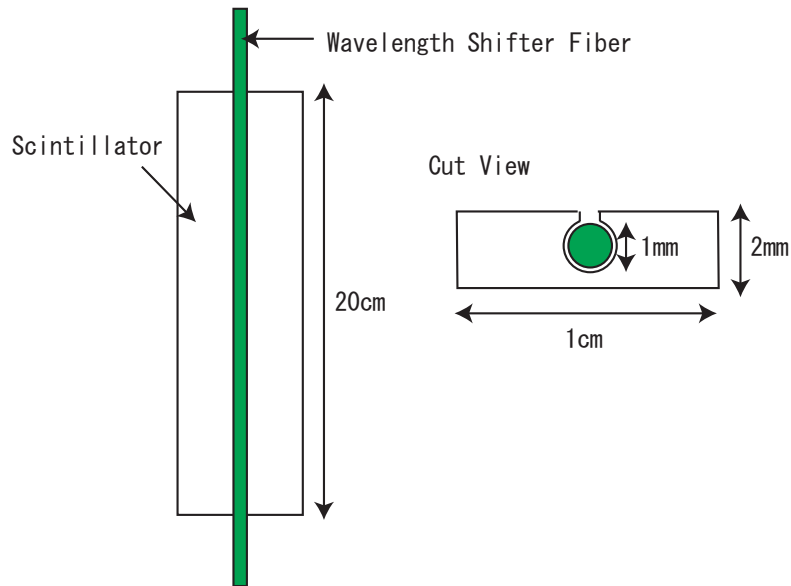


図 1.6: ストリップファイバー電磁カロリメータに用いられたストリップシンチレータ．側面はホワイトペイントされている．

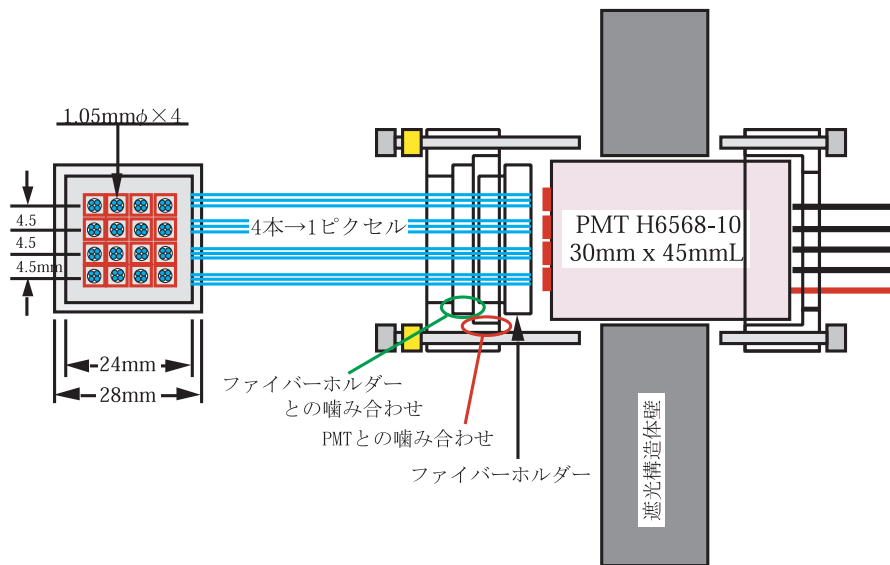


図 1.7: クリアファイバーと MA-PMT の接続．4本のクリアファイバーからの光を MA-PMT の1ピクセルに入射している．

## 1.6 本研究の目的

テストモジュールで用いた MA-PMT は浜松ホトニクス製マルチアノード光電子増倍管 H6568-10 である。読み出しに使用される光電子増倍管において、シンチレータでの光量をできるだけ正しく測定するために重要な要素として次のようなものがあり、それぞれに対してテストモジュールに用いる際の要求がある。

- 応答の一様性  
チャンネル間で、最大の応答が最小の応答の 2 倍以内であること。
- 応答の線形性  
1 チャンネル当たりの出力電荷が 200 pC まで 5% 以内で線形性が保たれていること。
- 増幅率  
 $6 \times 10^6$  の増幅率が得られること。

これらの要素は、応答に一様性がない場合は高精度の測定結果を得ることができない。また、応答に線形性が保たれている範囲で使用しなければ、その出力から正しいエネルギーを見積もることができない。十分な増幅率がないとエネルギー分解能が悪くなる。といった理由で重要となっている。このため、本研究では応答の一様性や線形性、増幅率等の測定方法を確立し、実際にこれらの性能を測定することにより、この MA-PMT のテストモジュールへの適正、およびビームテストでの測定への影響を調べることを目的としている。

本論文の構成は、以下の第 2 章においてマルチアノード光電子増倍管について述べ、第 3 章において MA-PMT のベンチテストによる測定について詳述。最後に第 4 章で結論を述べる。

## 第2章 マルチアノード光電子増倍管

JLC カロリメータテストモジュールに用いられている光電子増倍管は、1本で16チャンネルの読み出しが可能なマルチアノード光電子増倍管である。この章では基本的な光電子増倍管の構造、マルチアノード光電子増倍管の諸性能について述べる。

### 2.1 光電子増倍管

光電子増倍管 (Photomultiplier Tube : PMT) は、光センサの中でも極めて高感度、高速応答な光検出器である。図 2.1 に一般的な PMT の構造を示す。図に示されるように、PMT は光を電子に変換する陰極 (光電面)、集束電極、電子増倍部 (ダイノード)、電子を集める陽極を真空の容器に納めたものである。

光が光電面に照射すると、光電面は光電子を放出する。その光電子は集束電極によって電子増倍部に導かれ、二次電子放出効果によって増倍される。そして、増倍された電子が出力信号として陽極に収集される。この二次電子放出効果による増倍のため、光電子増倍管は、紫外線、可視光、近赤外線の放射エネルギーの測定に使われる受光素子のなかでは際立った感度を有している、また、高速時間応答性、低ノイズ、受光面の大きなものができるなどの特徴がある。

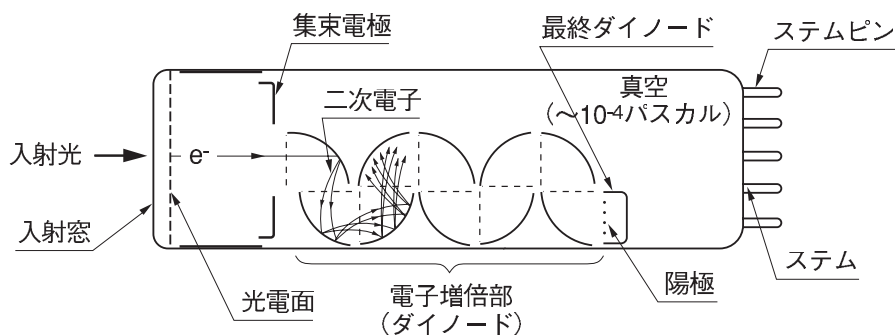


図 2.1: ヘッドオン型光電子増倍管 (ボックス型ダイノード) の断面図。



一方マルチアノード光電子増倍管 (MA-PMT) は、アノード部分が分割されており、一本で十数チャンネルから数十チャンネルの読み出しが可能である。以下に、MA-PMT の長所・短所について述べる。

- 長所
  - 単体で複数の信号が扱えるため、1チャンネルあたりの経費が安い。
  - 通常の光電子増倍管に比べコンパクトである。
  - 磁場特性が優れている。
- 短所
  - 他チャンネルへの信号の漏れであるクロストークの存在。
  - 線形性が悪い。

## 2.2 マルチアノード光電子増倍管

JLC ストリップファイバー電磁カロリメータの信号読み出しに用いられる MA-PMT は浜松ホトニクス製 H6568-10 で、これはメタルチャンネル型のダイノード構造をもつ光電子増倍管 R5900 に高電圧分割回路 (ベース) を組み合わせたモデル名である。メタルチャンネルダイノードはダイノード間が短く、高速応答を実現しており、位置検出にも適したダイノード構造である。その模式図を図 2.2 に示す。位置検出に適したダイノード構造を持つため、アノードを分割することによって多チャンネルを実現している。

ダイノード間の抵抗は直列配列で、供給されている電圧をその比率で分割する。よってベースの抵抗比を変えると、それに対応するダイノード間の電位差が変わる。テーパベースは電子密度の高くなる最終の 2 ~ 4 段の電圧を標準電圧分配より高くなるように設定し、電極間の電位勾配を高め、空間電荷の影響を軽減するようにした電圧分割回路である。そのため飽和を起こしにくい。R5900 にノーマルベースをつけた H6568 についても測定を行った。H6568 と H6568-10 の抵抗分割比を表 2.1 に示す。ベースの違いにより H6568, H6568-10 は性質が異なっている。それは浜松ホトニクスのカタログによると次のようなものである。

- H6568 ノーマルベース  
高い増幅率 (800 V で増幅率が  $3.3 \times 10^6$ ) を得られるが、線形性は 1チャンネルあたりの出力電流で 0.5 mA までである。
- H6568-10 テーパーベース  
同じ電圧での増幅率は  $0.7 \times 10^6$  と前者に比べて低くなるが、線形性は約 10倍良くなっており、5 mA までである。

浜松ホトニクスのカatalogによる H6568, H6568-10 の性質を表 2.2 にまとめた . 又これらの各部のサイズとベースの回路図を図 2.3 に示す . ピクセルの大きさはおよそ  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  で , そのピッチは  $4.5\text{ mm}$  であるが , 厳密には正しくない . その詳しいサイズは図 2.4 のようになっており , 16 個のピクセル間でサイズや形は異なっていて , 外側に位置するピクセルの面積は若干広がっている .

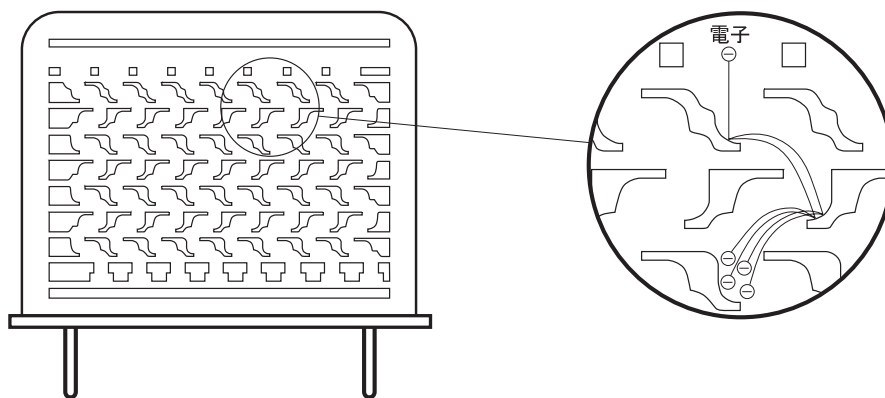


図 2.2: メタルチャンネル型ダイノードの構造 .

表 2.1: ノーマルベースとテーパベースの抵抗分割比 . R1 はカソードと第 1 ダイノード間 , R13 は第 12 ダイノードとアノード間の抵抗 .

抵抗	R1	R2	R3	R5...R11	R12	R13
H6568 (ノーマルベース)	1	1	1	1....1	1	1
H6568-10 (テーパベース)	1.5	1.5	1.5	1....1	2	3.6

表 2.2: 浜松ホトニクスのカatalogによる H6568 および H6568-10 の性質 . 括弧の中は H6568-10 の性質を示す .

チャンネル数	4 × 4
ダイノード構造	メタルチャンネル
ダイノード段数	12
光電面材質	バイアルカリ
最大印加電圧	1000V
量子効率 (480 nm)	15%
増幅率 (800 V)	$3.3 \times 10^6$ ( $0.7 \times 10^6$ )
1チャンネル当たりの応答線形性 (偏差 ±2%)	0.5 (5) mA
クロストーク	1%

Dimensional Outline and Circuit Diagram (Unit: mm)

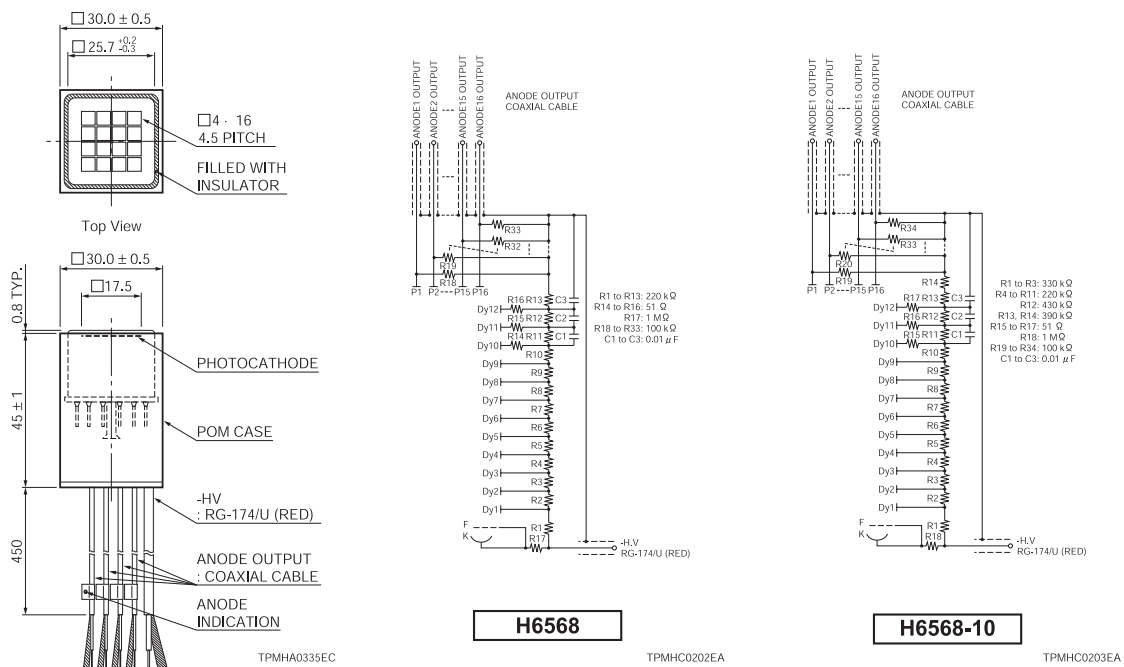


図 2.3: H6568 , H6568-10 の各部のサイズとベースの回路図 . H6568 はノーマルベース , H6568-10 はテーパベースとなっている (浜松ホトニクスのカatalogによる) .

