

# MPPC の安定性能の研究

2008 年 3 月

04S2017E

佐久間隆幸

信州大学理学部物理科学科  
高エネルギー研究室  
指導教員：竹下徹

# 目次

|       |                 |    |
|-------|-----------------|----|
| 第1章   | ILC 実験          | 3  |
| 1.1   | ILC             | 3  |
| 1.2   | GLD             | 5  |
| 1.3   | カロリメータ          | 7  |
| 第2章   | MPPC            | 10 |
| 2.1   | 光検出器            | 10 |
| 2.1.1 | 光電子増倍管          | 10 |
| 2.1.2 | 半導体検出器とフォトダイオード | 11 |
| 2.1.3 | アバランシェフォトダイオード  | 12 |
| 2.2   | MPPC            | 13 |
| 2.3   | MPPC の諸性質       | 15 |
| 2.3.1 | Gain            | 16 |
| 2.3.2 | Noise Rate      | 17 |
| 2.3.3 | Cross Talk      | 18 |
| 2.3.4 | その他の MPPC の性質   | 20 |
| 第3章   | MPPC の特性の研究     | 23 |
| 3.1   | 研究目的            | 23 |
| 3.2   | 評価項目と実験方法       | 23 |
| 3.3   | 測定結果            | 26 |
| 3.3.1 | 温度サイクル          | 26 |
| 3.3.2 | 光               | 28 |
| 3.3.3 | 順バイアス           | 30 |
| 第4章   | 結論              | 33 |
| 4.1   | 測定結果のまとめ        | 33 |
| 4.2   | 今後の課題           | 33 |
| 付録    | A               | 35 |
| 付録    | B               | 37 |
| 付録    | C               | 38 |

|      |    |
|------|----|
| 謝辞   | 40 |
| 参考文献 | 41 |

# 第1章 ILC実験

ILC(International Liner Collider)とは、現在世界規模で研究開発が行われている次世代の電子陽電子衝突型線形加速器のことである。図 1.1 に構想図を、図 1.2 に ILC の模式図を示す。第 1 章では ILC 実験について述べる。

## 1.1 ILC

加速器実験とは、高電場を用いて人工的に高エネルギーの粒子を作り衝突させる事により、高エネルギー領域を探る、素粒子物理における研究手段の 1 つである。加速に使うのは高電場だけなので電荷をもつ安定な粒子しか用いられない。加速器の衝突型として意味があるのは、陽子と反陽子(または陽子)、電子と陽電子、陽子と電子(または陽電子)の 3 種類である。また、加速器の発展において陽子反陽子衝突型加速器は、電子陽電子衝突型加速器の約 10 倍のエネルギーを誇ってきた。これは電子を磁場で曲げると質量が小さいためシンクトロン放射によってエネルギー損失が大きくなるためである。電荷  $e$  の荷電粒子のシンクトロン放射による単位時間当たり失うエネルギー  $\Delta E$  は次式

$$\Delta E = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2 v^4}{c^3 r^2} \left( \frac{E}{mc^2} \right)^4 \quad (1.1)$$

で表される<sup>1</sup>。ここで、 $E$  は粒子の質量、 $m$  は粒子の質量、 $v$  は粒子の速度、 $c$  は光速、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $r$  は加速器の半径である。分母の  $m^4$  という因子のために、質量の小さな電子のエネルギー損失は大きくなる。しかし、10 倍エネルギーが違っていても探っているエネルギー領域は似ている。それは、陽子反陽子では実際衝突するのが陽子や反陽子を構成し、それらのエネルギーの一部を持つクォークやグルーオンであるのに対して、電子陽電子ではそのままのエネルギーで衝突するからである。また、そのため最高到達エネルギーの点で有利な陽子反陽子加速器に比べて電子陽電子加速器では反応をありのまま測定でき、バックグラウンドは少なく精密測定が可能である。このような理由から歴史的に 2 つの加速器は互いに相補的であった。

世界最高エネルギーを達成する加速器は、ILC の様な線形加速器と、ジュネーブに建設された 2008 年に稼働開始予定の LHC (Large Hadron Collider) の様な円形加速器がある。しかし、円形加速器ではシンクトロン放射というエネルギー損失が起こる。そのため、必然的に今後の質量が小さい(陽)電子を用いる電子陽電子加速器が高エネルギーを目指す為には粒子を直線的に加速する線形加速器にする必要がある。しかし、線形という構造状、衝

---

<sup>1</sup> 参考文献 [9] 素粒子物理学 原康夫 著

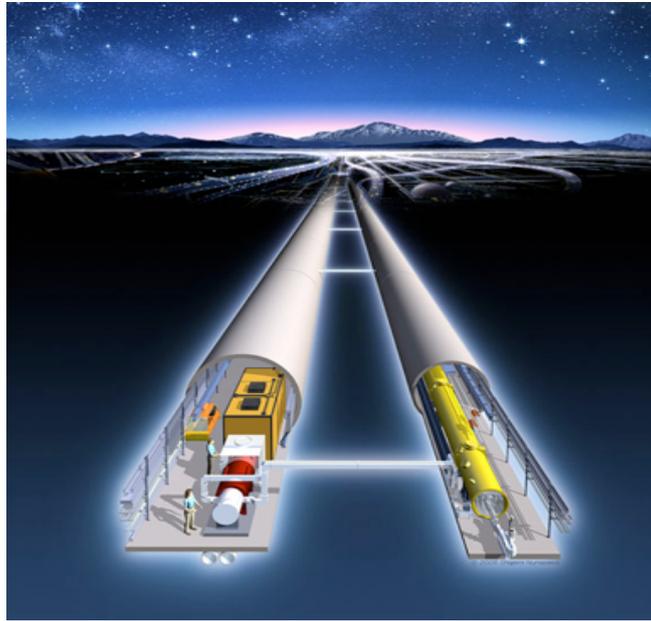


図 1.1 ILC 構想図

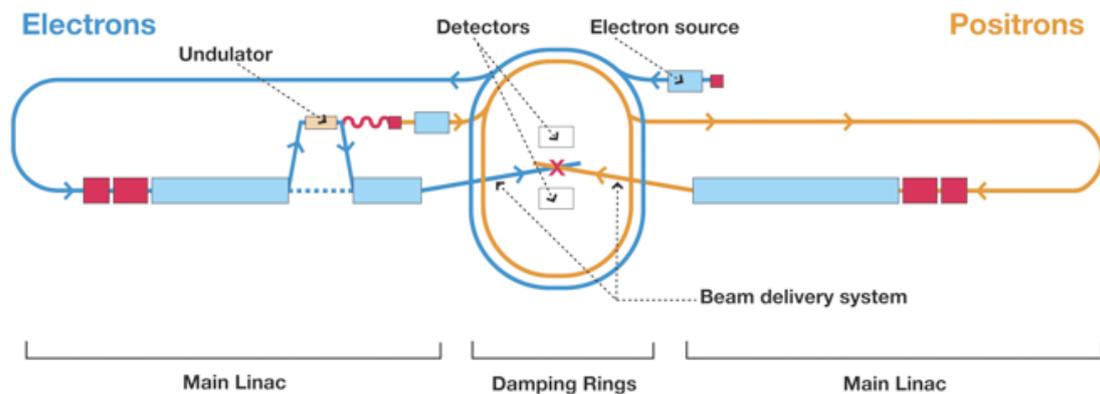


図 1.2 ILC 模式図

ILC(International Liner Collider)は全長 40km にもおよぶ超伝導の線形衝突型加速器であり、実現に向けて多くの研究者が R&D を行っている。第 1 期では重心系エネルギーを 500GeV までで行い、将来的には TeV 領域を探索する予定である。ヒッグスや新粒子の発見などが期待されている。

衝突点を通り過ぎてしまった粒子は再利用できないためルミノシティの向上のために、別の手段が必要となる。

ILCは全長約40Kmにもなる線形加速器で、TeV領域のエネルギーで実験を行うことを目的とした実験である。宇宙のビッグバン直後に匹敵するエネルギー状態を実験室に再現し、未発見のヒッグス粒子の精密測定、超対称性(SUSY)の発見など新しい物理の発見が期待されている。

## 1.2 GLD

図1.3に示したGLD(Global Large Detector)はILCにおいて用いられる測定器案の1つである。カロリメータの信号読み出しとして本論文で述べるMPPC(Multi-Pixel Photon Counter)を採用予定である。

GLDは衝突点に近い方から

バーテックス測定器：

バーテックス検出器は衝突点付近に置かれた測定器で、粒子の飛跡を高い精度で測定してその粒子が生成されたB中間子やD中間子の崩壊点を検出するための装置である。

飛跡検出器：

飛跡検出器は荷電粒子の飛跡を正確に測定することで、荷電粒子の運動量を測定する装置である。磁場をかけると荷電粒子はローレンツ力を受けて曲がる。その曲率と磁場の強さから運動量を求めることができる。現在MPGD(Micro Pattern Gas Detector)がセンサーとして使用される予定のTPC(Time Projection Chamber)が候補として挙げられている。カロリメータと合わせることで、粒子の種類を識別できる。

カロリメータ：

粒子のエネルギーを測定するのに用いられる。本論文で述べるMPPCが用いられる予定の検出器である。電磁シャワーを起こす粒子の測定の為の電磁カロリメータとハドロンシャワーを起こす粒子の測定の為のハドロンカロリメータからなる。ジェットを含むイベントの測定が多い、ゆえに高いジェットエネルギー分解能と空間分解能が要求される。

ソレノイドコイル：

ソレノイドコイルは荷電粒子の識別のため磁場を掛ける装置である。ソレノイドコイル内はビーム軸に平行な方向に3Tもの磁場が掛かる。ソレノイドコイル内にある装置はバーテックス測定器、飛跡検出器、カロリメータである。

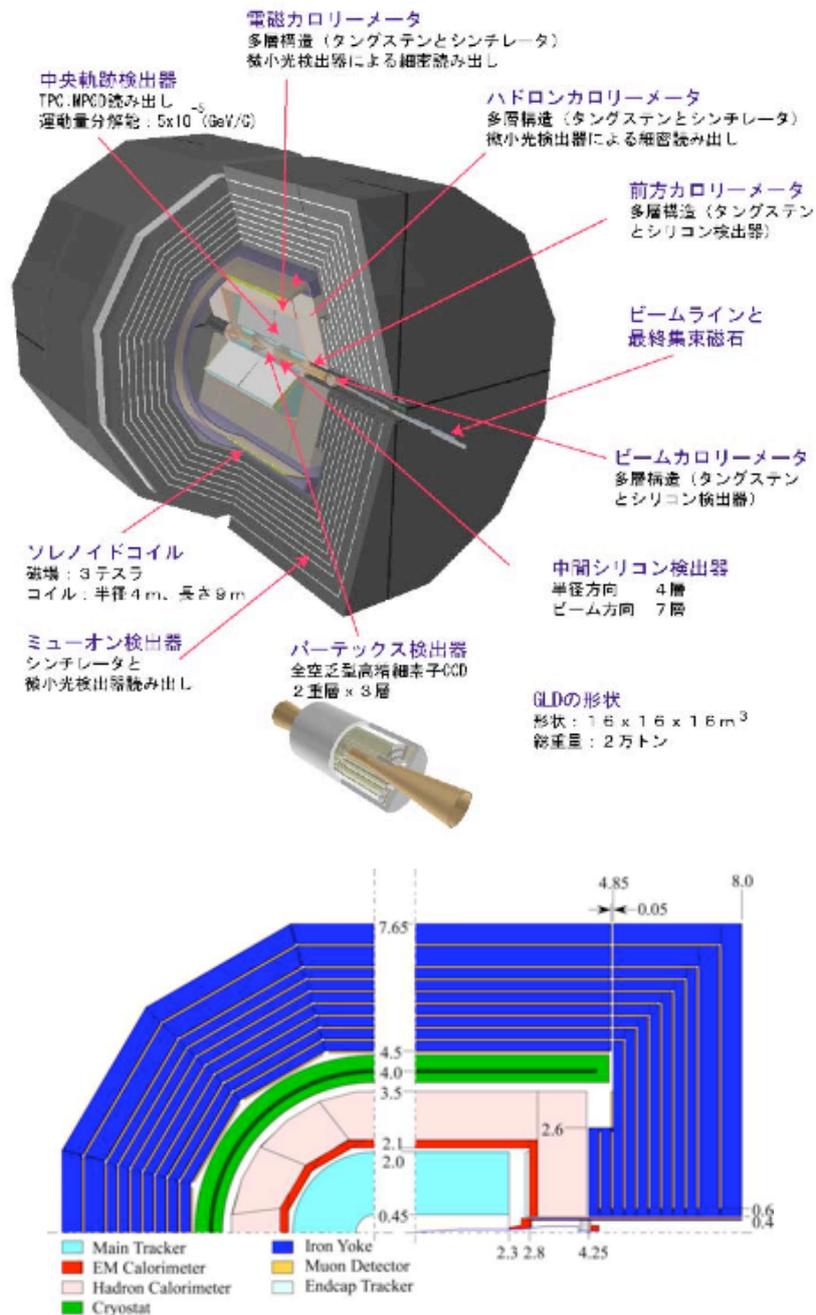


図 1.3 GLD

内側からパーテックス検出器、飛跡検出器、カロリメータ、ミュオン検出器となっている。ILCの測定器としてGLD以外にもSiD、LDC、4thなどの測定器が世界で検討されている。