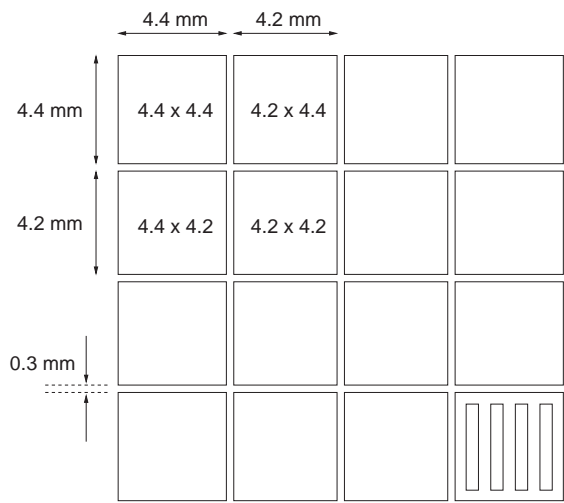


図 2.4: 光電面の各ピクセルの大きさ．すべてのピクセルが  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  の正方形ではなく，16 個のピクセル間でサイズや形が異なっていて，外側に位置するピクセルの面積は若干広がっている．ピクセル間の間隔はすべて  $0.3 \text{ mm}$  である．

# 第3章 マルチアノード光電子増倍管 の特性及び性能評価

カロリメータテストモジュールに用いられている MA-PMT の性能について測定し、評価を行った。第 3.1 節では測定装置、第 3.2 節では MA-PMT の応答一様性、第 3.3 節では応答線形性、第 3.4 節では増幅率について述べる。

## 3.1 測定装置

テストモジュールではストリップ型シンチレーティングタイル中で発生した光はタイルに挿入された波長変換ファイバー (Wavelength Shifting Fiber : WLS) により収集され、同時に長波長 (緑色光) へと変換される。緑色光はクリアファイバーを通り MA-PMT の各ピクセル中心に入射される。本研究の測定装置ではこの状況を再現している上、入射位置を自由に変える事ができる。測定装置を図 3.1 に示す。半導体レーザー<sup>1</sup>を光源に用い、その出力光をクォーツ光ファイバー<sup>2</sup>を通して WLS<sup>3</sup>に入射する。WLS によって長波長に変換された光は MA-PMT とレファレンス用の PMT (H1161GS) に入射される。MA-PMT において WLS からの光は強いので光電面と WLS の間に N.D.1.0 のフィルター<sup>4</sup>をはさんでおり、平均光電子数を  $\sim 1000$  としている。MA-PMT は x-y スキャナー上に固定されており、WLS の端面と光電面の相対位置を二次元的に  $1 \mu\text{m}$  ステップで変える事ができる。スキャナーが問題なく動作するために、MA-PMT ガラス面と WLS 端面との間には  $\sim 1 \text{ mm}$  の空間を空けている。MA-PMT、x-y スキャナー、レファレンス PMT は暗室の中に入れてある。

MA-PMT 及びレファレンス PMT からのシグナルは、CAMAC ADC<sup>5</sup>によってその電荷量を測定する。ADC ゲート幅を  $150 \text{ ns}$  とした。レーザーのトリガー信号の他にクロックジェネレータを用いてゲートを作ることにより、シグナルとペDESTAL とを同時に測定している。測定は、シグナル  $40 \text{ Hz}$ 、ペDESTAL  $10 \text{ Hz}$  の合

<sup>1</sup>浜松ホトニクス製 コントローラ : PLP-02, レーザーダイオードヘッド : SLDH-041 波長  $410 \text{ nm}$  パルス幅  $60 \text{ ps}$

<sup>2</sup>京三製作所製 GI-50/125  $4 \text{ m}$  長。

<sup>3</sup>Kuraray 製 Y11  $0.83 \text{ mm}\phi$

<sup>4</sup>neutral density filter. 光量を  $10^{-x}$  に減らすことができ、N.D.1.0 の場合  $1/10$  となる。

<sup>5</sup>KAIZU 5010  $0.30 \text{ pC/count}$ , ただし SPP の測定においては LeCroy 2249W  $0.25 \text{ pC/count}$  を用いた。

計 50 Hz で測定した．ただし単一光電子に対する信号 (SPP) の測定では，クロックジェネレータを用いたペDESTALの測定は行わずレーザーのトリガー信号のみで 500 Hz で測定した．

本論文においては，光電面上の座標 ( $x$  軸,  $y$  軸)，およびチャンネル番号を図 3.2 のように定義した．MA-PMT の光電面を正面から見ると，右上がチャンネル 1，左上がチャンネル 4，左下がチャンネル 16 となっている．これは光電面のピクセルのそばに刻印されている．

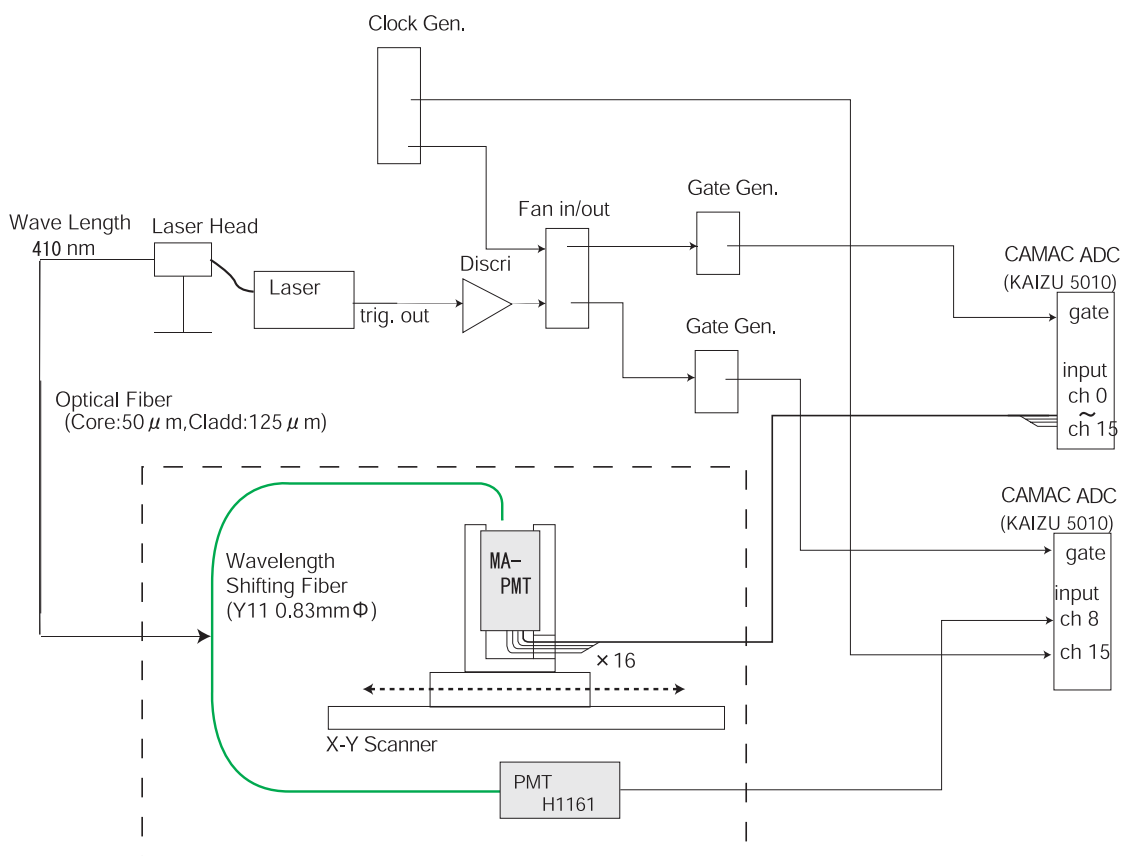


図 3.1: MA-PMT 測定のための装置．破線で囲まれた範囲は暗室の中に入れられている．

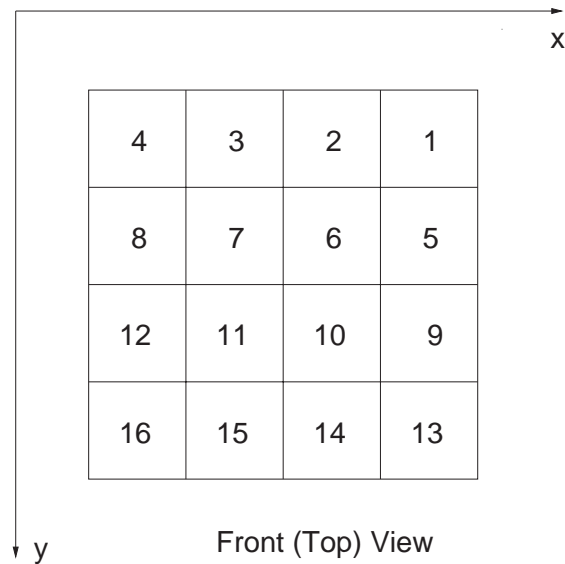


図 3.2: 光電面を正面から見たときのチャンネル番号及び  $x$  軸,  $y$  軸の定義.

## 3.2 応答の位置一様性

MA-PMT の光電面全体の応答一様性について測定を行った。MA-PMT は 1 本で多数の信号を感知し区別する事が可能であり, そのチャンネル間での応答一様性が PMT の性能を決める重要な要素となる。またその構造から, ある一つのピクセルに光が入射したにもかかわらずそのチャンネルではなく, それ以外のチャンネルから応答が出るクロストークがある。そのクロストークについても測定を行った。

### 3.2.1 ピクセル内応答一様性

入射光の光電面上の位置による出力の均一性を応答一様性と呼ぶ。PMT は光電面で放出された電子が次の電極へ効率よく入射するように設計されているが, 収集過程や増倍過程で多少の損失がある。その過程での損失電子の割合は, 光電子が放出される場所によって異なり, 結果として光電面の場所による感度の不均一性を引き起こす。また, 応答一様性は光電面そのものの感度 (量子効率) ムラにも影響される。

光電面全体の詳しい位置応答を見るため, 図 3.3 に示す測定点に WLS からの光が入射するように MA-PMT を移動して入射位置による応答の変化を測定した。MA-PMT の各チャンネルの出力電荷は ADC カウントとして測定されるが, レーザーの出力の時間変動等の寄与を取り除くため, MA-PMT の ADC カウントをレファレンス PMT の ADC カウントで割り, MA-PMT の応答の相対的な変化を精



度良く測定している．印加電圧は H6568 の場合 550 V，H6568-10 の場合 600 V とした．これは 3.3 節で述べる応答線形性の測定から，飽和が起きないように設定した電圧である．

H6568-10 (シリアルナンバー KA2418) のチャンネル 10 のみの測定結果の三次元表示を図 3.5 に示す．これは，1 番高い応答を 1 と規格化して，0.25 間隔で色が変わっている．また，全チャンネルの測定結果を等高線で表したのが図 3.6 である．これも各ピクセルで 1 番高い応答を 1 と規格化しており，0.25 間隔で色が変わっている．さらに 0.05 おきに等高線が引かれている．図 3.7 は図 3.6 を隣のチャンネルの等高線が重ならないように 4 つに分けて表示したものである．同時に光電面と各ピクセルの位置も表示してある．周りの角丸の四角はガラス面の範囲であり，その中の 16 個の四角は各ピクセルを表している．\* 印は各ピクセルの中心を表している．

図 3.6 の断面図として，図 3.3 に示す測定点の中で， $y$  座標 ( $x$  座標) をピクセルの中心付近で固定し， $x$  軸 ( $y$  軸) に沿う測定点での応答を示したのが図 3.8 (図 3.9) である．図 3.4 に示すように， $y=8, 12.5, 17, 21.5$  mm ( $x=7.5, 12, 16.5, 21$  mm) の測定点を用いた．ここでは，MA-PMT の出力電荷を規格化せずに ADC カウントとしてそのまま見ている．実線はピクセル間の境界を，点線はピクセルの中心を示す．

1 チャンネルの応答がそのピクセル内に収まらず，他のピクセルにも染み出しているのが分かる，このクロストークについては第 3.2.3 節で詳しく述べる．ピクセル内の応答一様性は，ほぼ 2 次元のガウス分布をしており，中心付近が一番応答が高いことが分かる．しかし，その形は上下左右で対称ではなく，ピクセルの位置に応じて形が異なっている．光電面の中心の 4 つのピクセルでは，比較的対称性が良く，等高線がきれいな円を描いている．それに対して，外側のピクセルではそれぞれがより外側へ引き伸ばされたような形となっている．そのため外側のピクセルの応答がある範囲は，中心の 4 つのものよりも広がっている．応答の形はゆがんでいるが，ピクセル内で一番応答が高い位置はピクセルの中心とほぼ一致している．図 3.8，図 3.9 からは，チャンネル間で応答の大きさにばらつきがある事が分かる．

これらの性質は KA2418 に固有のものではなく，さらに H6568，H6568-10 の区別に関係なく全ての MA-PMT に共通のものである．

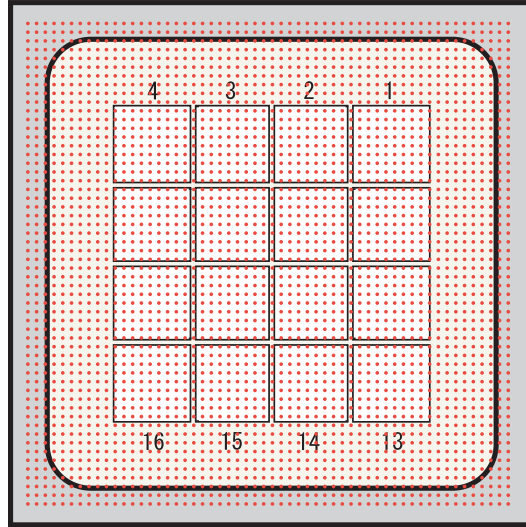


図 3.3: 光電面の詳しい位置応答を見るための測定点．赤い点が測定点であり，それぞれの間隔は 0.5 mm である．測定点は  $56 \times 56$  点ある．周りの角丸の四角がガラス面の範囲でその中の 16 個の四角が各ピクセルを表している．

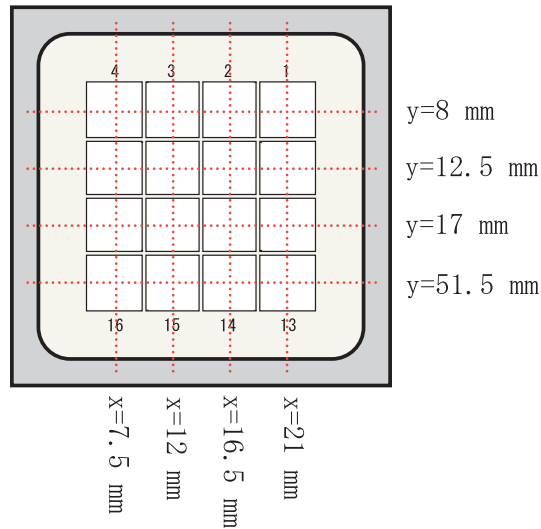


図 3.4: 図 3.3 に示す測定点において， $y$  座標 ( $x$  座標) をピクセルの中心付近で固定し， $x$  軸 ( $y$  軸) に沿うの測定点を抜き出した． $y=8, 12.5, 17, 21.5$  mm の測定点での応答を図 3.8 に， $x=7.5, 12, 16.5, 21$  mm の測定点での応答を図 3.9 に示す．

ka2418:ch10

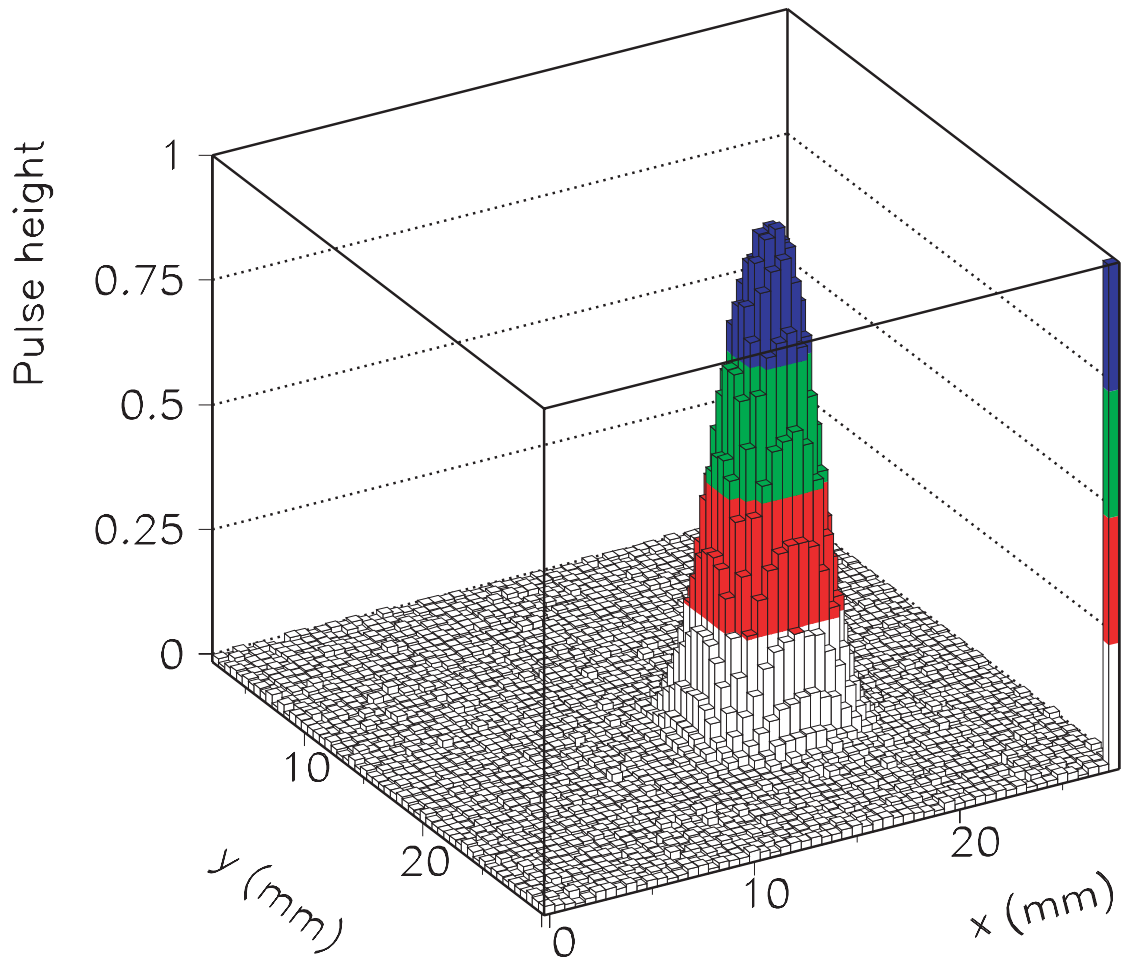


図 3.5: H6568-10 (KA2418) のチャンネル 10 の測定結果を三次元表示した . 1 番高い応答を 1 と規格化して , 0.25 間隔で色が変わっている .

ka2418

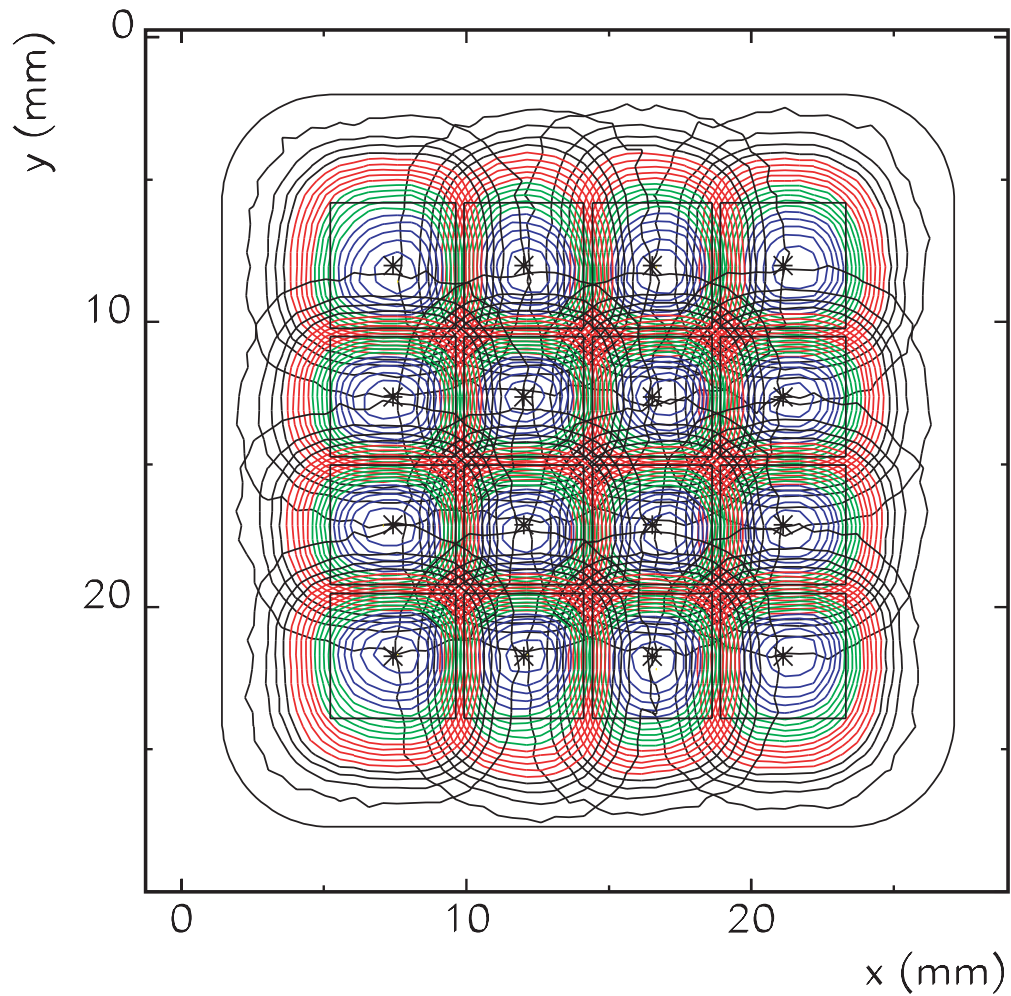


図 3.6: H6568-10 (KA2418) の測定結果を等高線で表した。各ピクセルで 1 番高い応答を 1 と規格化して、0.25 間隔で色が変わっており、0.05 おきに等高線が引かれている。周りの角丸の四角はガラス面の範囲であり、その中の 16 個の四角は各ピクセルを表している。又、\*印は各ピクセルの中心を表している。

ka2418

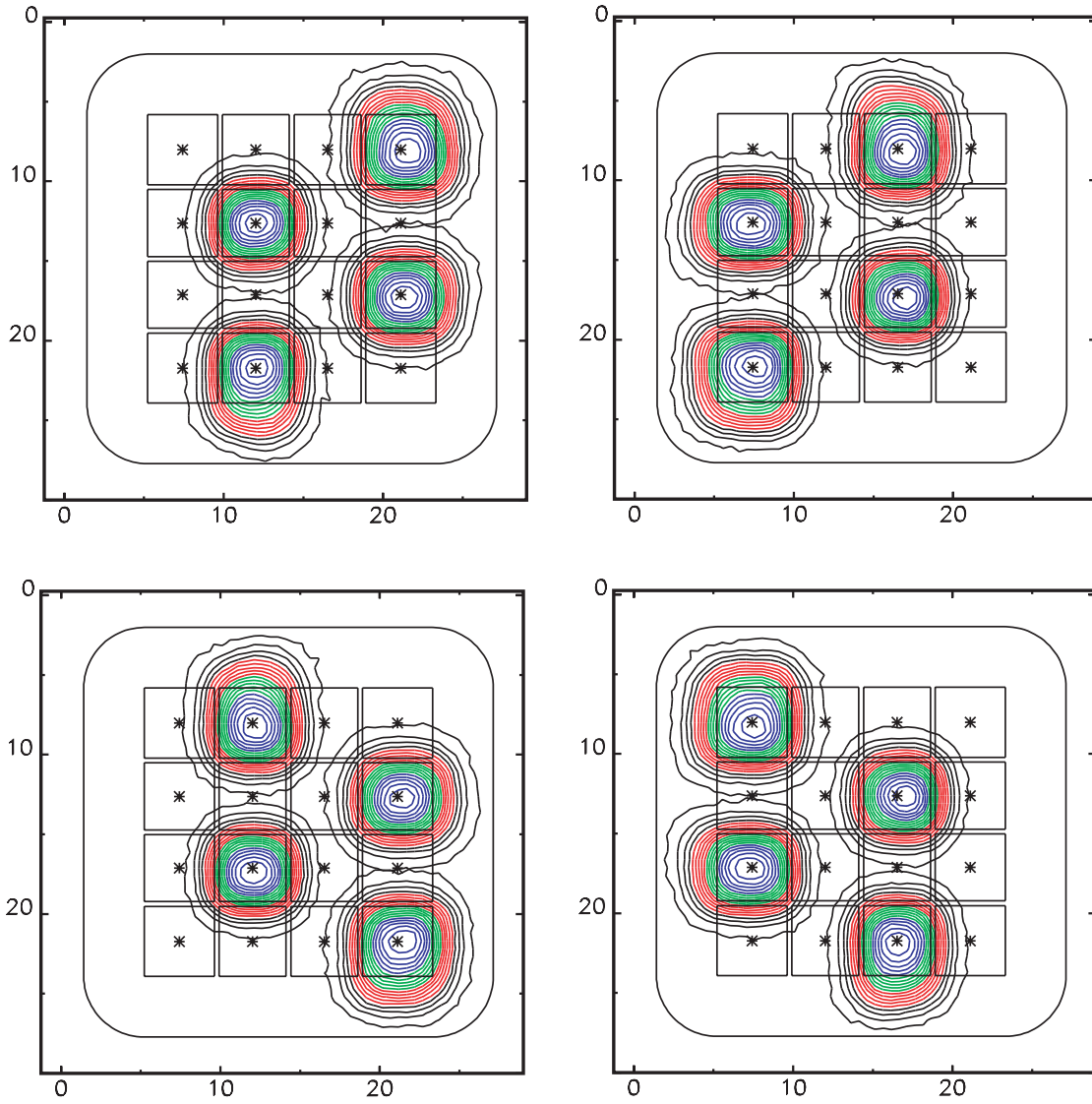


図 3.7: H6568-10 (KA2418) の測定結果 (図 3.6) を隣のチャンネルの等高線が重ならないように 4 つに分けて表示した .

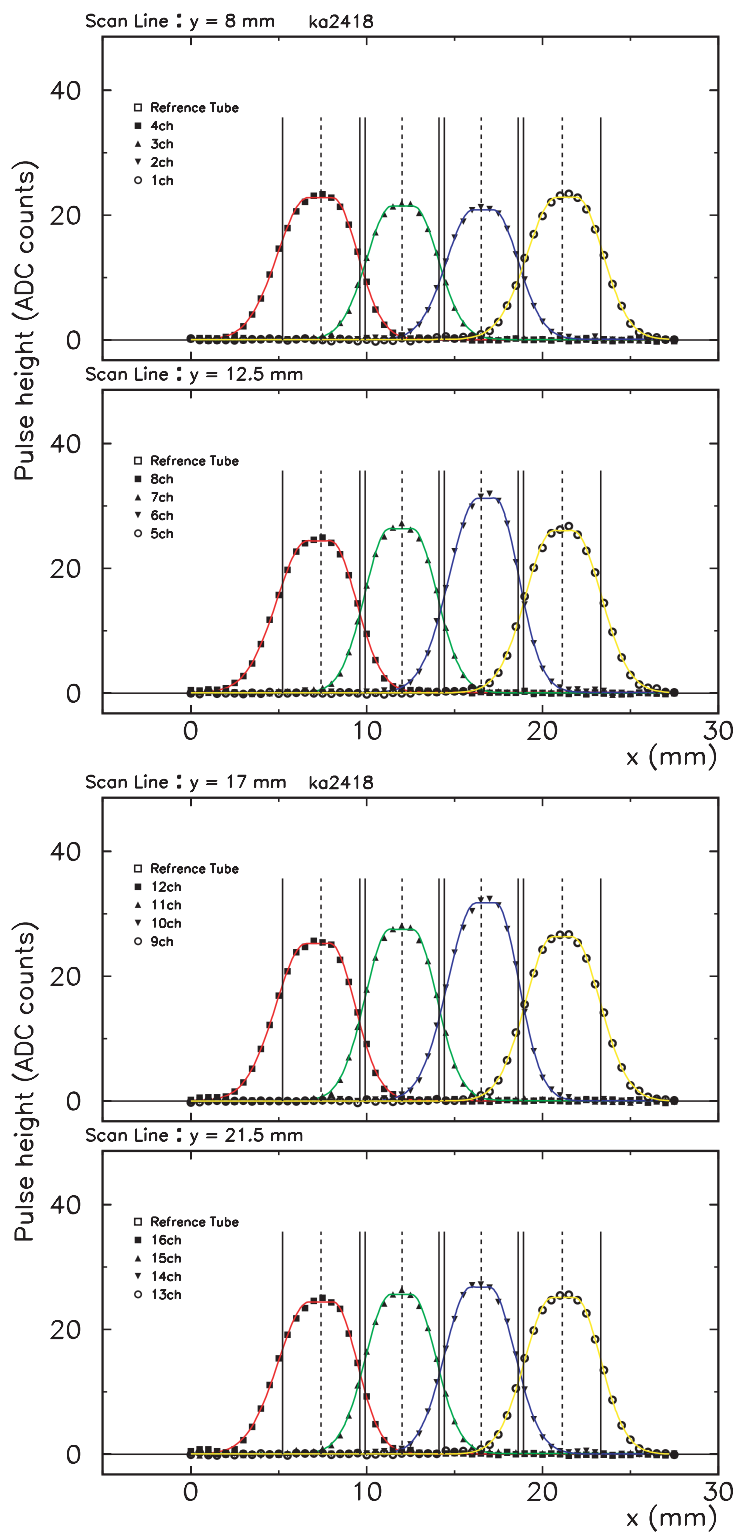


図 3.8: H6568-10 (KA2418) の測定結果．光電面上の  $y$  座標をピクセルの中心付近で固定し， $x$  軸に沿う測定点での応答の大きさ．実線はピクセル間の境界を，点線はピクセルの中心を示す．

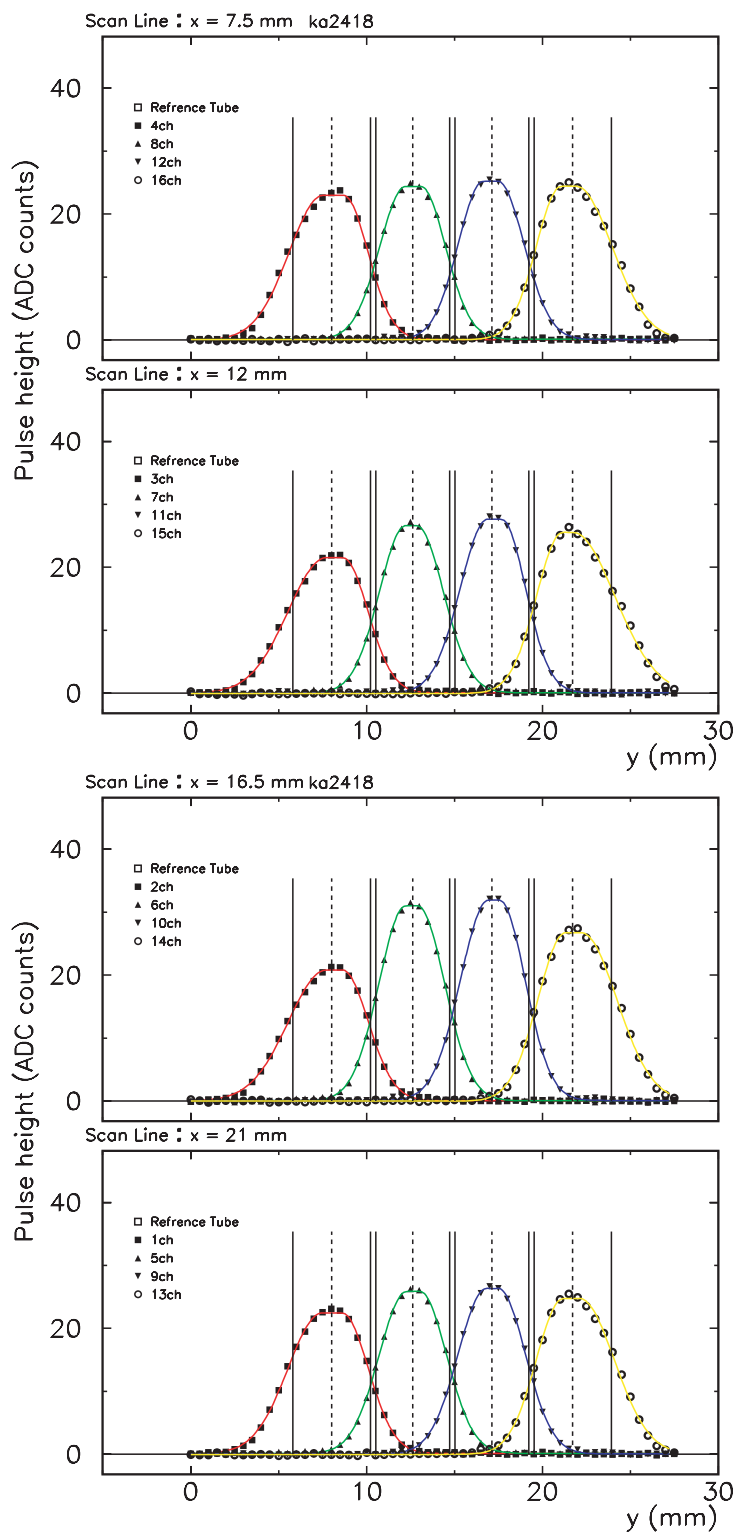


図 3.9: H6568-10 (KA2418) の測定結果．光電面上の  $x$  座標をピクセルの中心付近で固定し， $y$  軸に沿う測定点での応答の大きさ．実線はピクセル間の境界を，点線はピクセルの中心を示す．