ミューオン検出器：

ミューオンは比較的寿命が長い。またミューオンは質量が重くレプトンであるので透過能力が高く電磁シャワーも起こさず外側までたどり着くことができるため、検出器は一番外側に配置されている。事象の特定の為ミューオンは重要な粒子であり、飛跡検出器でも運動量を測れるが、ミューオン検出器で識別してより精度よく運動量を測定する。

の順に配置してある。バーテックス測定器、飛跡検出器、カロリメータは強い磁場の中に置かれている。まだ各測定器は研究開発の段階である。

### 1.3 カロリメータ

カロリメータとは入射した粒子のエネルギーを測定する為の装置で、粒子を光や電気信号へ変換して測定する。物質中を通過する高エネルギーの粒子は物質と相互作用を起こし、その相互作用でできた2次粒子が相互作用を起こし粒子を生成する。この反応が繰り返し起こり、爆発的に粒子が増加する。これをシャワーと呼びカロリメータでエネルギーを測定していく。実際のGLDカロリメータの構造としては、粒子のエネルギーのほぼ全てをカロリメータ内で落とす為十分に大きい原子番号を持った物質で構成された吸収層と、信号を測定するための検出層が交互にサンドイッチされた構造をしている。

電磁カロリメータ：

高エネルギーの電子が物質中に入ると制動放射によって $\gamma$ 線を放出してエネルギーを失う。一方、 $\gamma$ 線は物質中で電磁場との相互作用によって電子、陽電子を対生成する。これらの相互作用の断面積はほぼ物質の原子番号の2乗に比例する。これを繰り返すと最初の電子よりエネルギーの小さい多数の $\gamma$ 線と電子、陽電子が生成される。これを電磁カスケードシャワーといい、電磁カスケードシャワーを利用して生成された粒子の全エネルギーを測定するための装置を電磁カロリメータという。シャワー中の電子、陽電子の飛跡長の総和 $S$ は

$$S = \left( \frac{4}{3} X_0 + \frac{2}{3} s_0 \right) \frac{E}{E_c} \quad (1.2)$$

である<sup>2</sup>。ここで放射長 $X_0$ は物質中で電子や陽電子のエネルギーの平均が $1/e$ に減少する長さ、 $E$ は入射エネルギー、 $E_c$ は臨界エネルギー、 $s_0$ は $E_c$ のエネルギーを持つ電子や陽電子などの粒子がエネルギーを失って止まるまでの平均距離である。鉄、鉛の $X_0$ は厚さに換算してそれぞれおよそ1.7cm、0.56cmである。 $S$ は $E$ に比例するので、電子、陽電子に

---

<sup>2</sup> 参考文献 [7] 素粒子を探る粒子検出器 政池明 著

よる全発光量または電離量を測定する事で、入射した電子または $\gamma$ 線の全エネルギーを知る事ができる。

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射すると核子と衝突して中間子やバリオンなどの2次粒子が生成される。2次粒子のうち中性 $\pi$ 中間子が $\gamma$ 線に崩壊して電磁シャワーを起こす。バリオンはさらに衝突して3次粒子を生成する。このように2次粒子の粒子群によって増幅が生まれてハドロンシャワーが形成される。物質中でのハドロンの核散乱による吸収長は

$$\lambda = \frac{A}{\sigma N \rho} \quad (1.3)$$

で表される<sup>3</sup>。ここで、Aは物質1モルの質量、 $\sigma$ は非弾性散乱の断面積、Nはアボガドロ数、 $\rho$ は密度である。鉄、鉛の $\lambda$ はそれぞれおよそ17.1cm、18.5cmでありハドロンシャワーの $\lambda$ は電磁シャワーの $X_0$ と比べて大きい。2次粒子が生成不可能になるまでエネルギーを失うか、核子に吸収されるまでこの過程は続く。また、電磁シャワーと異なりハドロンシャワーは離散的に発生する。一般的に光子、電子と中性ハドロンのシャワーの違いから内部に電磁カロリメータを、外側にハドロンカロリメータを置かれる。

ILC-GLD カロリメータでは、電磁カロリメータの吸収層としてタングステンを、ハドロンカロリメータの吸収層として鉛の使用される予定である。ジェット中の粒子のエネルギーを個々に精度良く測定していきたい、そのために粒子を区別して検出できるようにカロリメータの細かい分割設計が必要となる。読み出しの多チャンネル化、またはその他の条件によって読み出しに用いられるデバイスにはいくつかの要求がなされる。

- ・ 膨大なチャンネルになる為、なるべくスペースを取らないデバイス
- ・ 大量に用いるので一つ一つの単価が安価なもの
- ・ 検出層が薄くかつ小さいセグメントになり、エネルギーデポジットが小さくなるので高ゲインなデバイス
- ・ GLD カロリメータでは3 Tの強磁場がかかるので、磁場の影響をなるべく受けないデバイス

これらの要求を満たしているのがMPPCである。図1.4はカロリメータにMPPCを用いた場合の構想図である。

---

<sup>3</sup> 参考文献 [7] 素粒子を探る粒子検出器 政池明 著

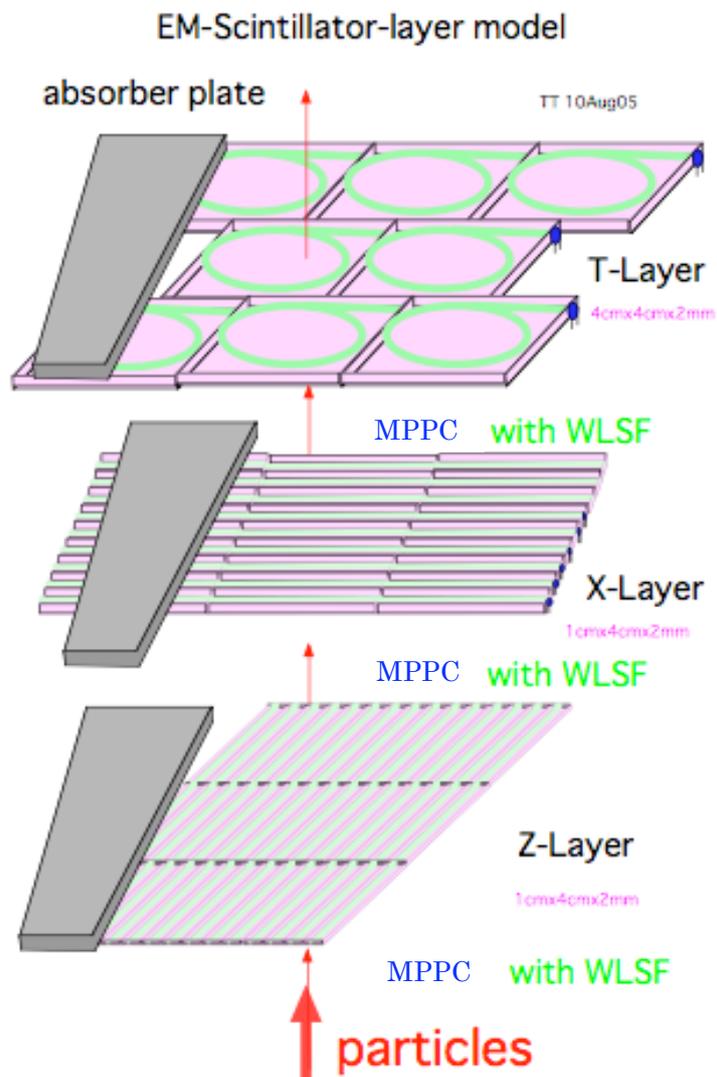


図 1.4 電磁カロリメータに用いられる MPPC の構想図

MPPC を取り付けた波長変換ファイバー(WLSF)を通したシンチレータを多数並べてある。図のようにそれが垂直方向に層構造となっている。

## 第2章 MPPC

素粒子実験において光検出器は切っても切り離せない存在である。MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) は信州大学など日本国内の大学や研究所 (KEK、神戸大、京都大、名古屋大、信州大、東京大、東京工業大、新潟大、防衛大など) と浜松ホトニクス社が現在共同開発中の新しい光検出器で GLD カロリメータにおいて使用される予定のデバイスである。第2章では従来の光検出器と新しい光検出器である MPPC の概要と MPPC の諸性質について述べていく。図 2.1 は光電子増倍管と MPPC の大きさを比較したものの。

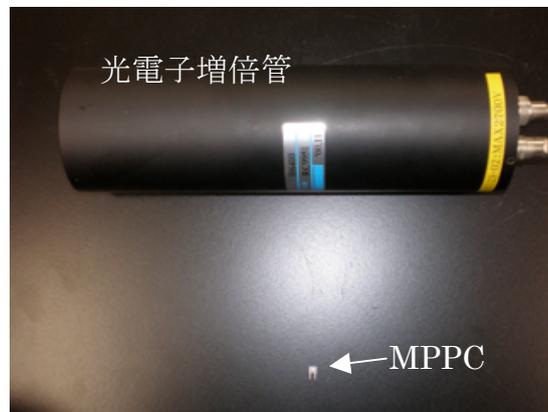


図 2.1 光電子増倍管と MPPC

### 2.1 光検出器

光検出器は素粒子実験ではシンチレーションと併せて使うことにより粒子のエネルギー測定や粒子の検出器として用いられる。以下に従来用いられてきたいくつかの光検出器について説明する。

#### 2.1.1 光電子増倍管

光電子増倍管は光検出器の一つで、高感度、高ゲイン、高時間分解能なため測定によく用いられるデバイスである。“PMT” または “フォトマル” と略されることもある。典型的な光電子増倍管の図は 2.2 に示す。通常ガラス製の容器の中は真空となっているので、その中で低エネルギー電子が内部の電場により効率的に加速される。光電子増倍管の必要な二つの要素は光電陰極 (photocathode) と呼ばれる感光層とこれと結合している電子増倍器 (electron multiplier) 構造からなる。光電陰極はできるだけ多くの入射する電子を光電

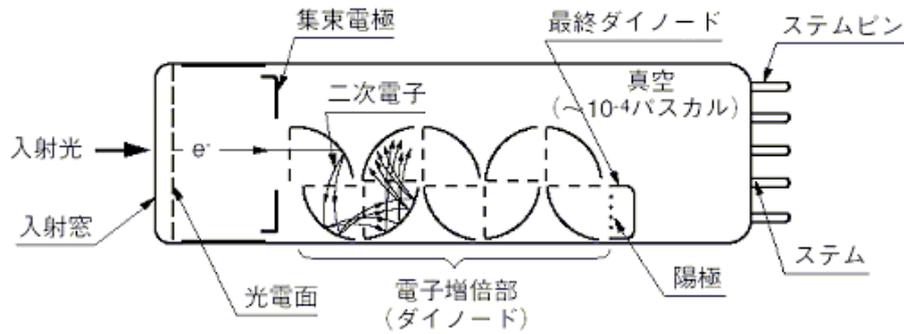


図 2.2 光電子増倍管

効果で電子に変換する作用をする。叩き出された電子は電場によって効率よく電子増倍器に導かれる。電場によって加速された電子は一つ目のダイノードに衝突する。その結果数個の2次電子が叩き出される。それが繰り返されて最終的に十数個のダイノードを通り、光電面から発生した電子は $10^5 \sim 10^8$ 程度に増幅される。

光電子増倍管は非常に優れている光検出器だが磁場の影響を受けやすく、また装置が大きいなど ILC 実験において使用に適していない面もある。

### 2.1.2 半導体検出器とフォトダイオード

半導体を用いたデバイスには光を電気に変える受光デバイスと、電気を光に変え発光デバイスがある。身近な受光デバイスとしては発電用の太陽電池や、ビデオカメラに内蔵されている固体イメージセンサなどがあり。発光デバイスはLEDがあげられる。光検出器として用いる半導体デバイスは全て受光デバイスである。

半導体検出器は1950年代後半から注目されるようになり、1960年代以降原子核や放射線の研究に欠くことのできない検出器として広く用いられるようになった。素粒子物理の世界では1980年頃から衝突加速器などで、コンパクトで位置分解能が高い検出器が必要となり表舞台で活躍するようになった。

P型半導体とN型半導体を接合させたダイオードを光検出器として用いたのがフォトダイオードである。接合部は互いにキャリアが打ち消しあって、キャリアの少ない領域の空乏層が生じる。ここに、半導体の禁制帯の幅 $E_g$ より大きなエネルギーのフォトンが入ると内部光電効果により電子が励起され、電子と正孔が対生成される。

$$h\nu \geq E_g \quad (2.1)$$

ここで $h$ はプランク定数、 $\nu$ は入射フォトンの振動数である。フォトンによって電子が励起される様子を図2.3に示す。内部電場によって対生成された電子はn型半導体に、正孔はp型半導体へ移動する。これらを電気信号として取り出す。

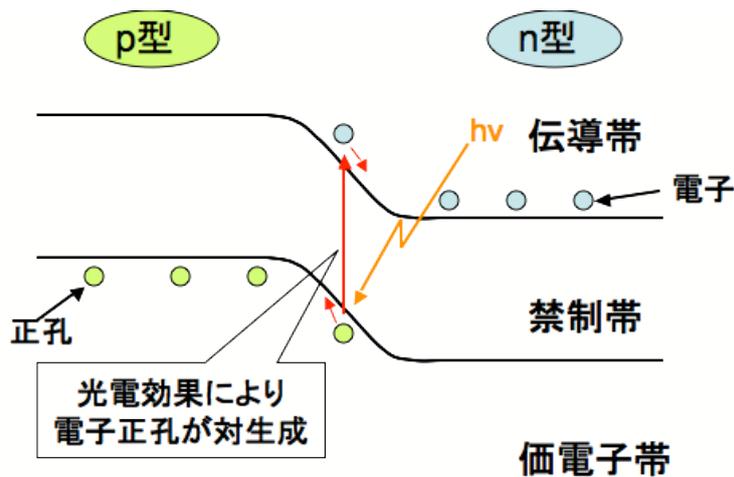


図 2.3 pn 接合のフォトンによる電子と正孔の対生成

### 2.1.3 アバランシェフォトダイオード (APD)

pn 接合半導体は逆バイアス電圧を掛けてもほとんど電流が流れない。半導体に掛ける逆バイアス電圧を大きくしていくとある電圧で突然急に電流が流れるようになる（ブレイクダウン）。

ブレイクダウンが起こる理由はツェナー降伏と電子雪崩降伏の 2 種類がある。ツェナー降伏と電子雪崩降伏の概念図を図 2.4 に示す。逆バイアス電圧を大きくしたことにより p 型の価電子帯の電子がトンネル効果により禁制帯を通り抜けて n 型の伝導体に移ることがある。このようにして移った電子により電流が流れる現象をツェナー降伏という。また、逆バイアス電圧が大きくなると空乏層において高電場が掛かるようになる。このような状態で空乏層に電子が入ると高電場によって電子が加速されてエネルギーが大きくなるとそのエネルギーで結晶格子の結合を切り、電子正孔を対生成するようになる。生成された電子も高電場で加速されて電子正孔を対生成する。このように 2 次、3 次と電子と正孔が雪崩的に増幅することをアバランシェ増幅と呼び、これにより大きな電流が流れるようになる。このような現象を電子雪崩降伏という。

フォトダイオードにブレイクダウン電圧以上の電圧を掛けて光が入射すると、生成された電子は高電場で加速され、他の原子と衝突して 2 次的な電子を弾き出す。2 次的な電子も加速され、アバランシェ増幅がおきる。このようにしてアバランシェ増幅を起こして信号を増幅させたフォトダイオードをアバランシェフォトダイオード (APD) と呼ぶ。

APD をブレイクダウン電圧以上の逆バイアスで動作させると、同時に入射するフォトン数に関係なく一定の信号を出す。このモードをガイガーモードという。

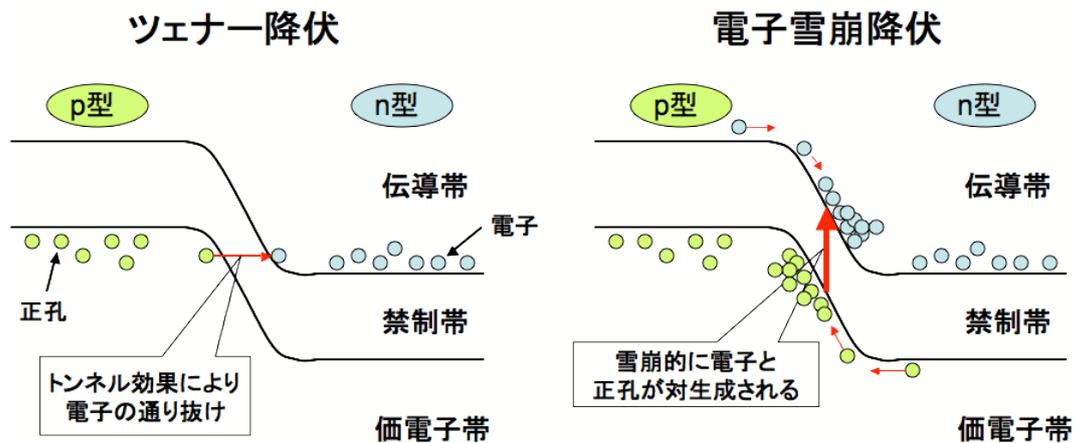


図 2.4 ツェナー降伏と電子雪崩降伏

## 2.2 MPPC

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) は現在浜松ホトニクスが研究開発している新しい光検出器で、GLD カロリメータで採用予定である。アバランシェフォトダイオードを array 状に多数配置したもので主な特徴としては

- ・ 優れたフォトカウンティング能力
- ・ 常温で動作
- ・ 低バイアス電圧で動作
- ・ 高い増倍率
- ・ 磁場の影響を受けない
- ・ 小型

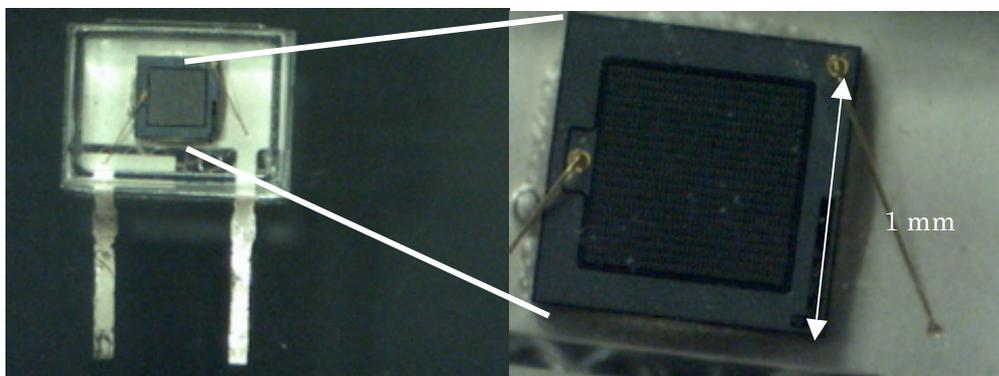


図 2.5 MPPC の全体画像(左) MPPC の拡大写真(右)

このような性能から従来の光検出器に代わる大きな将来性を持っている。MPPCの全体画像と拡大画像を図2.5に示す。

MPPCは図2.6のようにクエンチング抵抗とガイガーモードのアバランシェフォトダイオードを直列につなげたピクセルを2次元に並列接続した構造をしている。クエンチング抵抗とアバランシェフォトダイオードと直列につなげたピクセルは図2.7のように動作する。ガイガーモードではアバランシェフォトダイオードに光子が入射すると光子数に関係なく一定の信号を出す(放電)。それによってクエンチング抵抗に電流が流れて、逆バイアスはブレイクダウンボルテージまで電圧降下する。その後、再充電によって逆バイアスは元に戻り再びガイガーモードで動作できるようになる。MPPCでは信号を出してから4nsで再びガイガーモードで動作できるようになる。MPPCはガイガーモードのときに高Gainになるので基本的にガイガーモードでしか動作させない。MPPCの1ピクセルの増幅の様子

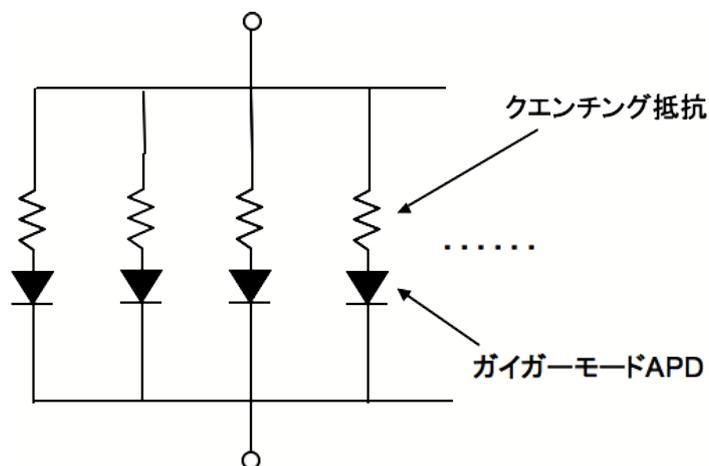


図 2.6 MPPC の等価回路

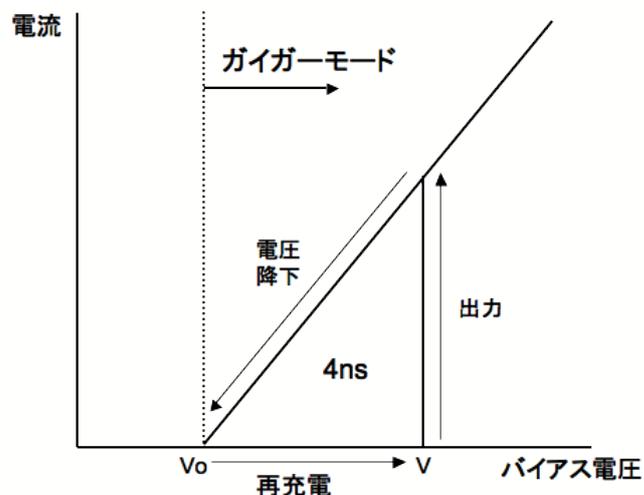


図 2.7 ガイガーモード APD の動作

を図 2.8 に示す。

MPPC では全てのピクセルの読み出しは 1 つのチャンネルにつながっているため、複数のピクセルに同時に光子が入射した場合、複数のピクセルから出た信号は重なり合い 1 つ大きい信号となって観測される。この信号の高さや電荷量を測定することで、どの程度の光子が入射したか知ることができる。また MPPC の感度が最も高い光の波長は 400nm である。次節では MPPC における性質、性能について述べていく。