### 3.2.2 ピクセル中心での応答のチャンネル間一様性

テストモジュールでは各ピクセルの中心にファイバーを固定して MA-PMT を使用する．そのため各ピクセルの中心に光を入射したときのチャンネル間の応答一様性が重要となる．MA-PMT の応答には，PMT 間，チャンネル間でばらつきがあり，またカロリメータ自体の応答にもストリップ間でばらつきがあるので，カロリメータで入射粒子のエネルギーを測定する際，MIP 粒子<sup>6</sup>を用いたエネルギー較正を行う．このように，チャンネル間の応答非一様性は較正により解決される．しかしそれには限界があり，あるチャンネルでは適切な増幅率を得ているにもかかわらず，別のあるチャンネルでは飽和を起こしている，または十分な増幅率が得られていないというように，応答に一様性がない場合は高精度の測定結果を得ることはできない．1本の MA-PMT 内のチャンネル間応答一様性は構造上の問題であるので変えることは出来ないが，複数の MA-PMT を使用する場合，印加電圧を適当に設定することによって全チャンネル間でのばらつきを最小に抑えることが可能となる．また，テストモジュールに用いる際に，チャンネル間の応答一様性は最大の応答が最小の応答の 2 倍以内であることが要求されている．

#### 光電面中心座標の定義

チャンネル間の応答一様性を測定する際に，各ピクセルの中心に WLS からの光を入射させる必要があるので，光電面の中心位置を測定により決定する．その際図 3.10 に示した点で測定した．ここで中心に近い 2 つのチャンネルで測定するのは，このチャンネルの応答は対称性がよく（このことは前節で述べた），後に行うフィットでより正しい座標を求めることができるからである．印加電圧は H6568 の場合 550 V，H6568-10 の場合 600 V とした．

この測定で得られる結果を図 3.11 に示す．ここで，レーザーからの光量の時間変動が測定結果に寄与しないように，MA-PMT からの出力電荷をレファレンス PMT の出力電荷で割っているため，縦軸は無次元の相対的な量である．この結果をそれぞれのチャンネルについて次の関数形

$$f(x) = \begin{cases} A \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma_1^2}\right) & \text{if } x < a \\ A & \text{if } a \leq x \leq b \\ A \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2\sigma_2^2}\right) & \text{if } b < x \end{cases} \quad (3.1)$$

でフィットする．次に，半値となる座標を求める．一つの軸に対し 2 つのチャンネルについて測定しているため，中心付近の 2 点 ( $A_1, A_2$ ) と中心から離れている方の 2 点 ( $B_1, B_2$ ) の座標が求まることになる (図 3.11)．そこで中心から離れている方の 2 点 ( $B_1, B_2$ ) を用い，その中心を光電面の中心座標 (C) とする．図 3.11 に

<sup>6</sup>最小電離損失粒子 (Minimum Ionizing Particle)．ビームテストでは  $\mu$  粒子を用いた．

おける赤色の線 (C) が求められた光電面の中心，実線と点線はそれぞれ中心座標から評価したピクセルの中心と境界である．このように光電面の中心座標を求め，それをもとに各ピクセルの中心に WLS からの光が入射されるように MA-PMT を移動する．

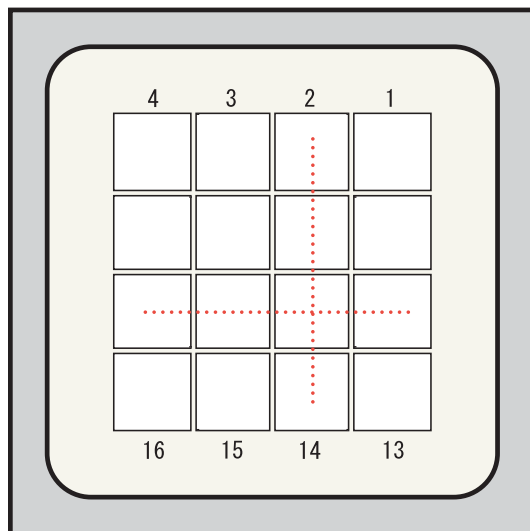


図 3.10: 光電面中心座標の見積もりのための測定点．各測定点は 0.5 mm 間隔である．

ka2418

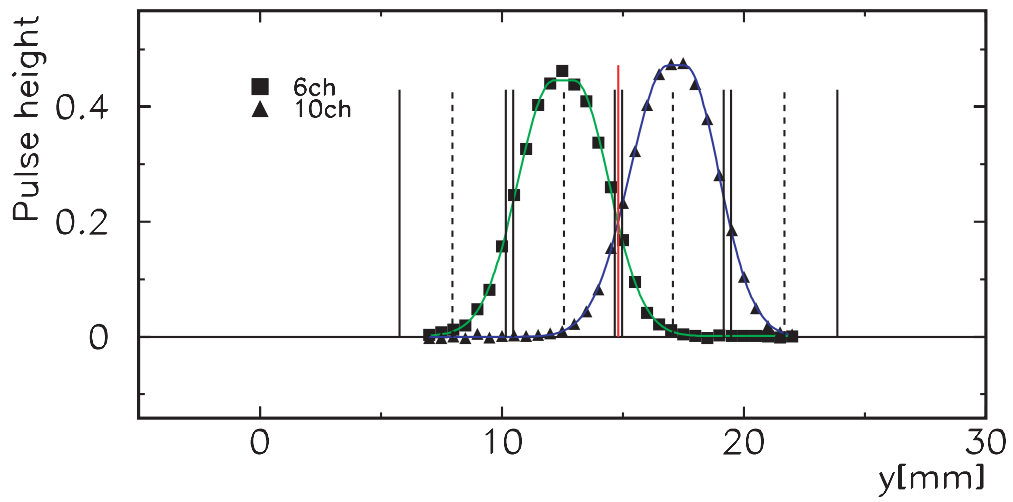
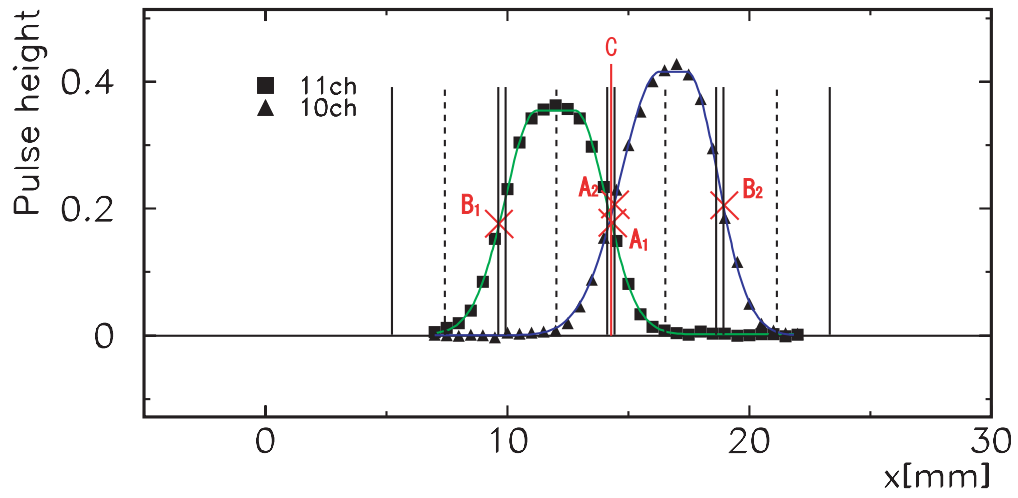


図 3.11: 測定による光電面中心座標の定義．赤色の線 (C) が求められた光電面の中心，実線と点線はそれぞれ中心座標から見積もられた各ピクセルの中心と境界である．

## 応答一様性

このように求めた光電面の中心座標をもとに、各ピクセルの中心に光を入射してチャンネル間応答一様性の測定を行った。この際の印加電圧も同様に H6568 の場合 550 V、H6568-10 の場合 600 V とした。テストモジュールでは、光電面に 4.5 mm の等間隔でファイバーを固定する。それに合わせて図 3.12 に示した点で測定した。この測定点はピクセルの中心と正確には一致しておらず、外側のチャンネルでは 0.1 mm 内側にずれている (第 2 章図 2.4 参照)。また、チャンネル間の応答一様性については、千製造元の浜松ホトニクスでも測定を行っており、その結果が報告されている。

H6568-10 (KA2418) と H6568 (KA2626) の測定結果をそれぞれ図 3.13 (上)、図 3.14 (上) に示す。各ピクセル内には 3 つの値が記されている。1 行目は浜松の測定値。2 行目は我々の測定による値で、MA-PMT からの出力電荷 (ADC カウント)。3 行目も我々の測定による値で、2 行目の値をレファレンス PMT からの出力電荷で割ったものである。また、浜松の測定値で 100 となっているチャンネルで、我々の測定値を 100 として規格化し、その他のチャンネルの応答を相対的に示している。図 3.13 (下)、図 3.14 (下) は測定値を全チャンネルでの平均を 1 として規格化している。1 行目は浜松、2 行目は我々の測定値である。浜松の測定値では中心の 4 つのチャンネルに対して外側のチャンネルの応答の方が明らかに高いという傾向があるのだが、我々の測定値からはその差があまり見られない。

我々の測定値と浜松の測定値でこのような違いが出るのはなぜだろうか。H6568 の 9 本について同様の測定を行い、浜松の測定値と相関を見たものが図 3.15 である。各 MA-PMT の応答の平均を 1 として規格化したもの、すなわち、図 3.14 (下) の値で相関を見ている。さらに、これらをチャンネルの位置に関する 4 つの領域に分けてプロットした。それが図 3.15 (下) のプロットである。緑色の直線がそれぞれのプロットをフィット ( $y = P1 \times x$ ) したもので、赤色の直線が  $y = x$  を示している。したがって、フィットした直線の傾き P1 が我々の測定値と浜松の測定値のずれの指標となっている。領域に分けることによって領域内の相関が良くなり、チャンネルの応答に位置による特性がある事が分かる。領域“ Left/Right ”(チャンネル 5, 9, 8, 12) と領域“ Top/Bottom ”(チャンネル 2, 3, 14, 15) は、我々の測定値と浜松の測定値で似た値をとる。領域“ Corner ”(チャンネル 1, 4, 13, 16) は我々の測定値の方が低い値をとり、対して領域“ Middle ”(チャンネル 6, 7, 10, 11) は高い値をとっている。領域内では相関が比較的良く、その傾向も分かるのだが、全てのチャンネルにおける相関良くない。我々の測定値 (図 3.15 (上) の  $y$  軸) を浜松の測定値 (同  $x$  軸) で割ることによって、その相関の拡がりを見たものが図 3.17 (上) である。この分布の二乗平均は  $RMS=0.17$  であり、その相関は拡がっていることが分かる。

このような相関の拡がり、測定方法の違いからくるものである。浜松ホトニクスでは各ピクセルの中心のみに光が入射した場合の応答を比較しているのでは

なく、タングステンランプを光源に用い、光電面全体に光を均等に入射させて応答を比較しているのである。

前小節で行ったピクセル内応答一様性の測定結果を用いて、浜松ホトニクス社の測定条件を再現してみた。具体的には、一つのチャンネルの応答の電荷を ADC カウントとしてすべての測定点で足し合わせ、それらを比較するのである。こうする事によって、光電面全体に光を均等に当てた場合を再現するのである。このように定義し直した各チャンネルの応答と浜松の測定値を再び比較したものが図 3.16 である。

全てのチャンネルにおいて浜松の測定値ととても良い相関がみられる。これは相関のばらつきを見た図 3.17 (下) を見ても  $RMS = 0.08$  となりばらつきが小さいことから分かる。また 4 つの領域で個性が見られることはなく、P1 が極めて 1 に近い値を取っている。したがって、チャンネルの位置による応答の特性がなくなっていることが分かる。それは以下の理由によるものである。

図 3.6 に見られるように外側のピクセルの応答のある範囲は、中心 (Middle) の 4 つのものよりも広がっている。よって、たとえピクセルの中心の応答が同じであったとしても、全測定点で応答の和を取ると Middle のチャンネルよりも外側のチャンネルのほうが大きくなり、Middle の応答は相対的に小さくなる。したがって、図 3.15 の Middle の測定値が下へ下がることにより、図 3.16 になるのである。

16 本の H6568-10、合計で 256 チャンネル分の我々の測定値について、応答の分布を見たものが図 3.18 (上) である。図 3.18 (下) は浜松の測定値の分布である。図 3.18 における応答は、各 MA-PMT の 16 チャンネルの値の平均を 1 として規格化している。これは、印加電圧を適切に設定することにより PMT 間の応答のばらつきを解消できた場合の全 256 チャンネル間の応答一様性に対応する。この分布の二乗平均 ( $RMS$ ) をチャンネル間応答一様性を示す値と定義すると、浜松の測定値の 14% に比べて、我々の測定値では 11% となっていることから、我々の測定結果の方が応答一様性が良いという事がいえる。

同様に、9 本の H6568 の我々の測定値についての分布を図 3.19 (上) に、浜松のデータ値を図 3.18 (下) に示す。この場合も浜松の測定値の 19% に比べて、我々の測定値は 10% となっており、我々の測定結果の方が応答一様性が良くなっている。

応答を全測定点で和を取るという方法で浜松の測定値を再現できることから、応答一様性の結果に違いが現れたのは射光方法の違いによるものだとということが分かり、同時に我々の測定結果が信頼できるものだとわかった。テストモジュールで用いる場合はピクセルの中心にファイバーを固定し中心のみに光が入射させるので、我々の測定結果の方がそれを再現できている。その場合、適切に印加電圧を設定すると全 256 チャンネル間の応答一様性は 11% となることが分かった。

チャンネル間応答一様性への要求は、最大の応答が最小の応答の 2 倍以内であることとなっている。したがって図 3.18 の分布の、 $1 \pm 0.33$  の間が要求を満たすことになる。図 3.18 の分布がガウス分布をしているとすると二乗平均 ( $RMS$ ) は標準偏差  $\sigma$  と等しく、 $0.33 = 3\sigma$  となることから、99.7% のチャンネルは要求を満

たすことになる .