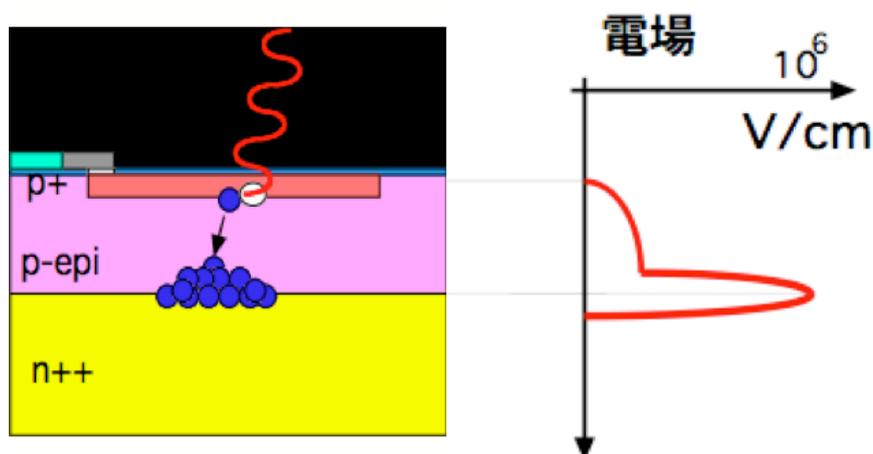


図 2.8 MPPC の構造とアバランシェ増幅の様子

MPPC は図の様な構造をしている。p+ は不純物濃度を上げてキャリアを増やした p 型半導体、n++ はさらに不純物濃度を上げた n 型半導体、p-epi は p エピタキシャル層のことである。赤い波線で表されている入射した光子によって電子(青丸)と正孔(白丸)が対生成される。電子は電場に導かれ電場の高い領域で加速され増幅を起こす。

## 2.3 MPPC の諸性質

今回測定項目として

- ・ Gain
- ・ Noise rate
- ・ Cross talk

の 3 つを用いた。この節ではこの 3 つを主として MPPC の性能に関わるいくつかの性質について述べる。

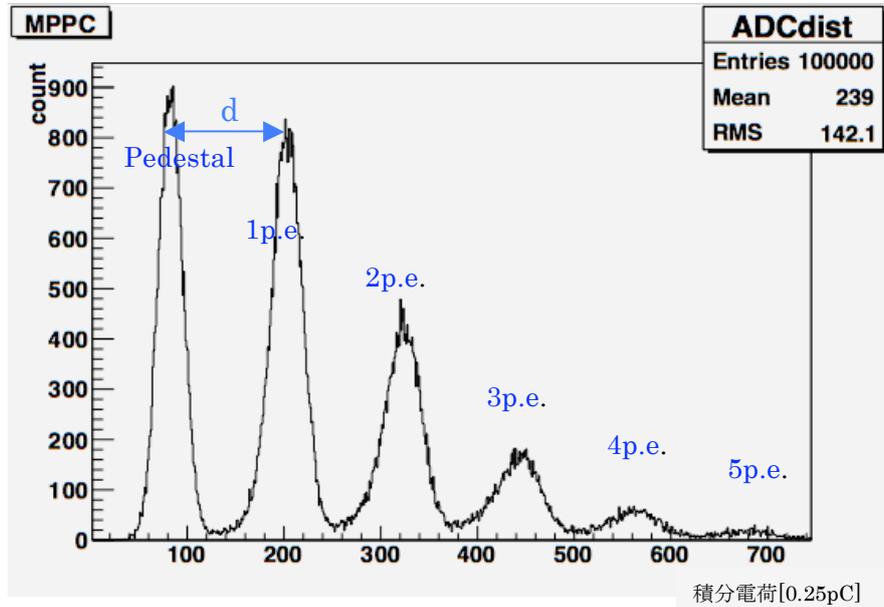


図 2.9 ADC 分布

MPPC の信号をアンプに通して ADC でとったグラフ。図は ADC でゲートを開くと同時に MPPC にかろうじて数光子入射する程度に LED を光らせた時のヒストグラム。MPPC に入射する光子の数に比例して ADC count (X 軸) が多くなっていくのがわかる。d を導くにはこのグラフから pedestal によるノイズの山と 1p.e. の山を二つのガウス分布で Fitting を行い、1p.e. のピークと pedestal によるノイズのピークの差より d を求める。

### 2.3.1 Gain

Gain とは光子が入り電子を叩き出したときのアバランシェ増幅によって増幅された信号の増幅率を指す。電荷の増幅率を  $G$ 、出力信号の電荷量を  $Q$  とおくと、

$$Q = eG \tag{2.2}$$

と表せる。 $e$  は素電荷  $1.6 \times 10^{-19} C$  である。また増幅率は逆バイアス電圧  $V_{bias}$  とブレイクダウン電圧  $V_0$  の差と MPPC の 1 ピクセル当たりの電気容量  $C$  に比例する。つまり次式

$$G = \frac{C}{e} (V_{bias} - V_0) \tag{2.3}$$

で表せる。具体的な Gain の求め方として、この実験では CAMAC の ADC を用いているので図 2.9 に示した ADC 分布の pedestal を差し引いたあとの 1photonelectron (以下 1p.e.) のガウス分布で Fitting したときの平均値を  $d$  として

$$G = \frac{d \times r}{A \times e} \tag{2.4}$$

と表せる。ここで  $r$  : ADC の分解能  $0.25 [pC/ADC \text{ count}]$ ,  $A$  : アンプの増倍率である。

ADC(Analog to Digital Converter)については3.2節で述べる。図2.10はGainの逆バイアス電圧依存性をグラフにしたものである。今回使用したアンプの増倍率だが、値がわかっている信号を入力してADCで測定したところ594.6倍という結果になったので、この値をそのまま使うこととする。アンプの増倍率の決定については付録Aを参照してほしい。

GLD-カロリメータの読み出しをデバイスとして要求される性能として、ノイズと信号の区別からの増幅率が望まれる。

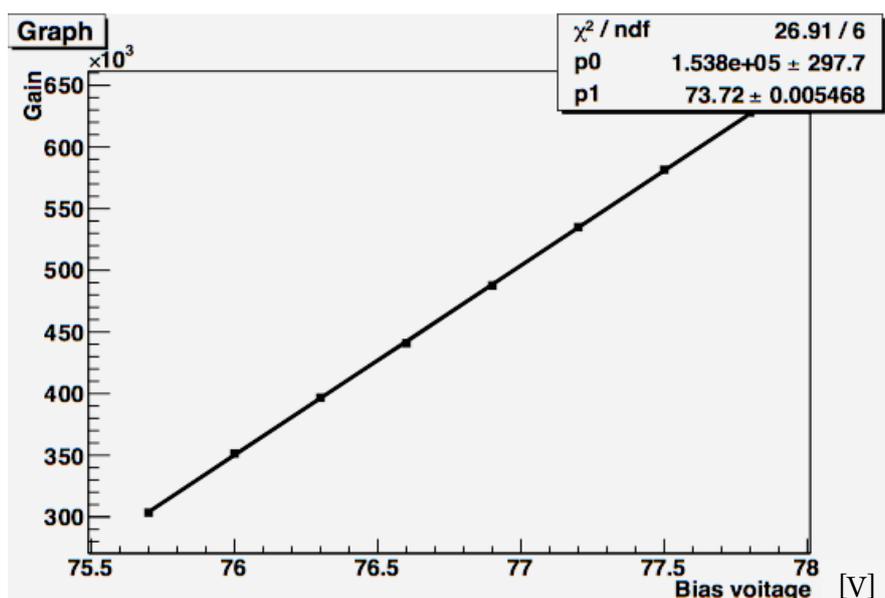


図2.10 Gain

Gainの逆バイアス電圧依存性のグラフ。図2.9のADC分布と式2.4を用いて求めたGainを各Bias Voltageで測定したグラフ。図は直線でFittingしたもの。この時の温度は18°Cである。このグラフの場合、ブレイクダウン電圧が73.72V、1ピクセル当たりの電気容量は傾きを示すp0に素電荷を掛けた $2.46 \times 10^{-14}$  [F]となる。またこのグラフから $G > 10^5$ を満たしているのがわかる。

### 2.3.2 Noise Rate

MPPCはフォトンが入射しなくても主に熱電子が原因でノイズとして信号を出してしまう。空乏層内の電子が熱的に励起され、その電子がアバランシェ増幅して信号となる。これをダークノイズというが、Noise Rateとは一秒間のダークノイズの数のことである。

測定の方法としてはDiscriminatorのThresholdを変えていき、各点でNoise Rateを測定し図2.12のようにThreshold Curveを描く。1 p. e.のピークでNoise Rateは急激に下

がる。その値を参考にして、ガウス関数がある下限以上で積分した相補誤差関数で Fitting を行い 0.5p.e Threshold を決めてやると、その時の値が Noise Rate となる。図 2.13 は Noise Rate の逆バイアス電圧依存性を示したものである。

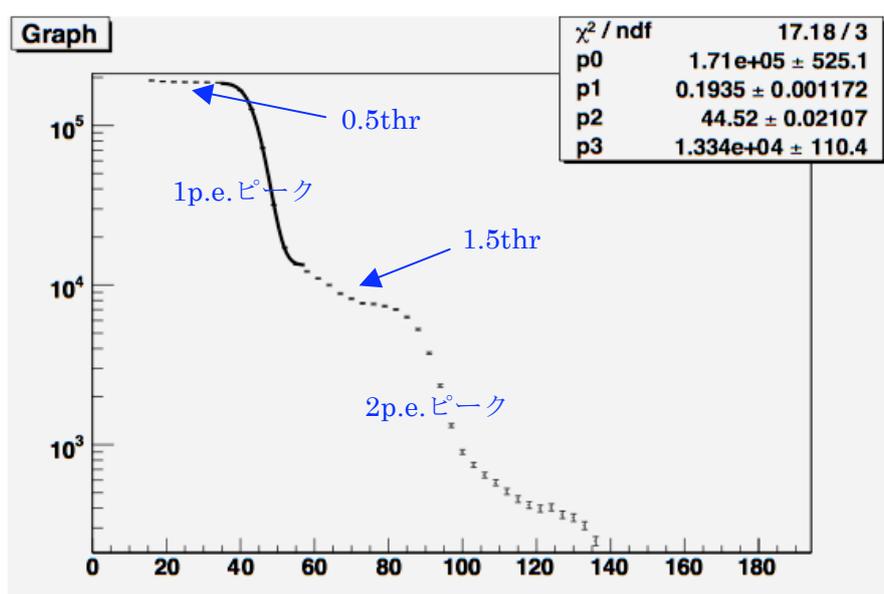


図 2.12 Threshold Curve

Bias Voltage を一定にして各 Threshold での Noise Rate を測定して図示したものである。この図の時の Bias Voltage は 76V である。各 p.e. ピークで急激に値が下がる。急激に値が下がる所を基準に仮の 1p.e. threshold を定義してやり、0.7p.e. ~1.3p.e. threshold の範囲で相補誤差関数を用いて Fitting を行うことにより真の 1p.e. threshold を求めた。1p.e. threshold の値より 0.5p.e. threshold と 1.5p.e. threshold を決定し Noise Rate と Cross Talk を求めた。この図は図 2.9 の ADC 分布と対応関係がある。例えば、この図の 1p.e. ピークの時の Noise Rate はフォトンが入射させずに取った ADC 分布の 1p.e. ピーク以上の 1 秒当たりの count 数の総和となる。これは、ガウス関数と相補誤差関数の関係に等しい。

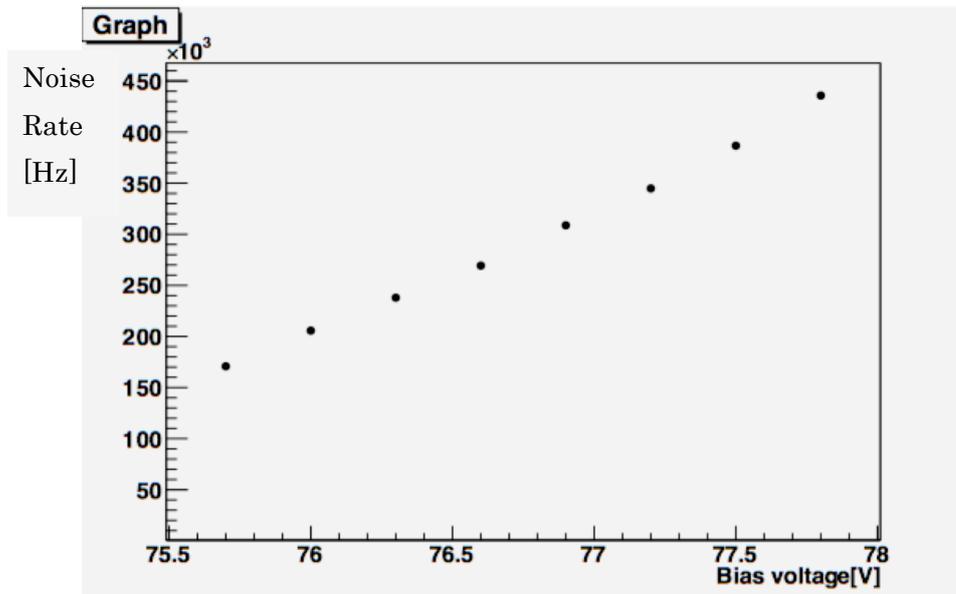


図 2.13 Noise Rate

0.5thr での Noise Rate の逆バイアス電圧依存性のグラフ。図 2.12 の Threshold Curve を各 Bias Voltage で測定する。

### 2.3.3 Cross Talk

APD ピクセルにおいて、アバランシェ増幅の過程で入射した光子とは別の光子が発生することがある。アバランシェ増幅の途中でエネルギーを持った電子がホールと再結合してしまい、励起された電子が自然緩和により下の準位に遷移する。この際、光子を放射する。この光子が増幅したピクセルと隣接したピクセルに入射して、そちらでもアバランシェ増幅を起こしてしまうことがある。つまり Cross Talk とは MPPC のピクセルが隣り合ったピクセルに影響を与え、信号を出させてしまうことである。この場合、MPPC の出力信号は実際に入射した光子数よりも高い値を示す。本論文では Cross Talk を、Cross Talk が起きる確率 (Cross Talk probability) という意味で用いていく。Cross Talk の概念図を図 2.14 に示す。Cross Talk は図 2.12 において 1.5p.e.threshold と 0.5p.e.threshold の Noise Rate の比

$$Crosstalk = \frac{Noiserate_{1.5p.e.thr}}{Noiserate_{0.5p.e.thr}} \quad (2.5)$$

で表すことができる。図 2.15 は Cross Talk の逆バイアス電圧依存性を示したものである。

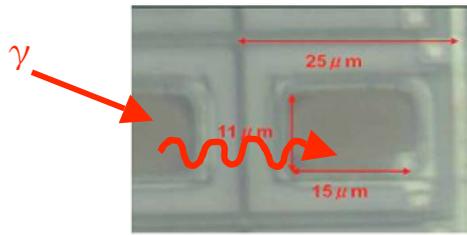


図 2.14 Cross Talk 概念図

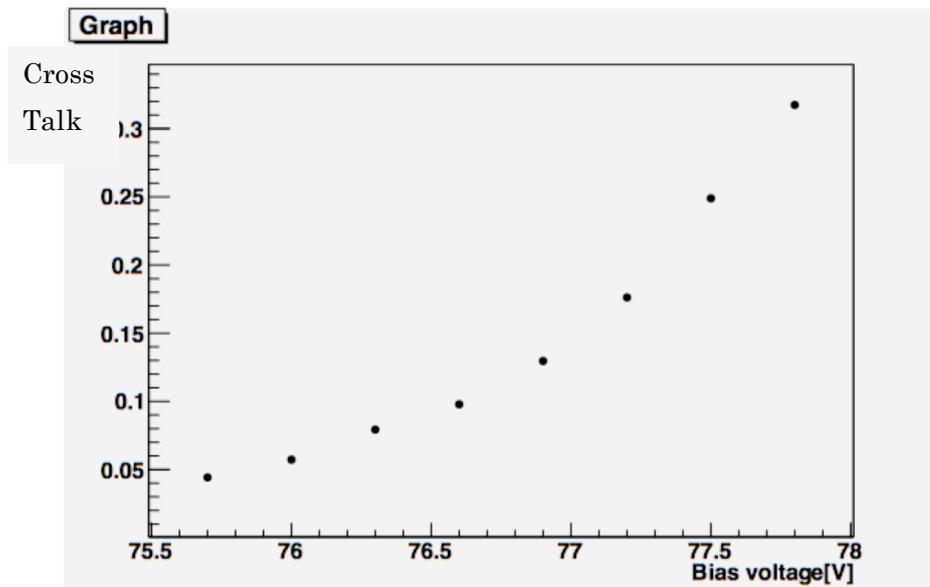


図 2.15 Cross Talk

式 2.5 で導いた Cross Talk の逆バイアス電圧依存性のグラフ。Cross Talk はある点から急激に上昇する（アフターパルスの影響だと思われる。アフターパルスについては 2.3.4 節で述べる）。

### 2.3.4 その他のMPPCの性質

今回の実験項目には入っていないが、重要だと思われる MPPC のいくつかの性質について述べる。

#### 温度変化

半導体である MPPC は少なからず温度の影響を受ける。図 2.16 は Gain の温度依存性をプロットしたものである。ピクセル容量は温度に対して一定であるが、ブレイクダウン電圧

は温度に対して線形の関係があるのがわかっている。その変化の値は筑波大学の研究<sup>4</sup>によると

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta Temp} = (56.0 \pm 0.1) \text{ [mV/K]} \quad (2.6)$$

となる。MPPC の性能はブレイクダウン電圧がパラメータとなる場合が多い。また熱電子の影響で Noise Rate は跳ね上がる。その為温度は重要な意味を持つ。現在、MPPC を使用する場合温度のモニタリングが不可欠である。

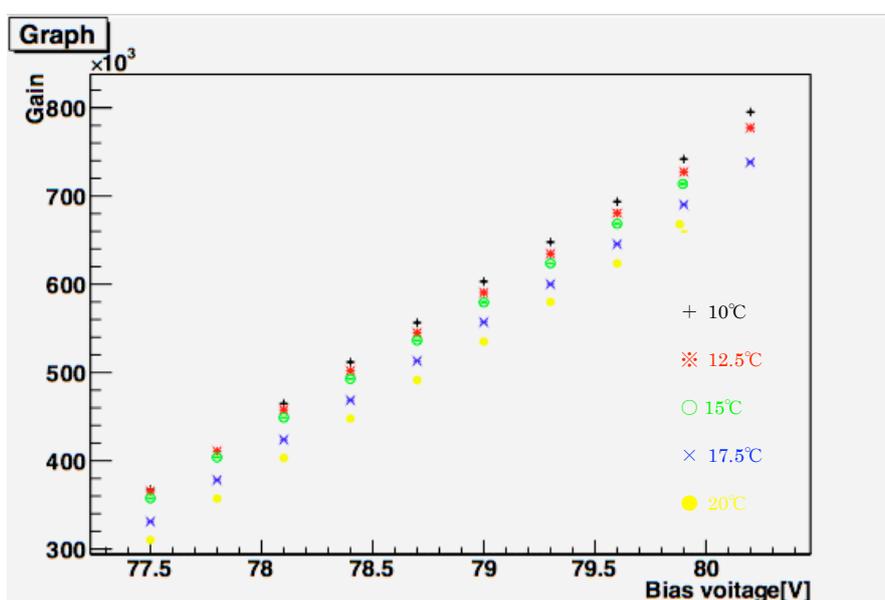


図 2.16 Gain の温度依存性

光子検出効率 (PDE) :

入射したフォトンのうち何%を検出できるかを示す特性が光子検出効率である。フォトン入射時に発生したキャリアすべてが、検出できるレベルのパルスになるわけではない。検出効率は以下の式で表さる。

$$\text{検出効率} = \text{量子効率} \times \text{開口率} \times \text{励起確率} \quad (2.6)$$

ここで、開口率はピクセルに対して増幅が起きる受光部に光子が入射する確率である。励

<sup>4</sup> 参考文献[11] 筑波大学 18年度修士学位論文

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”

起確率は光子が入射したピクセルに対して励起したピクセルの数である。なお、バイアス電圧を高くするほど検出効率は高くなる。

ダイナミックレンジ：

MPPC に当てる光を強くしていくと一つのピクセルに同時に二つ以上の光子が入射することがあるが、その場合でも出力される信号は一つの光子が入射した場合と同じ大きさでしかない。入射光子が多くなると出力の直線性が低下する。応答があるピクセル数は次の式

$$N_{fired} = N_{total} \times \left\{ 1 - \exp\left( \frac{-N_{photon} \times PDE}{N_{total}} \right) \right\} \quad (2.7)$$

で表せる。ここで、 $N_{fired}$ ：励起ピクセル数、 $N_{total}$ ：全ピクセル数、 $N_{photon}$ ：入射光子数である。しかし、実際の測定に適応する為には式(2.7)の加えて不感時間も考慮に入れる必要がある。

アフターパルス：

増幅で発生した電子が格子欠陥にトラップされて、それが遅れて解放されたときにもう一度アバランシェ増幅を起こして信号を出してしまう現象のことをアフターパルスと言う。温度が低いほど、キャリアが欠陥にトラップされる確率が高くなるため、アフターパルスは増加する。アフターパルスを起こす確率の測定は難しい。アフターパルスの測定については参考文献<sup>5</sup>を参照していただきたい。

信号出力の時間のゆらぎ：

ピクセルの出力パルスのタイミングは、光子の入射するピクセルの位置や光子が入射するタイミングによってある程度のゆらぎが生じる。異なるピクセルに同じタイミングで光子が入射しても、必ずしもまったく同じタイミングでパルスが出力されるわけではない。いつ光子が入射したか知りたくてもこのゆらぎ以下の時間差は見分けることができない。よって、MPPC では見分けることができる最小の時間差が時間分解能となる。時間のゆらぎの分布をガウス関数で Fitting した場合の FWHM を時間分解能として定義する。今回用いた 1600 ピクセルの MPPC の時間分解能は 250ps である<sup>6</sup>。

---

<sup>5</sup> 参考文献 [13] 京都大学 19 年度修士学位論文

五味慎一 “半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築”