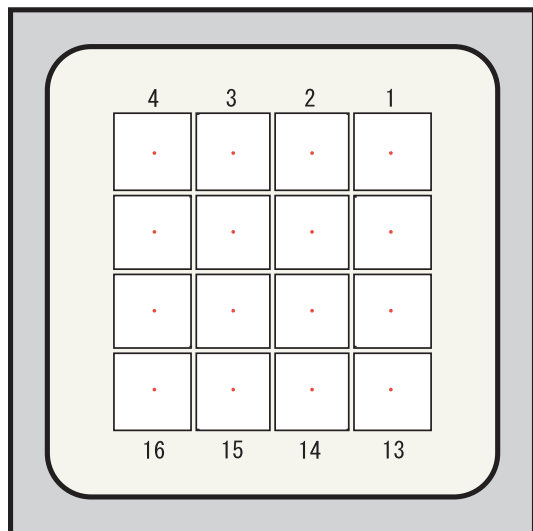


図 3.12: チャンネル間応答一様性の測定点 . それぞれの間隔は 4.5 mm である .

ka2418

ch1 hamamatsu=97 ADC=19.26±0.07 98 mapmt/h1161 =0.372±0.001 99	ch2 89 17.73±0.06 90 0.342±0.001 91	ch3 85 18.12±0.06 93 0.349±0.001 92	ch4 100 19.48±0.06 100 0.375±0.001 100
ch5 89 21.84±0.06 112 0.422±0.001 112	ch6 88 26.33±0.07 135 0.508±0.001 135	ch7 77 22.49±0.06 115 0.435±0.001 115	ch8 86 20.64±0.06 105 0.398±0.001 106
ch9 89 22.05±0.07 113 0.426±0.001 113	ch10 84 26.68±0.08 136 0.515±0.001 137	ch11 75 23.3±0.07 119 0.451±0.001 120	ch12 82 21.17±0.07 108 0.41±0.001 109
ch13 95 21.12±0.07 108 0.408±0.001 108	ch14 88 22.44±0.07 115 0.435±0.001 115	ch15 84 21.56±0.06 110 0.416±0.001 110	ch16 87 20.3±0.06 104 0.393±0.001 104

浜松 筑波	1.11	1.02	0.98	1.15
	0.90	0.82	0.83	0.91
	1.02	1.01	0.88	0.99
	1.02	1.22	1.04	0.96
	1.02	0.96	0.86	0.94
	1.02	1.24	1.09	0.99
	1.09	1.01	0.96	1.00
	0.98	1.04	1.00	0.94

図 3.13: H6568-10 (KA2418) のチャンネル間応答一様性の測定結果。(上): 1 行目は浜松の測定値。2 行目は我々の測定による値で, MA-PMT からの出力電荷 (ADC カウント)。3 行目も我々の測定による値で, 2 行目の値をレファレンス PMT からの出力電荷で割ったものである。また, 浜松の測定値で 100 となっているチャンネルで, 我々の測定値を 100 として規格化し, その他のチャンネルの応答を相対的に示している。(下): 測定値を全チャンネルでの平均を 1 として規格化している。1 行目は浜松の値 (図上段 1 行目), 2 行目は我々の値 (図上段 3 行目)。

ka2626

ch1 hamamatsu=87 ADC=61.09±0.12 93 mapmt/h1161 =1.123±0.002 93	ch2 76 54.29±0.11 83 0.999±0.002 82	ch3 74 54.26±0.11 83 0.999±0.002 82	ch4 90 59.63±0.12 91 1.101±0.002 91
ch5 77 61.5±0.12 94 1.136±0.002 94	ch6 70 69.31±0.14 106 1.278±0.003 105	ch7 71 67.22±0.13 103 1.238±0.003 102	ch8 76 58.19±0.12 89 1.072±0.002 88
ch9 80 61.27±0.12 94 1.132±0.002 93	ch10 75 76.1±0.15 116 1.406±0.003 116	ch11 73 70.24±0.14 107 1.296±0.003 107	ch12 81 61.15±0.12 93 1.129±0.002 93
ch13 98 64.83±0.13 99 1.2±0.002 99	ch14 82 63.29±0.13 97 1.174±0.002 97	ch15 81 62.36±0.13 95 1.155±0.002 95	ch16 100 65.1±0.13 100 1.208±0.003 100

浜松 筑波	1.08	0.94	0.92	1.12
	0.97	0.85	0.85	0.95
	0.95	0.87	0.88	0.94
	0.98	1.09	1.06	0.92
	0.99	0.93	0.91	1.00
	0.97	1.21	1.11	0.97
	1.22	1.02	1.00	1.24
	1.03	1.01	0.99	1.04

図 3.14: H6568 (KA2626) のチャンネル間応答一様性の測定結果。(上): 1行目は浜松の測定値。2行目は我々の測定による値で、MA-PMT からの出力電荷 (ADC カウント)。3行目も我々の測定による値で、2行目の値をレファレンス PMT からの出力電荷で割ったものである。また、浜松の測定値で 100 となっているチャンネルで、我々の測定値を 100 として規格化し、その他のチャンネルの応答を相対的に示している。(下): 測定値を全チャンネルでの平均を 1 として規格化している。1行目は浜松の値 (図上段 1行目)、2行目は我々の値 (図上段 3行目)。



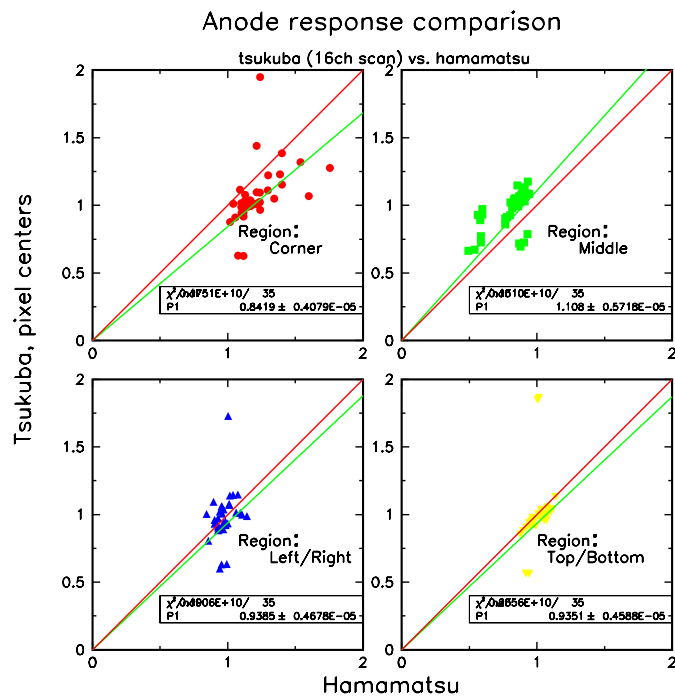
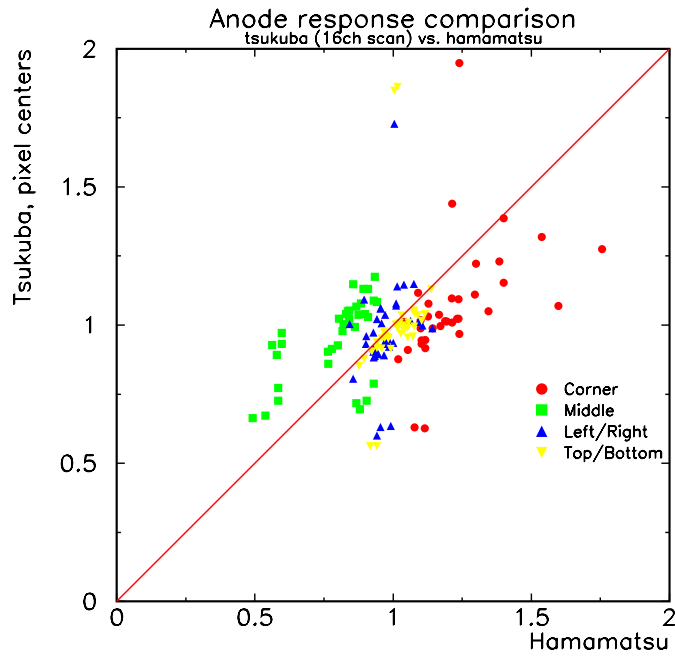


図 3.15: H6568 チャンネル間応答一様性の我々の測定値と浜松の測定値との相関。各 MA-PMT の応答の平均を 1 として規格化して比較している。上のプロットが全てのチャンネルを示したもので、下のプロットが 4 つの領域に分けて示したものである。

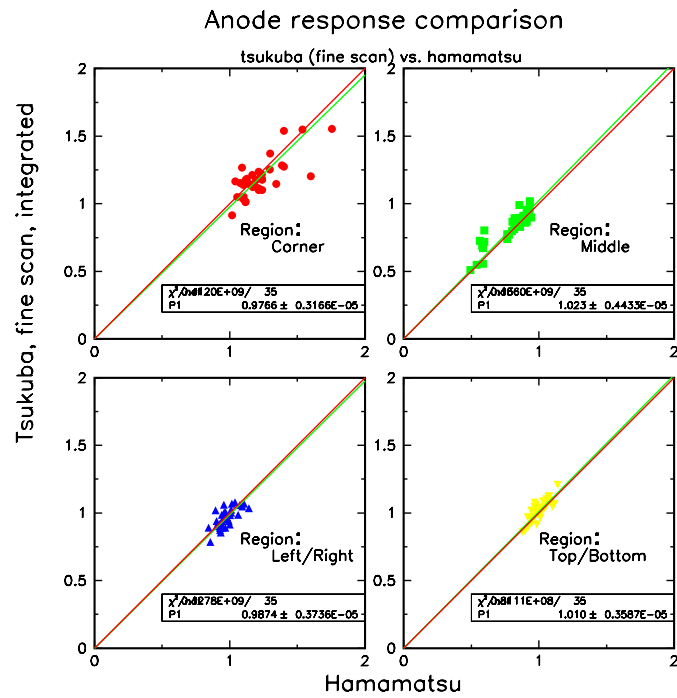
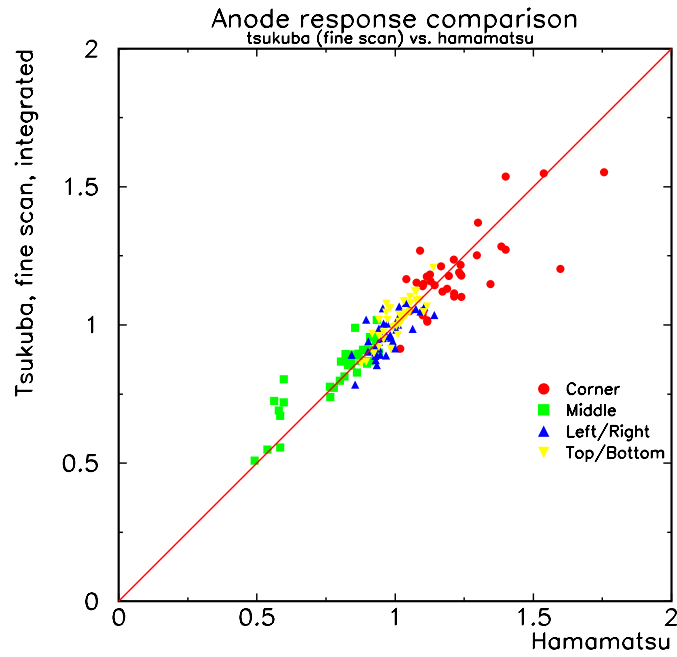


図 3.16: H6568 のピクセル内応答一様性の測定値を全測定点で足し合わせ、それをそのチャンネルの応答として、浜松の測定値と比較した。各 MA-PMT の応答の平均を 1 として比較している。

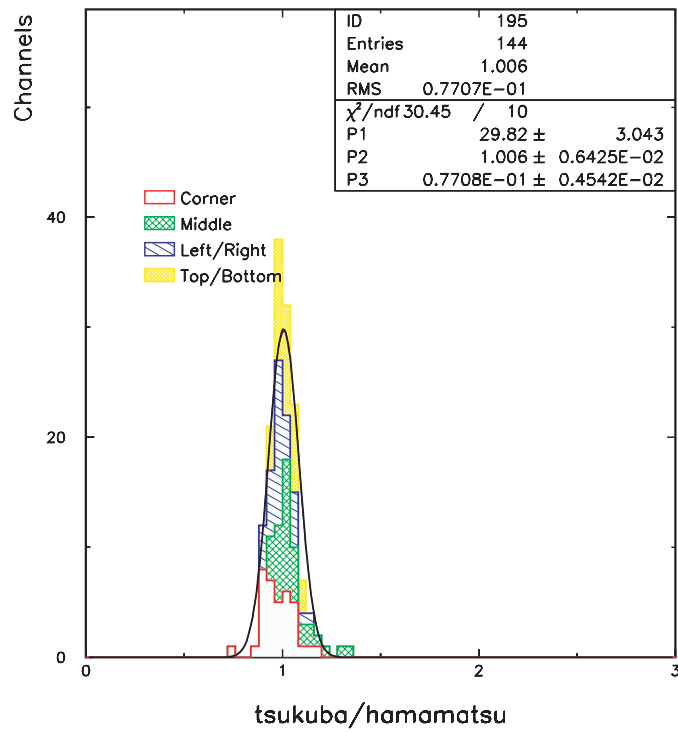
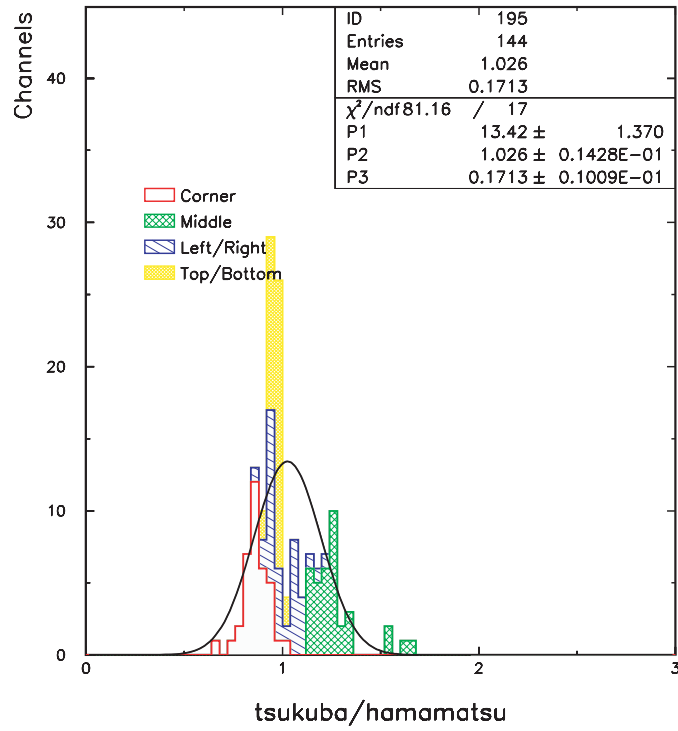


図 3.17: チャンネル間応答一様性の我々の測定値と浜松の測定値との相関の拡がり。我々の測定値を浜松の測定値で割り、それをヒストグラムにした。上はピクセル中心入射の測定値図 3.15 (上) の拡がり。下は全測定点で足し合わせたもの図 3.16 (上) の拡がり。