<sup>6</sup> 参考文献 [4] 浜松ホトニクス社 資料 <http://jp.hamamatu.com/>

# 第3章 MPPCの特性の研究

## 3.1 研究目的

前章までで述べてきたようにMPPCは非常にすぐれた光検出器であり、高いゲイン、増幅領域が非常に小さく磁場の影響を受けにくい、単価が安く大量に使用しても低予算ですむ、非常に小さいためデッドスペースの低減などGLDカロリメータの読み出しデバイスとして適している。

けれどもMPPCはまだ開発途上のデバイスであり、R&Dが続けられている段階であるのが現状である。高エネルギー加速研究機構(KEK)をはじめ、GLDカロリメータの読み出しデバイスとしての使用に向けてMPPCを研究している研究所や大学は多い。そのためMPPCについて色々なテストがされてきたが、安定性や耐久性のテストはまだまだ少なくこれからも行う必要があると思われる。

様々な実験を行う予定のILCにおいてデバイスの安定性や耐久性は重要な問題である。MPPCの安定性能が低いとそれだけでデバイスとして不適切となりかねない。そのため本研究では安定性能をテストしてGLDカロリメータのデバイスとして適したMPPCを浜松ホトニクス社や各大学の共同研究者と開発していくのが目的である。

## 3.2 測定方法

今回評価対象として用いたデバイスは、浜松ホトニクスから納入された1600ピクセルのMPPC(S10362-11-025MK)である。

MPPCの読み出しには図3.1のような回路を用いている。

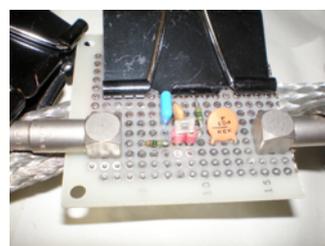
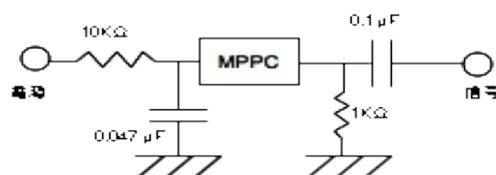


図 3.1 MPPC 読み出し回路

MPPC の測定項目である Gain の測定には CAMAC のモジュールである ADC (Analog to Digital Converter) を用いた。ADC を用いると、測定したいアナログ信号をゲート信号が入っている間積分を行うことで信号の電荷を数量的に扱うことができる。ADC に信号とゲートと入れたときの概念図を図 3.2 に示す。ADC の 1 count 当たり 0.25pC の電荷に相当する。また注意すべき点として、ADC では常に上げ底状態で測定されるため、ADC の値がそのまま信号の電荷量とはならない。信号の電荷量を求めるにはペDESTALを差し引かなければならない。ペDESTALとはつまり、ADC の上げ底部分をゲート信号が入っている間積分したもの。そのため、信号を測定する際は一緒に信号が何も入っていない状態であるペDESTALも測定する必要がある。

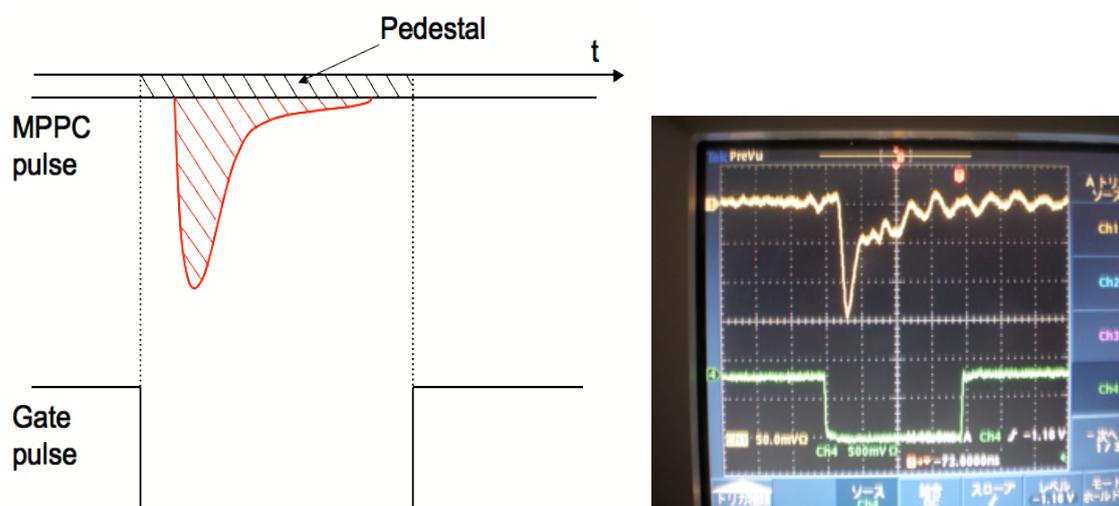


図 3.2 ADC 概念図

ゲートが開いている間信号の積分電荷量を測定することができる。右図は実際にアンプを通した MPPC の信号とゲート信号をオシロスコープで読み出したもの。ゲート幅は 150ns として測定した。

実験のセットアップを図 3.3 に示す。測定装置は何度も測定するので、手間の軽減のためになるべくプログラムでパソコンから自動化できるように試みた。具体的には MPPC に印加する電圧の変化、信号を選別する discriminator の Threshold の変化、ADC と scaler の値の読み取りをパソコンから操作できるようにした。ただし、Gain の測定と Noise Rate, Cross Talk の測定の際の切り替えのときに LED の ON と OFF は装置の都合上自動化できなかったため手動で切り替える。Gain の測定では Clock generator を用いて LED を光らせると同時に、同じタイミングで Gate generator でゲート信号を作り ADC で読み出して、各電圧で測定する。Noise Rate と Cross Talk の測定は、discriminator で Threshold を変えな

から信号を選別して scaler で読み出す。この時 Clock generator は単位秒当たりの Noise Rate と Cross Talk の測定するために時計代わりとして用いた。また、測定環境をなるべく一定にするため図 3.4 のように MPPC を恒温槽の中に入れて温度一定の下で、さらに恒温槽に暗幕を掛けて光を遮断して測定を行った。

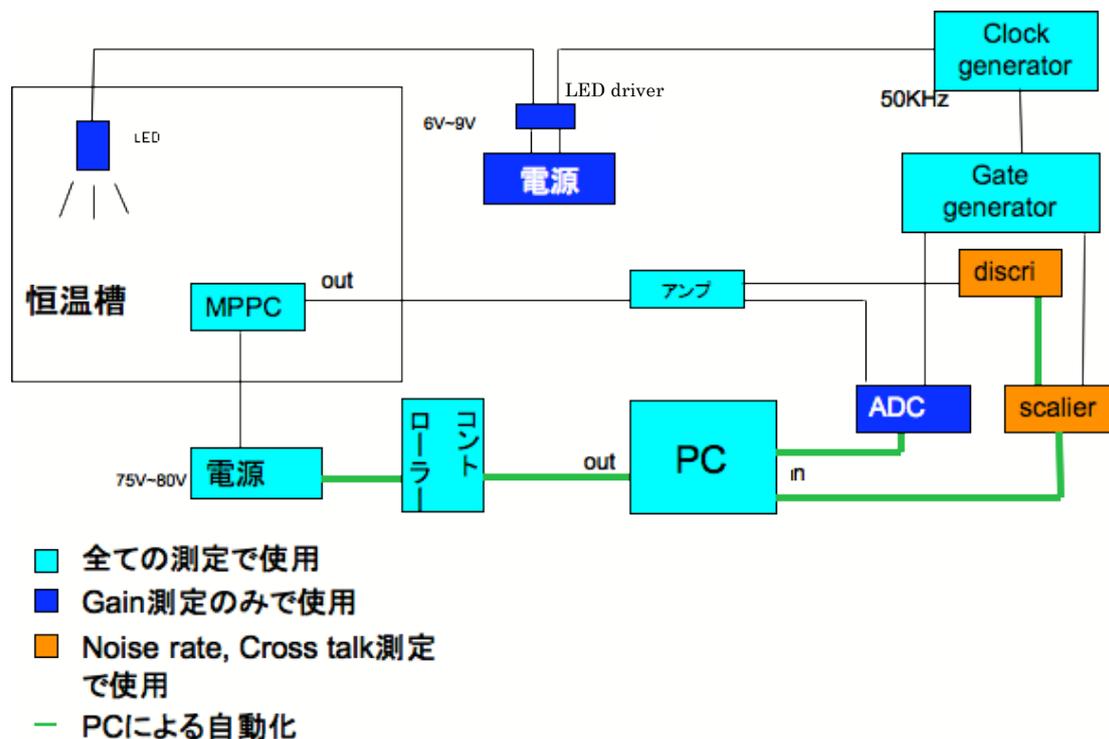


図 3.3 測定のセットアップ



図 3.4 恒温槽

### 3.3 測定結果

今回、性能の評価項目としたのは2.3節でも述べたように

- ・Gain
- ・Noise Rate
- ・Cross Talk

の3項目とする。また、今回 MPPC に対して行った実験としては

- ・温度サイクル
- ・ガイガーモードで強い光を当てる
- ・順バイアスに電流を流す

の3項目を行った。

#### 3.3.1 温度サイクル

恒温槽を用いて温度を上げたり下げたりして性能の変化を観測する。今回は10°Cを2時間、40°Cを2時間の計4時間を5サイクル行った。2時間の内、温度が一定になるのに15分程度かかった。また、バイアス電圧が掛かっていたのは測定していた30分だけである。図3.5、図3.6、図3.7にGain、Cross Talk、Noise Rateの変化を示す。付録Cより、これらの変化は誤差の範囲内といえるので5サイクルではほとんど変化がなかったと結論付けた。

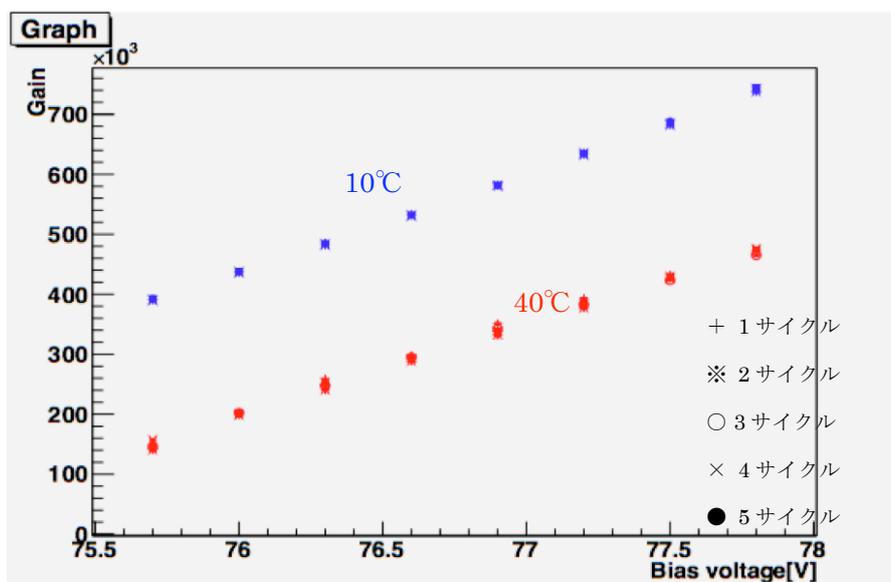


図 3.5 温度サイクル時の Gain の変化

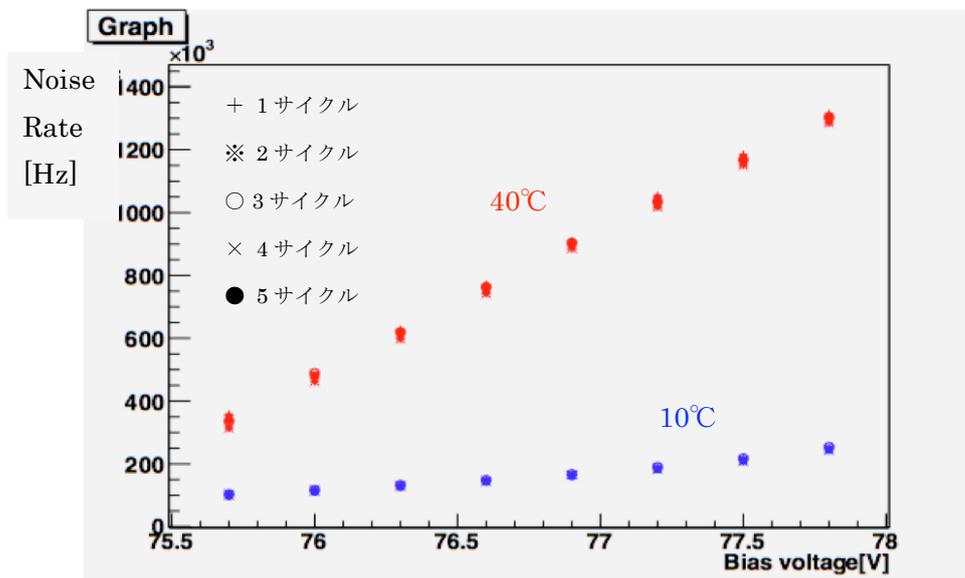


図 3.6 温度サイクル時の Noise Rate の変化

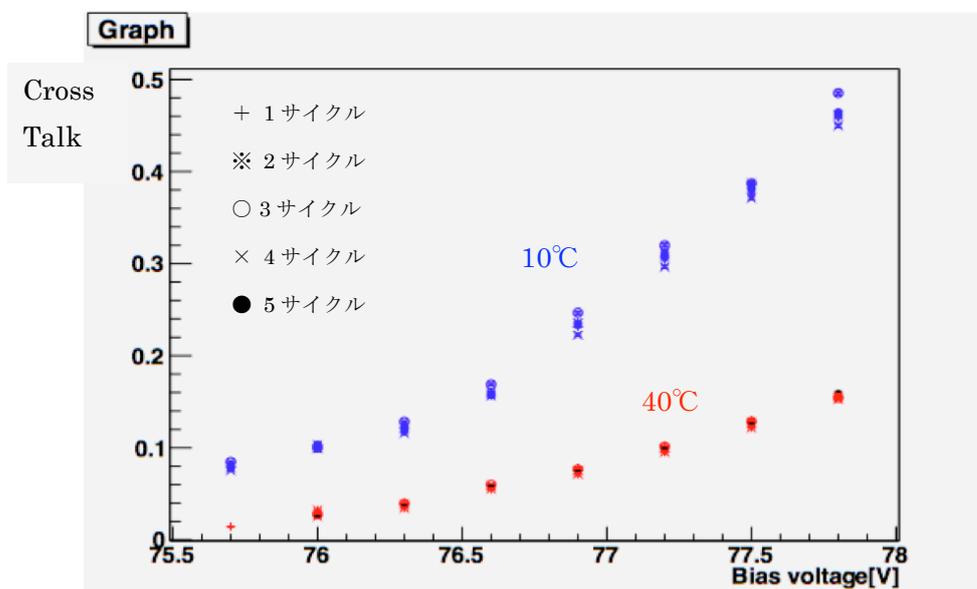


図 3.7 温度サイクル時の Cross Talk の変化

### 3.3.2 光に対する耐性

ガイガーモードで動作中の MPPC に強い光を当てた。MPPC は通常、数フォトンなど極微弱な光の測定に向く様な光検出器である。ILC においてもシンチレータを用いて粒子の測定に用いる。多数のピクセルで同時にアバランシェ増幅が起きるような光は電流が流れすぎて MPPC に悪い影響を起こす危険性がある。そのような光で一番可能性のあるのは、ガイガーモードで動作中のまま MPPC が設置してある恒温槽や暗箱などの装置を開けてしまうことによる蛍光灯の光や自然光であると思われる。そのため、今回はわざとガイガーモードの MPPC に少し強い程度の光を当ててその前後で影響があるか調べた。ILC に用いるためにも万が一の為に調べる必要はある。当てた時間は5分間で光源には懐中電灯を用いた。図 3.8、図 3.9、図 3.10 に強い光を当てた前後での Gain、 Noise Rate、 Cross Talk の変化を示す。光を当てた直後、2 時間後、1 日後と測定したが、付録 C より、これらの変化は誤差の範囲内といえるので懐中電灯程度の光での影響はなかったと結論付けた。

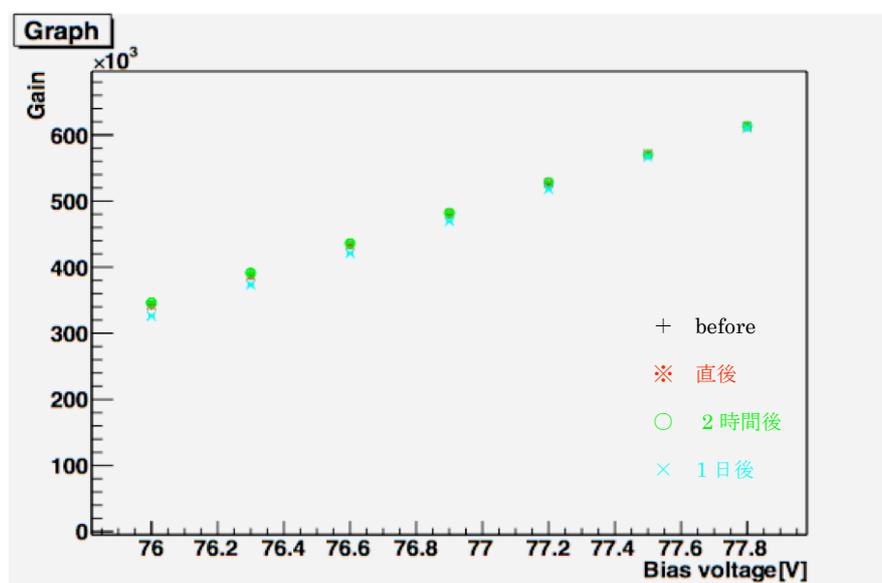


図 3.8 光を当てた時の Gain の変化

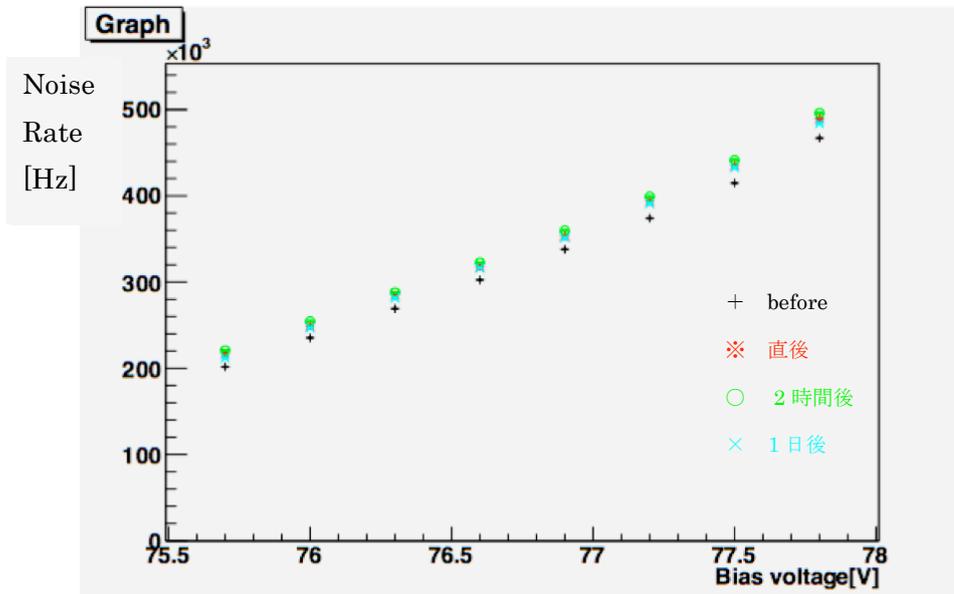


図 3.9 光を当てた時の Noise Rate の変化

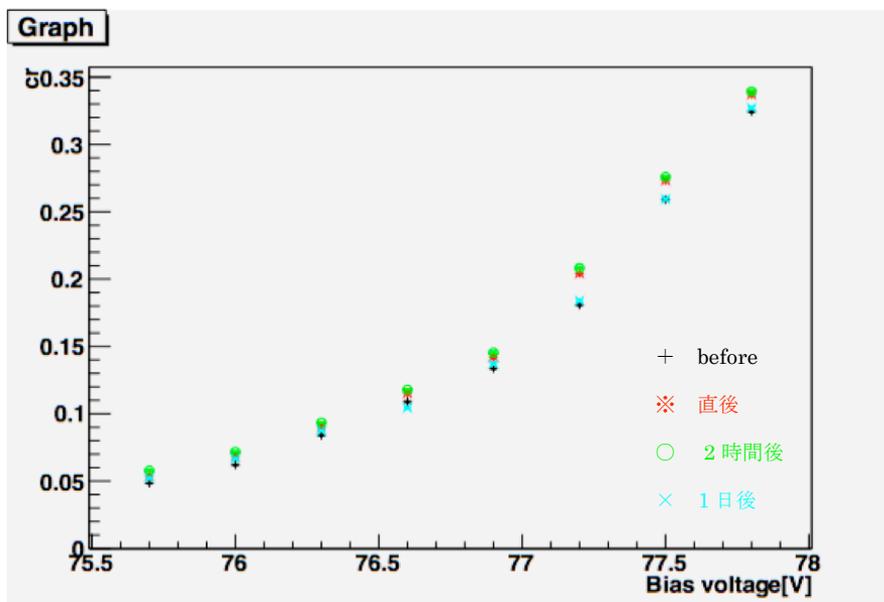


図 3.10 光を当てた時の Cross Talk の変化

### 3.3.3 順バイアス

MPPC は逆バイアスのガイガーモードで使う。MPPC を普通に扱う分には順バイアスを掛けることはないが、付録 B で示すように MPPC のクエンチング抵抗を測定する際は順バイアスを掛ける。また、とても小さい素子なので注意して扱わないと、読み出し回路に逆に取り付けることもありうる。MPPC の特性を知る上でも順バイアスを掛けた場合の影響を知るのは有意義であると思われる。このような理由から、順バイアスを掛けて電流を流した前後で比較した。10mA の電流を 5 分間流した。この時の電圧は約 2V 程度である。図 3.11、図 3.12、図 3.13 に順バイアス電圧を印加する前と直後、2 時間後、5 日後、10 日後での Gain、Noise Rate、Cross Talk の変化を示す。なお測定の間以外では MPPC に電圧を印加していない。