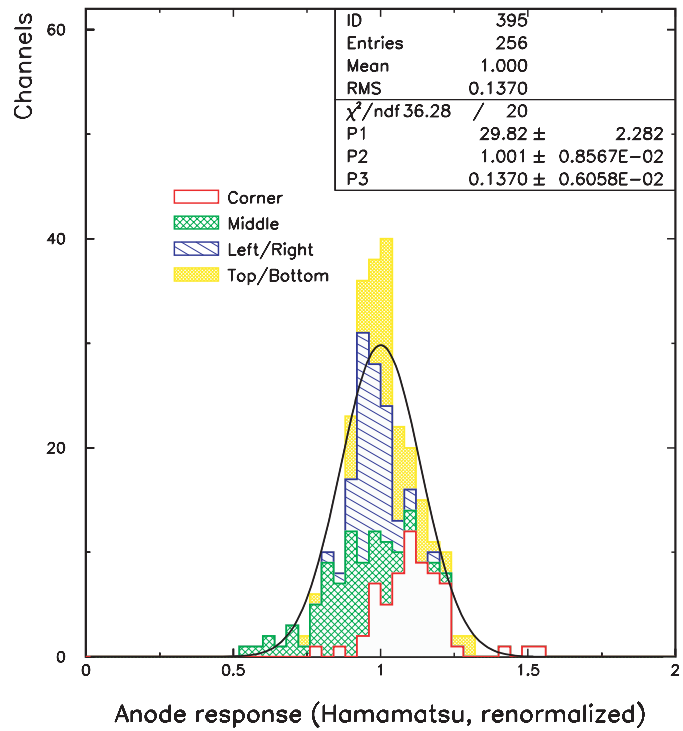
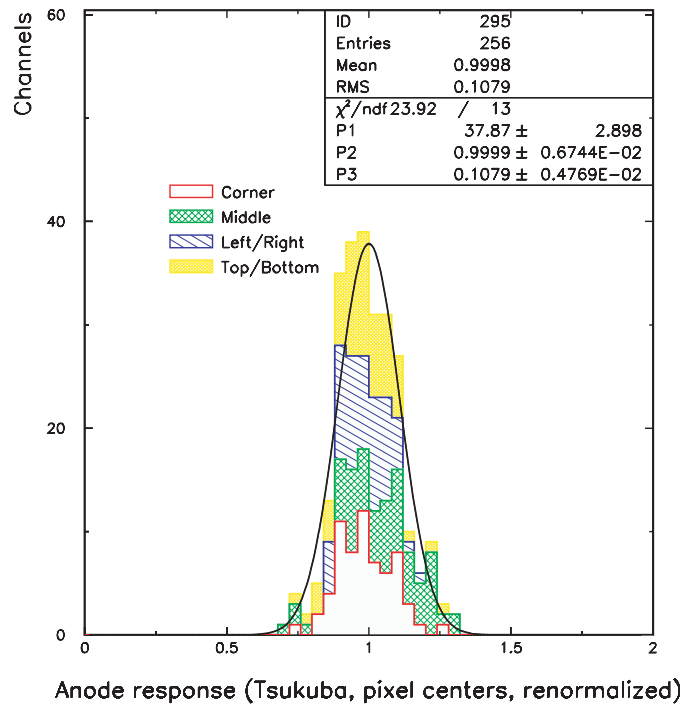


図 3.18: H6568-10 チャンネル間応答一様性の分布．上が我々の測定値によるもので，下が浜松ホトニクの測定値によるものである．各 MA-PMT，16 チャンネルの応答の平均を 1 として規格化している．

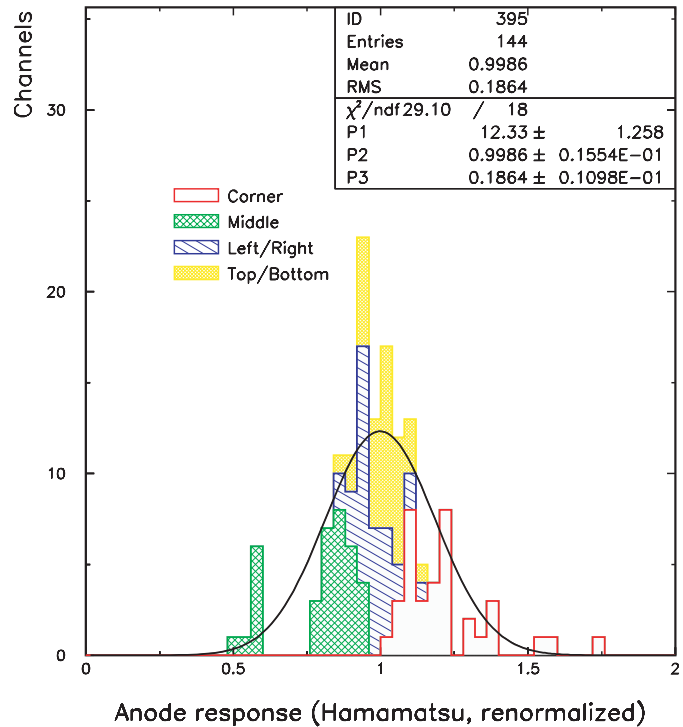
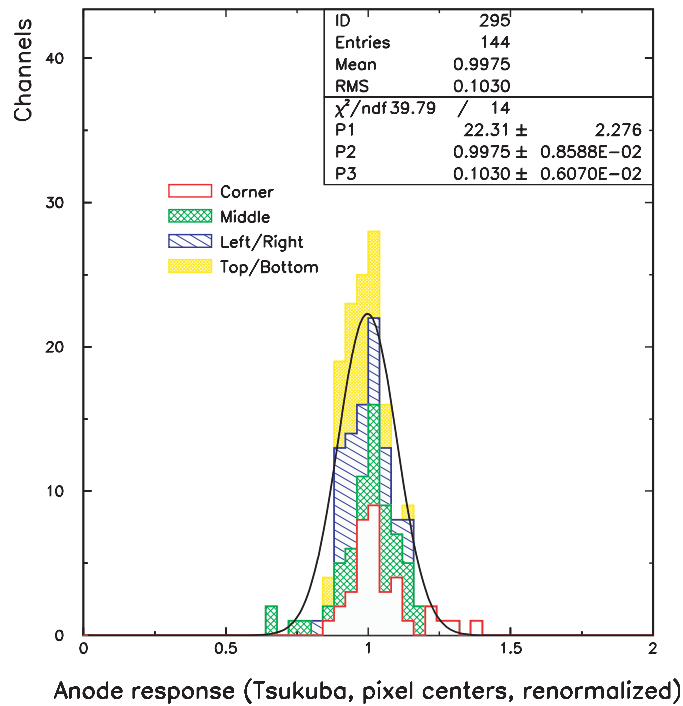


図 3.19: H6568 チャンネル間応答一様性の分布．上が我々の測定結果によるもので，下が浜松ホトニクス社の測定値によるものである．各 MA-PMT，16 チャンネルの応答の平均を 1 として規格化している．

### 3.2.3 クロストーク

図 3.6 を見ても分かるように、ピクセルからはみ出した部分からも応答がある。これがクロストークであり、MA-PMT の構造上の避けられない性質である。クロストークはカロリメータのエネルギー分解能に影響を及ぼすため、その大きさを測定することが必要である。チャンネル間応答一様性の測定では、ピクセルの中心のみに光を入射しているのだが、そのチャンネルだけではなく、それ以外のチャンネルからも少し応答が見られる。図 3.20 に H6568-10 (KA2418) のチャンネル 10 の中心に光を入射したときのクロストークを示す。光を入射しているチャンネルの応答を 100 として、その周りのチャンネルの応答の大きさを表している。また、この値は KA2418 のチャンネル 10 のものであるが、他の MA-PMT、他のチャンネルの結果も同様のものであった。

隣のチャンネルへのクロストークは 2~3% であり、対角のチャンネルへはおよそ 0.5% である。浜松ホトニクスのカタログ図 3.21 と比べると同じ傾向が見られ、対角方向へのクロストークが縦・横方向へのクロストークよりも少ない。図 3.6 を見ると応答の高さはピクセルの中心からほぼ同心円状に変化しているのので、この傾向は、ただ中心間の距離が縦・横方向よりも斜め方向の方が長い場合かもしれない。

カタログに比べてクロストークの量が全体的に約 5 倍と多くなっているのにも気がつく。これは本研究の測定装置で、WLS と MA-PMT 光電面との間に ~2 mm の空間<sup>7</sup>があるためだと考えられる。測定で用いた WLS は、カタログによるとコアの材質がポリスチレン (屈折率は 1.59) で、端面での屈折により最大 45.7° まで光が広がる。2 mm の空間があると WLS の直径も考慮して、光は光電面上で直径 5 mm まで広がる。ピクセルの中心から光がずれるほど他チャンネルへのクロストークは多くなるので、それで我々の測定値はクロストークが多くなったと考えられる。テストモジュールで使用する場合ファイバーとガラス面との間に空間はない、もちろんガラス面と光電面の間には距離がありそれは避けられないが、ファイバーからの光の広がりや測定の向きは測定時よりも抑えられている。それゆえ測定値よりもクロストークの量は少なくなっているはずである。

今まで述べてきた応答一様性、クロストークは、光電面やダイノードによる性質であるので、ベースの違いである H6568 と H6568-10 の区別はなく、R5900 の性質と考えられる。したがって、これらの性質は H6568、H6568-10 共に当てはまる。次に述べる第 3.3 節応答線形性、第 3.4 節増幅率では、H6568、H6568-10 の区別をしなければならぬ。

<sup>7</sup>WLS と MA-PMT ガラス面との空間は ~1 mm (第 3.1 節参照) であるが、ガラス面と光電面の間にも 0.8 mm (第 2 章図 2.3) の空間があるため、合計で ~2 mm となる。

0.07 ±0.21	0.22 ±0.21	0.22 ±0.22	0.28 ±0.24
-0.53 ±0.22	0.61 ±0.23	1.75 ±0.23	0.71 ±0.22
-0.03 ±0.2	2.16 ±0.22	100	2.36 ±0.21
-0.33 ±0.23	0.36 ±0.21	2.01 ±0.22	0.23 ±0.24

Anode Cross-talk (Example)

0.1	0.8	0.1	*
0.5	100	0.3	*
0.1	0.3	0.1	*
*	*	*	*

Aperture 4 × 4 mm

Supply Voltage: 800 V

Light Source: W Lamp (uniform DC light)

Spot Illumination: 4 × 4 mm

図 3.20: H6568-10(KA2418) のチャンネル 10 に光を入射したときのクロストーク

図 3.21: 浜松ホトニクスのカタログによるクロストークの例 .

### 3.3 応答線形性

PMT の応答線形性はカロリメータのエネルギー分解能の定数項に影響を及ぼす . ビームテストでは , 1 チャンネル当たりの出力電荷が 200 pC まで 5% 以内で線形性が保たれることを要求されている . 理想的には PMT の出力は入射光量に比例するが , 出力がある範囲を超えると比例関係が崩れてくる . 測定により線形性が保たれる範囲を知り , テストモジュールではその範囲内で PMT が使用される必要がある .

#### 3.3.1 概念

光電子増倍管は光信号を電気信号に変換する素子で , 光量が増加するとそれに伴い線形的に出力信号が増加する . しかし , 入射光量と出力電流との関係は , ある電流値以上で理想的な直線状態から逸脱する . これは光量を増加させると電極間の電子密度が増大し , 空間電荷の影響があらわれ電子流が妨げられるためである . 電子密度の高くなる最終の 2 ~ 4 段の電圧を標準電圧分配より高くなるように設定し , 電極間の電位勾配を高め , 空間電荷の影響を軽減するようにした電圧分割回路がテーパベースである .

光電面から放出された光電子は , 電界で加速され第 1 ダイノードに入射して二次電子を放出する . 二次電子は次のダイノードと衝突して新たな二次電子を放出する . この過程が次々に繰り返されて高い増幅率が達成される . そのため , カソー

ドからの非常に小さい光電子流も大きな出力としてアノードから取り出される。

増幅率とは、アノードからの出力電流とカソードからの光電子流との比で、理想的には  $n$  段のダイノードの平均二次電子放出率が  $\delta$  の PMT では、増幅率  $G$  は  $\delta^n$  となる。また二次電子放出率  $\delta$  は、 $\delta = A \times E^\gamma$  で与えられる。ここで  $A$  は定数、 $E$  はダイノード間電圧、 $\gamma$  はダイノードの形・材質によって決まる。 $n$  段のダイノードを持つ光電子増倍管のアノード - カソード間に電圧  $V$  を印加した場合、PMT 全体の増幅率  $G$  は次のようになる。

$$G = \delta^n = (A \times E^\gamma)^n = \left\{ A \times \left( \frac{V}{n+1} \right)^\gamma \right\}^n = \alpha \times V^\beta . \quad (3.2)$$

ここで  $\alpha, \beta$  は定数である。しかし印加電圧を高くしていき、二次電子放出率が高くなると出力電流が増加し (3.2) 式からずれてくる。これを飽和 (サチュレーション) と呼ぶ。浜松ホトニクスのカatalogによると、応答線形性が保たれるのは  $\pm 2\%$  の偏差を許して、H6568 の場合 1 チャンネル当たり 0.5 mA、H6568-10 の場合 5 mA の出力電流までである。

### 3.3.2 電圧の関数としての応答線形性

前節のチャンネル間応答一様性の測定で一番応答が高かったチャンネルの中心に WLS からの光を入射し、印加電圧を変えてその応答の変化を見た。H6568-10 (KA2418) と H6568 (KA2626) についての結果を両対数プロットしたものが図 3.22 である。ここでは、MA-PMT 光電面と WLS の間のフィルターを変えることによって入射光量を変えて同じ測定を繰り返している。通常測定している場合は N.D.1.0 (平均光電子数  $\bar{N}_{p.e.} \sim 1000$ ) であるが、それに加えて  $\bar{N}_{p.e.} \sim 10$  となる N.D.3.0、 $\bar{N}_{p.e.} \sim 0.1$  となる N.D.4.5 (SPP) についても測定を行っている。ただし、SPP については H6568-10 (KA2418) は増幅率が低いいため電圧を変えての測定ができなかった。

出力電荷の変化は増幅率の変化に比例するので図 3.22 のフィットした直線はまさに (3.2) 式を表している。したがって、その傾きから  $\beta$  が個々の MA-PMT について分る。 $\gamma$  がダイノードの形・材質によって決まるので、 $\beta (= \gamma n)$  ももちろん同様であり、 $\beta \sim 11$  であった。また、その直線からのずれが飽和を表す。H6568 の増幅率は高いが応答線形性に乏しく、対して H6568-10 の増幅率は低いが応答線形性に優れている様子がよく分かる。同じ光量でも H6568-10 の方が常に出力電荷が小さく、しかし明らかに飽和が始まる印加電圧が高い。

また、同じモデルでも光量が少なくなるに従い飽和が始まる時の出力電荷が小さくなっている事にも気づく。すでに述べたように、PMT は出力電流の大きさに依存して飽和を起こす。ADC は出力信号を電荷として測定するので、それは電流に比例したものであると考えると、飽和が始まる時の出力電荷が異なるのはおかしい。ここで注意しなければならないのは、電荷が電流に比例するのは、出力



波形が一定という条件下でのみ成り立つということである。

H6568-10 (KA2418) についての各光量, 各印加電圧での出力波形を図 3.23 に示す。これらは出力パルス自身でトリガーをかけている。N.D.4.5 (SPP) では  $\bar{N}_{p.e.} \sim 0.1$  であるので, 完全に単一光電子による波形である。したがって, 常に図 3.23 (左上) に示すような波形で出力されている。ただし, 波高のばらつきは大きい。これは光電面から出た光電子はダイノードでポアソン分布に従って増幅されるためである。光量を  $\bar{N}_{p.e.} \sim 10$  (N.D.3.0) に増加させると, その波形は単一光電子による波形を平均 10 個重ねた形となる。このときの波形はさまざまな形をしており, 単一光電子による波形の重なる数や, タイミングが, イベントごとに異なっている。そしてもちろん, 波高もさまざまである。図 3.23 (右上) はある 1 イベントの波形である。さらに光量を増やし,  $\bar{N}_{p.e.} \sim 1000$  (N.D.1.0) に増加させると, 単一光電子による波形を平均 1000 個重ねた波形となる。その重なりが多いので, 1 イベントで, 単一光電子による波形の波高や重なるタイミングが統計的に平均化され, 常に図 3.23 (左下) に示す波形で出力される。ここで, 単一光電子による波形のタイミングがずれるのは WLS での崩壊時間 (約 10 ns) によって PMT に光子が入射するタイミングが異なるからである。このため,  $\bar{N}_{p.e.} \sim 1000$  の波形では, WLS の崩壊時間が現れている事になる。

単一光電子による波形の幅は光量が十分にある時の波形の幅に比べて狭いので, 印加電圧を上げて同じ出力電荷を得ようとするとき, 波高が高くなる。電流は波高に比例するので, 出力電流が高くなることになる。PMT が飽和を起こすのは出力電流に依存するので, 単一光電子による波形, もしくは単一光電子による波形が数個重なるような光量では, 飽和が始まる時の出力電荷が小さくなるのである。

### 3.3.3 飽和 (サチュレーション)

H6568-10 (KA2418) の  $\bar{N}_{p.e.} \sim 1000$  の応答について, その線形応答からのずれを表したのが図 3.24 である。横軸は実際に ADC で測定される時の出力電荷, 縦軸は図 3.22 フィットした直線からのずれを示している。これより 5% 以内で線形性が保たれるのは  $\sim 100$  pC までで, 200 pC となると  $\sim 20\%$  のずれがある事が分る。テストモジュールに用いる際の要求は, 200 pC まで 5% 以内で線形性が保たれていることであつたので, この要求を満たしていないことになる。

$\bar{N}_{p.e.} \sim 1000$  の時の, 印加電圧 750 V での平均出力波形を図 3.23 (右下) に示す。この時の出力電荷は 100 pC である。MA-PMT の出力は 50  $\Omega$  抵抗でターミネーションしているので, 縦軸の -0.25 V は  $(0.25 \text{ V}) / (50 \Omega) = 5 \text{ mA}$  の出力電流に対応している。カタログによると線形性が保たれるのは 5 mA までなので, -0.25 V を越える領域ではサチュレーションを起こしていることになる。このため, 出力電荷が 100 pC の時にはサチュレーションによって線形性が崩れ, そのずれは  $\sim 5\%$  と測定された。

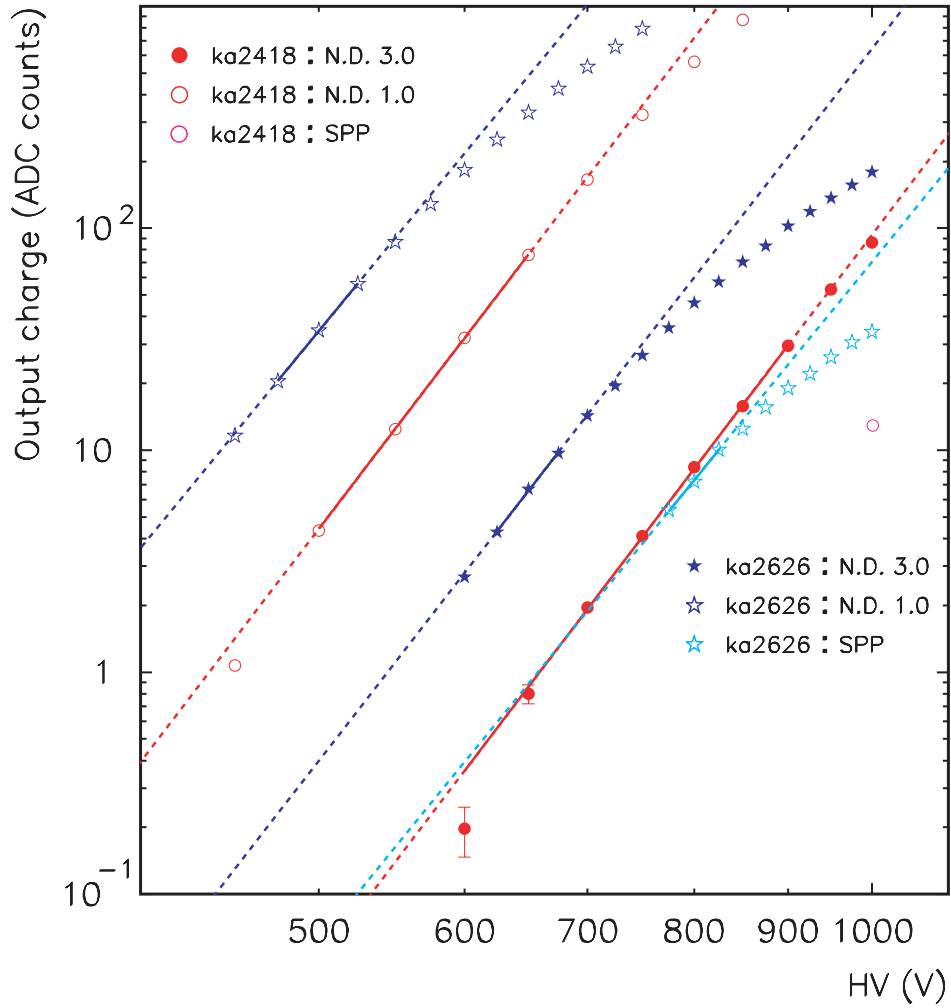


図 3.22: 印加電圧を関数とした H6568 (KA2626) と H6568-10 (KA2418) の応答線形性． $\bar{N}_{p.e.} \sim 1000$  (N.D.1.0),  $\bar{N}_{p.e.} \sim 10$  (N.D.3.0) と光量を変えて測定を行った．H6568 (KA2626) に関しては  $\bar{N}_{p.e.} \sim 0.1$  (SPP) で測定を行ったが, H6568-10 (KA2418) は増幅率が低いので印加電圧を変えての測定ができなかった．

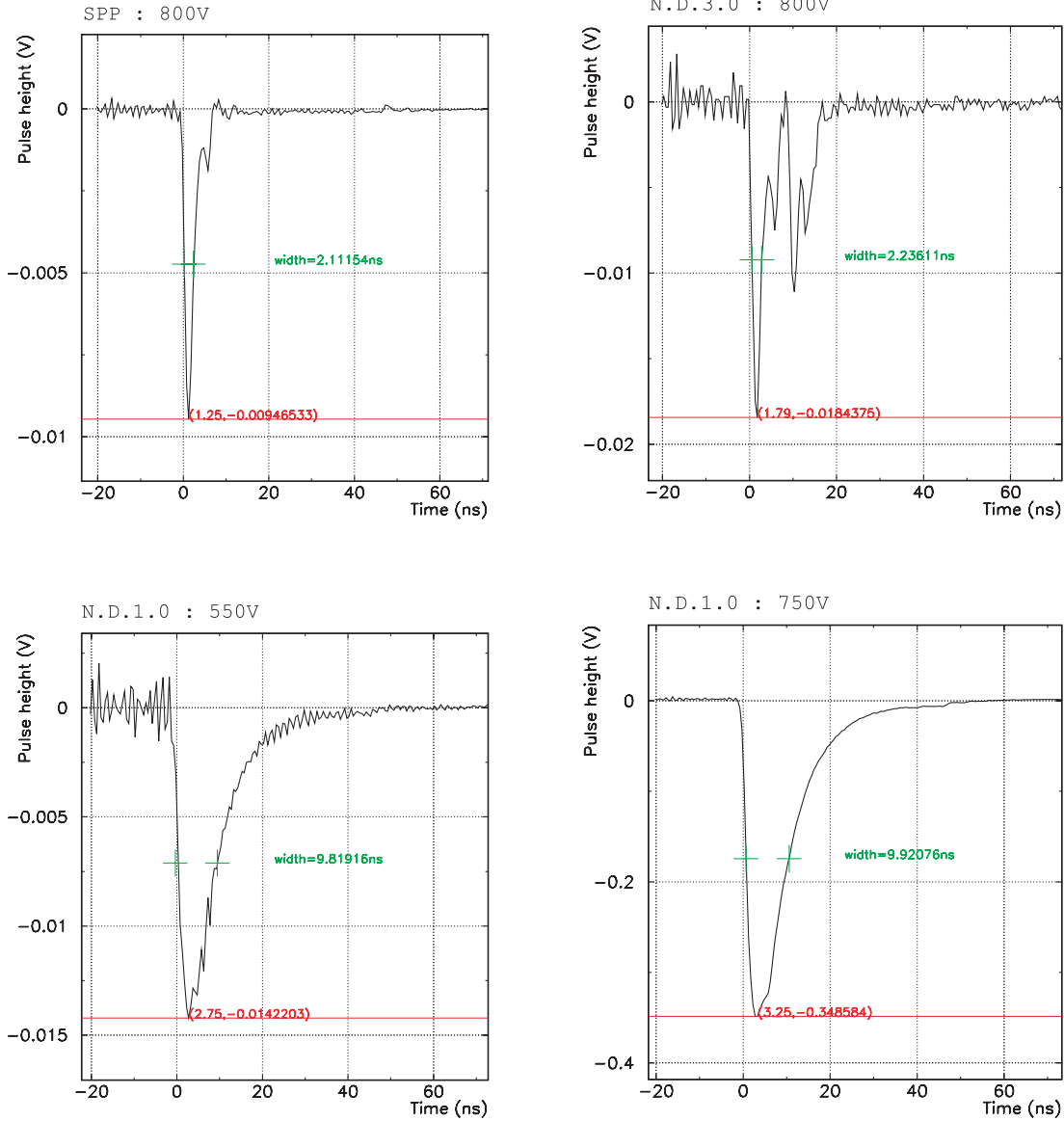


図 3.23: 各光量, 各電圧での H6568-10(KA2418) からの出力波形. 50 Ω 抵抗でターミネーションしている. パルス自身でトリガーをかけている. 左上が  $\bar{N}_{p.e.} \sim 0.1$  (SPP), 印加電圧 800 V での平均出力波形. 右上が  $\bar{N}_{p.e.} \sim 10$  (N.D.3.0), 印加電圧 800 V でのある瞬間の出力波形. 左下が  $\bar{N}_{p.e.} \sim 1000$  (N.D.1.0), 印加電圧 550 V での平均出力波形. 右下が  $\bar{N}_{p.e.} \sim 1000$  (N.D.1.0), 印加電圧 750 V での平均出力波形である.

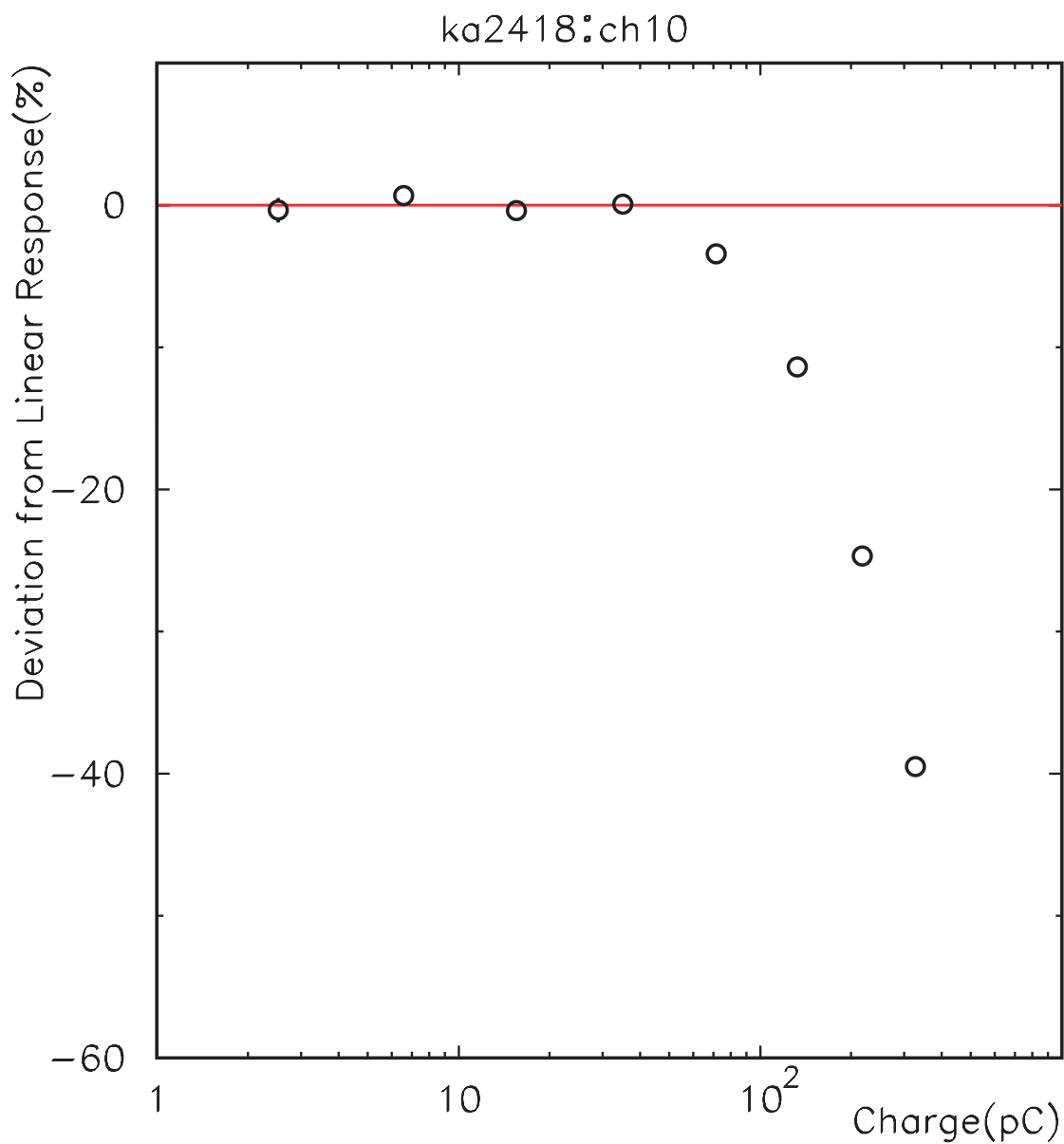


図 3.24: H6568-10 (KA2418) , N.D.1.0 の応答の線形性からのずれ．横軸は測定される出力電荷．縦軸は理想的な線形応答を 100%としたときの出力電荷のずれを示す．

## 3.4 増幅率

ストリップファイバー電磁カロリメータはMIP通過時に1チャンネル当たりの光量が $\bar{N}_{p.e.} \sim 10$ となることが予想される。また、MA-PMTの増幅率を50 ADC-counts/MIPとすることが要求されている<sup>8</sup>。すなわち、増幅率を $(0.2 \text{ pC/count} \times 50 \text{ counts}) / (1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 10) = 6.3 \times 10^6$ とすることが要求されている。この要求を満たすためには、MA-PMTの増幅率を絶対値で決定することが必要であり、応答一様性、応答線形性の測定結果も用いることによって、要求された増幅率となるように印加電圧を決定することが出来る。

### 3.4.1 概念

前章まではMA-PMTの応答の相対的な比のみを見てきたが、単一光電子に対する信号(SPP)の測定により、絶対的な増幅率を知ることができる。

レーザーからの光1パルス当たりに光電面から放出される光電子数はポアソン分布

$$P_{\mu}(n) = \frac{e^{-\mu}}{n!} \mu^n \quad (3.3)$$

に従う。ここで、平均光電子数 $\bar{N}_{p.e.} = \mu$ である。これより、光電子が出ない確率は $P_{\mu}(0) = e^{-\mu}$ 、光電子が一つだけ出る確率は $P_{\mu}(1) = \mu \cdot e^{-\mu}$ であり、光電子が2個以上出る確率は $P_{\mu}(n > 1) = 1 - P_{\mu}(0) - P_{\mu}(1)$ となる。実際に $\mu = 0.1$ としたとき

$$P_{0.1}(0) = 0.905 \quad (3.4)$$

$$P_{0.1}(1) = 0.090 \quad (3.5)$$

$$P_{0.1}(n > 1) = 0.005 \quad (3.6)$$

となるので、光を $\mu \sim 0.1$ となるように十分に減衰させれば、光電子が2個以上出る確率は1個だけ出る確率に比べて無視できるようにすることが可能であり、SPPが直接測定できる。したがって、測定ではフィルター N.D.4.5を光電面とWLSの間に挟み、 $\mu \sim 0.1$ として測定した。

また、光電面から出た光電子は、ダイノードでガウス分布に従って増幅されるため、その分布には拡がりが生じる。したがって、単一光電子に対する波高分布をガウス関数でフィットすることによって、その平均値 (Mean) からSPPを求めることができる。

---

<sup>8</sup>テストモジュールに使われたADCは0.2pC/countである。

### 3.4.2 SPP

ペDESTALとの分離を良くするため、印加電圧を 1000 V として測定を行った。1000 V での増幅率と SPP における電荷  $Q_{SPP}$  の関係は、

$$G_{1000} = \frac{Q_{SPP}}{e} \quad (3.7)$$

で表せる。ここで  $e$  は電気素量である。

3.2 節のチャンネル間応答一様性の測定で 1 番応答が高いチャンネル、すなわち増幅率が 1 番高いチャンネルの中心に光を入射し、SPP の測定を行った。H6568-10 (KA2418) と H6568 (KA2626) の SPP の測定結果を図 3.25 に示す。H6568 (KA2626) の測定結果において SPP の右肩が急激に落ちており、左右対称でなく、ガウス分布をしていないことが分る。これは SPP の測定で飽和を起こしているからである。印加電圧を関数とした SPP はすでに図 3.22 に示してある。これを見ると 1000 V での SPP は完全に飽和を起こしていることが分る。飽和を起こさないように電圧を下げると今度はペDESTALとの分離ができなくなるので、結局 H6568 に関して SPP から正しい増幅率の見積もりはできなかった。一方 H6568-10 は応答線形性が良いので、SPP の測定で飽和を起こすことはなく、正しい増幅率を見積もることができた。

### 3.4.3 増幅率

SPP の測定をすることによって MA-PMT の増幅率の絶対値を求めることができる。しかしそれは測定したときの印加電圧（この場合は 1000 V）での増幅率である。ここで、前節で行った応答線形性の測定結果を用いることによって、任意の電圧での増幅率を知ることができる。(3.2) 式において  $\beta$  はすでに求まっている。従って  $\alpha$  の値を求めればよい。SPP の測定によって 1000 V のときの増幅率  $G_{1000}$  は求まっており、 $G_{1000} = \alpha \times 1000^\beta$  である。したがって、 $\alpha = G_{1000}/1000^\beta$  となるので、(3.2) 式は

$$G = G_{1000} \left( \frac{V}{1000} \right)^\beta \quad (3.8)$$

となる。(3.8) 式を用いて任意の印加電圧での MA-PMT の増幅率を知ることができる。

浜松ホトニクスからは 800 V のときの陰極感度 ( $S_k$ ) と陽極感度 ( $S_p$ ) が各 MA-PMT に対して報告されている。これから増幅率は  $S_k/S_p$  で与えられる。H6568-10 の 16 本について応答線形性と SPP の測定を行い、印加電圧 800 V での増幅率を求めた。しかし、浜松の測定値は MA-PMT 全体の増幅率なのに対し、我々の測定は 1 番増幅率の高いチャンネルの中心でのみ行われた。そこで、チャンネル間応答一様性の測定で得られた値を用いるとで、補正をした。

具体的に KA2418 の場合を述べる．SPP により 1000 V の時のチャンネル 10 の増幅率は  $1.76 \times 10^7$  と分かる (図 3.25)．この値を (3.8) 式に代入し， $V = 800$  とすると，800 V の時の増幅率は  $1.16 \times 10^6$  となる．これで，第 3.2 節図 3.13 (下) での 1.24 の増幅率が決定されたことになる．そこで，1.24 で割ることにより，MA-PMT 全体の増幅率は  $0.94 \times 10^6$  と求まる．これは浜松の測定値の  $1.00 \times 10^6$  とほぼ一致している．最後の補正で用いる値は，応答線形性，SPP の測定点がピクセルの中心という点から，浜松の測定値ではなく，チャンネル間応答一様性の我々の測定で得られた値を用いる．

浜松の測定値と求めた増幅率の相関が図 3.26 である．同時に我々の測定値を浜松の測定値で割ることで相関の拡がりを見たものもプロットした．フィットした直線の傾きが  $\sim 1$  で，拡がりも 10% であるので，浜松の測定値と我々の測定値がよく一致していることが分かる．このことにより，我々の測定で得られた増幅率は信頼できるものといえる．

また，同様に (3.8) 式の増幅率  $G$  をテストモジュールから要求されている値 ( $6.3 \times 10^6$ ) に固定し印加電圧  $V$  を 16 本の MA-PMT それぞれについて求める事により．設定すべき印加電圧を決定することが出来る．このとき用いる  $G_{1000}$  の値は，1 本の MA-PMT の全チャンネルの平均をチャンネル間応答一様性の測定結果を使って求め，それと置き換えることで，全 256 チャンネル間応答一様性を最小に抑えることが出来る．16 本それぞれについて適切な印加電圧を求めると，800~850 V の範囲で決定され，テストモジュールで設定すべき印加電圧が求まる．

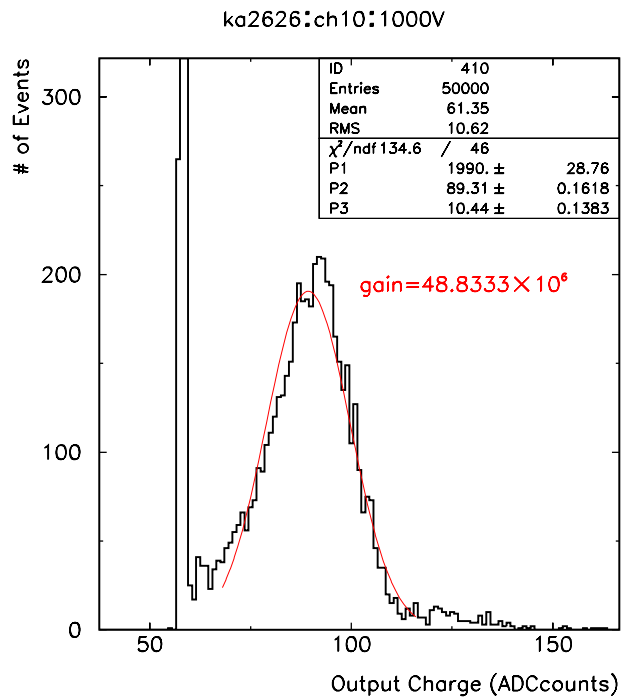
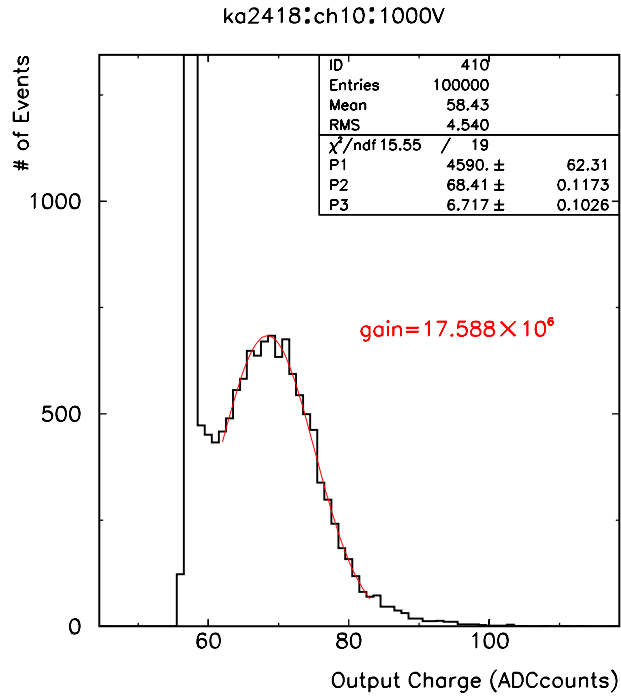


図 3.25: H6568-10 (KA2418) (上) と H6568 (KA2626) (下) の SPP の測定結果 .



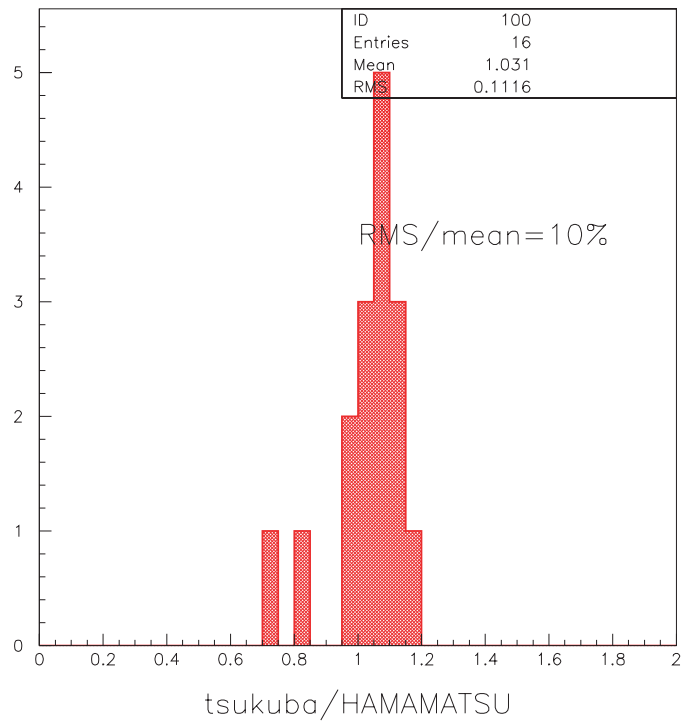
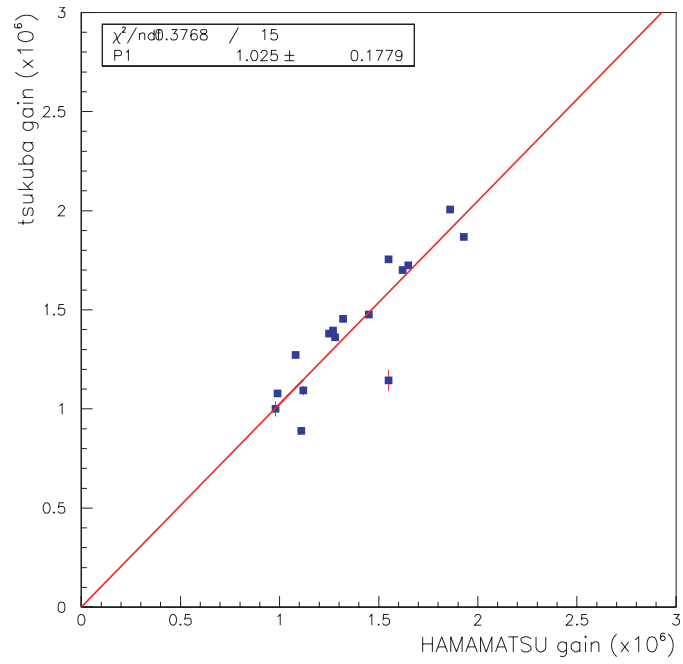


図 3.26: H6568-10 の 16 本について浜松の測定値と求めた増幅率を比較した .

## 第4章 結論

JLC ストリップファイバー電磁カロリメータに用いるマルチアノード光電子増倍管の以下の性能についての測定手法の確立，および実際の測定による性能評価を行い，テストモジュールへの適性を調べた．

- ピクセル内応答一様性
- チャンネル間応答一様性
- クロストーク
- 応答線形性
- 増幅率

ピクセル内応答一様性については， $x$ - $y$  スキャナーを用いて 0.5 mm 間隔で測定した事により，応答を光の入射位置の関数として得ることができた．チャンネル間応答一様性の測定では，テストモジュールでの状況を再現して，ピクセルの中心のみに光を入射させた．その結果，印加電圧を適切に設定した時の全チャンネル間の応答一様性は 11% となり，テストモジュールでの要求を満たすことが分かった．クロストークは，縦・横方向へのクロストークの方が斜め方向よりも多く，その量は多くても 3% であった．5% 以内で応答線形性が保たれるのは出力電荷が  $\sim 100$  pC までで，200 pC となると  $\sim 20\%$  の線形性からのずれが見られた．したがってビームテストでの要求を満たしていないことになるが，1 番応答が高くなる  $4 \text{ GeV}/c^2$   $e$  入射のシャワーマックスの応答のピークは 100 pC であり，5% 以内であるので，今回のビームテストでは用いることにした．次回のビームテストでは，アンプ等を用いることが検討されている．H6568 は応答線形性に乏しいため SPP の測定で応答が飽和してしまい，増幅率を見積もることができなかったが，H6568-10 では SPP を直接測定することにより正しい増幅率を見積もることができ，それはテストモジュールの要求を満たすことが分かった．以上のように，本研究によるチャンネル間応答一様性，応答線形性，SPP の測定から H6568-10 の性能がテストモジュールで使用する際の我々の要求をほぼ満たすものであることが分かり，また MA-PMT への印加電圧を適切に設定することが可能となった．

## 参考文献

- [1] <http://www-jlc.kek.jp/>
- [2] <http://www.hamamatsu.com/>
- [3] S . Lami , S . Kuhlmann , K . Hatakeyama , M . Gallinaro ,  
*Preliminary Test on Photomultiplier Tubes for the CPR2 Detector* ,  
CDF/PUB/CALORIMETRY/CDFR/6094 , 2002
- [4] 石澤善雄「JLC 実験におけるジェットエネルギー測定アルゴリズムの研究」(筑波大学数理物質科学研究科修士論文, 2002 年)
- [5] 大田辰郎「タイル/ファイバー型カロリメータ試作器の製作及び性能評価とそれを用いたハドロンシャワーの研究」(筑波大学理工学研究科修士論文, 2000 年)
- [6] 風間哲史「CDF 実験用粒子飛行時間測定器に用いる光電子増倍管の特性研究」(筑波大学理工学研究科修士論文, 2001 年)
- [7] 竹内彰「JLC ハドロンカロリメータテストモジュールの製作及び性能評価」(神戸大学自然科学研究科修士論文, 2000 年)
- [8] 中田有一「ハドロンシャワーの奥行き方向の揺らぎの研究」(筑波大学理工学研究科修士論文, 2002 年)
- [9] 『光電子増倍管 - その基礎と応用 - 』(浜松ホトニクス社)

## 謝辞

本研究を進める上で、数多くのご指導をいただきました受川史彦助教授、金信弘教授に深く感謝いたします。また、滝川紘治教授、原和彦先生、松永浩之先生にも数多くの助言をいただきました。武内勇司先生には本論文執筆にあたり面倒を見て頂き本当にありがとうございました。

一緒に実験を行ってきた佐藤幸司さん、金子寛さん、永野あいさんに心から感謝いたしております。

チームテストを一緒に行った JLC グループの内田訓雄さん、関口克巳さん、山田豊さん、松本偉史さん、山本澄江さん、また学外の先生方、先輩方にもお世話になりました。

最後に、あらゆる面で援助してくれた両親に心からお礼を言います。ありがとう。