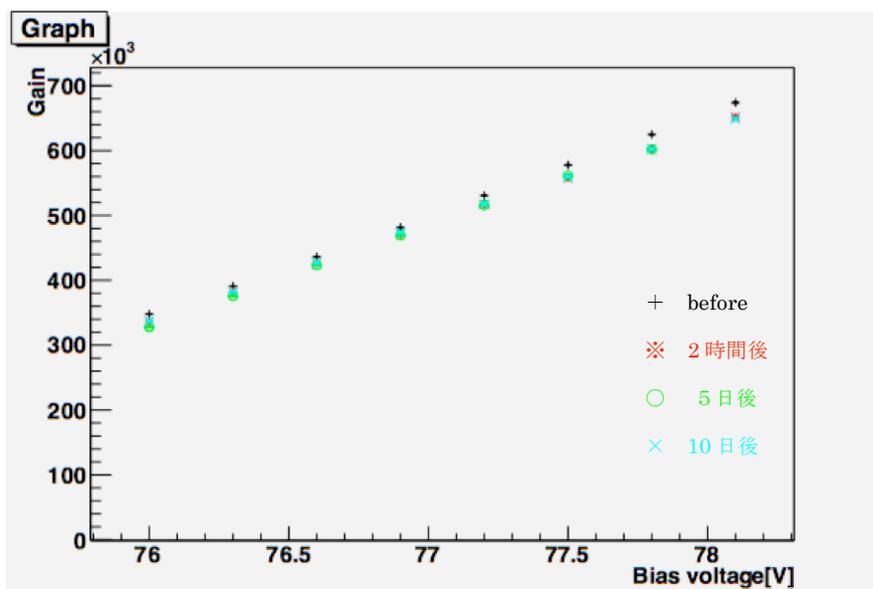


図 3.11 順バイアス電圧を印加した前後での Gain の変化  
測定している間以外では逆バイアスを印加していない

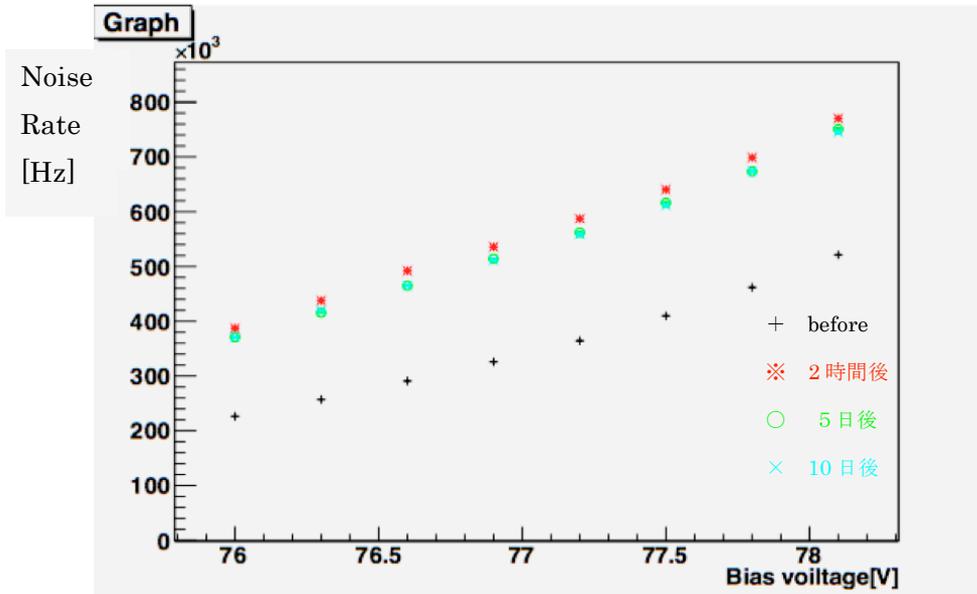


図 3.12 順バイアス電圧を印加した前後での Noise Rate の変化  
測定している間以外では逆バイアスを印加していない。明らかに before と印加後で変化が見られる。

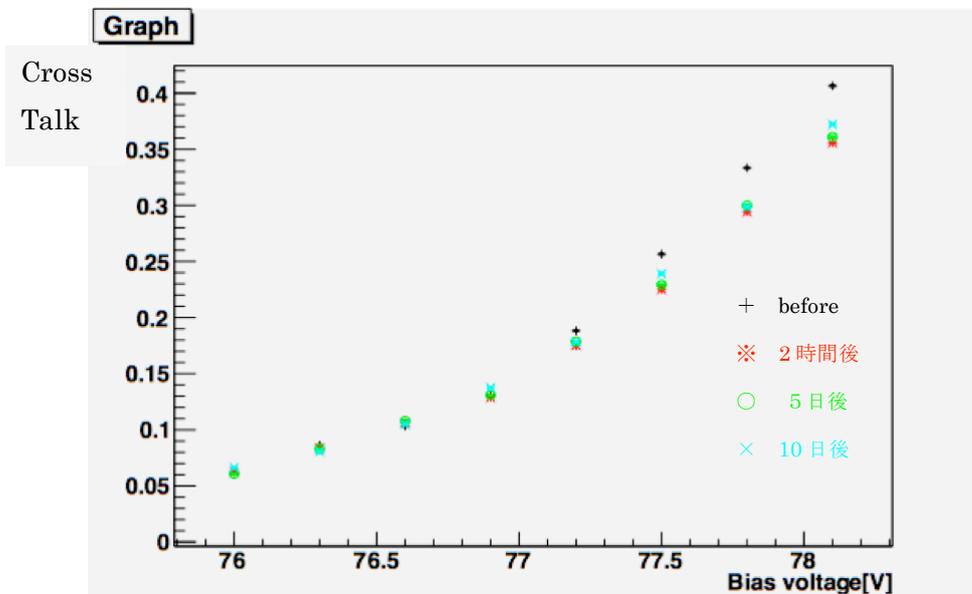


図 3.13 順バイアス電圧を印加した前後での Cross Talk の変化  
測定している間以外では逆バイアスを印加していない

図 3.10 Gain と図 3.12 Cross Talk については値が多少下がったようにも見えるが、付録 C と比べても ILC の読み出しのデバイスとして影響がでる程ではない。一番顕著なのが Noise Rate の増加である。順バイアスを掛ける前と比べて 170%にもなった。大変興味深い結果であり、もう少し調べる必要がある。そこで、Noise Rate について同様に 1mA と 5mA の電流が流れるように逆バイアス電圧を印加した場合の Noise Rate の測定結果を図 3.14 に示す。1mA と 5mA の電流が流れるバイアス電圧を印加していた時間は、両方とも 10mA と同様に 5 分間とした。この時、印加していたバイアス電圧は 1mA の時が約 0.7V、5mA の時が約 1.3V である。

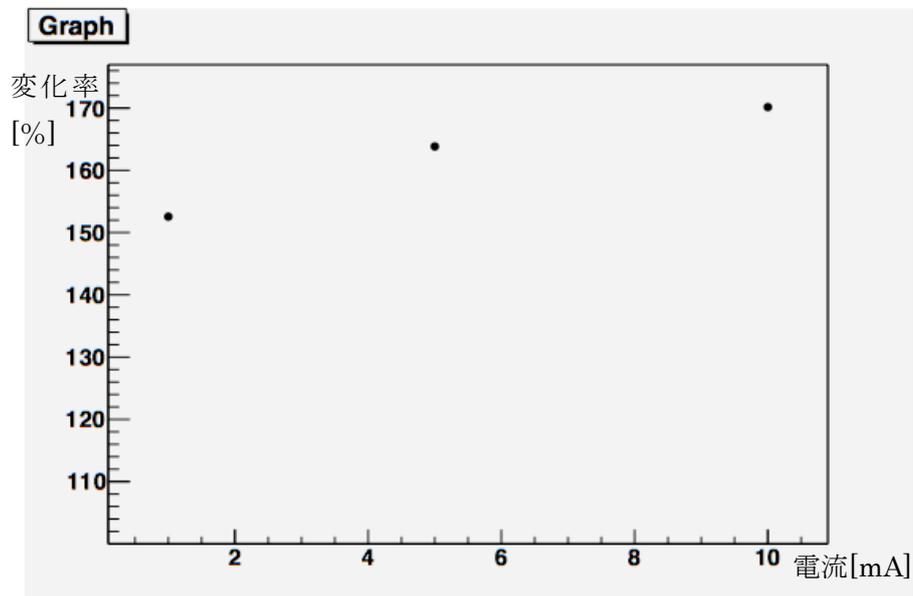


図 3.13 順バイアス電圧を印加した場合に流れる電流に対する Noise Rate の依存性  
 図はバイアス電圧が 76.3V の時の before を 100%としたときの 2 時間後のそれぞれの電流での変化率である。

## 第4章 結論と今後の課題

### 4.1 測定結果のまとめ

- ・ 10°Cと40°Cの2時間(逆バイアス電圧が掛かっていたのは30分)おきに5サイクルの温度変化ではMPPCの性能の変化は見られなかった。
- ・ ガイガーモードのMPPCに懐中電灯の光を5分間照射したが、MPPCの性能の変化は見られなかった。
- ・ 1mAでも5分間の間順バイアス電圧を印加し、電流を流すとNoise Rateは1.5倍以上に跳ね上がった。

上記の様に、本研究の目的である安定性能を確かめたが、順バイアスで電流を流した結果を除けば十分安定だと言える。しかし、順バイアスで少し電流を流しただけでNoise Rateが跳ね上がったという結果は大変興味深い。この結果から順バイアスはMPPCに絶対流してはいけないこととなる。GLD カロリメータに用いる際には順バイアスに電圧を掛けないように取り扱いに注意が必要である。また、なぜAPDを並列に繋いだだけのMPPCに順バイアスを流すとNoise Rateが跳ね上がるかなど、MPPCの内部構造的にも原因を探っていく必要がある。

### 4.2 今後の課題

順バイアスの影響を詳しく調べる為に行うべきである実験を以下に記す。

- ・ 低電流  
今回の実験では1mA以下は測定していない。 $\mu\text{A}$ のオーダーでも順バイアス方向に電流を流すと今回の結果と同様にNoise Rateは増えるか。
- ・ 時間依存性  
今回の実験では順バイアスを印加していた時間は全て5分間であった。印加する時間を1分、10秒、1秒のように5分間以下の時の影響を調べる。

- ・ 逆バイアス電圧でも同程度の電流を流す

今回の実験では順バイアス方向に電流を流すと Noise Rate が増えるという結果であったが、逆バイアス方向に同程度の電流を流すと Noise Rate はどうなるか。普段逆バイアスで動作させていても 1mA もの電流が MPPC の逆バイス方向に流れることはまずないと言える。そのため、逆バイス方向にも電流を流して影響を調べる。

- ・ 順バイアス電圧を印加中の 1 ピクセルの画像

逆バイアス方向に電流を流している時、局所的な熱が発生してその影響があるかもしれない。順バイアス電圧を印加して電流を流している MPPC の 1 ピクセルの熱分布のわかる画像を測定することで局所的な熱の影響を調べる。

- ・ 順バイアス電圧を印加した後逆バイアス電圧を印加して放置

今回の実験では順バイアス電圧を印加し電流をながして一度 Noise Rate が増えた素子は、日数が経っても元の Noise Rate に戻る兆しは見られなかった。この時は外部から何も刺激を与えていなかった。逆バイアスを印加したまま日数が経過しても Noise Rate が、元に戻らないか調べる。

また、GLD に用いるために調べるべき項目として

- ・ 長期安定性
- ・ 磁場耐性
- ・ 放射線耐性

などがあげられる。

その他にデバイスとして性能の温度依存性、Cross Talk とアフターパルス、素子ごとの性能のばらつきなどは改善していきたい点である。

## 付録 A アンプの増幅率の決定

今回、実験で用いた ASD アンプは増幅率が不明であった。そのため、式 2.4 で Gain を測定するためにはアンプの増幅率を決定する必要があった。その方法として、ASD アンプと最初から増幅率のわかるアンプに同じ信号を入れて、得られた値の比から ASD アンプの増幅率を求めることとした。既に倍率が知られているアンプとして浜松ホトニクス製のアンプを用いた(図 A. 1)。浜松ホトニクス製のアンプは 63 倍の倍率を示す。

MPPC の信号を浜松ホトニクスのアンプを通して ADC で測定したのが図 A. 2 である。Pedestal である一つ目の山と 1p. e. が入射したときの 2 つ目の山をそれぞれガウス分布で Fitting を行い、それぞれの頂点の差を求めた。

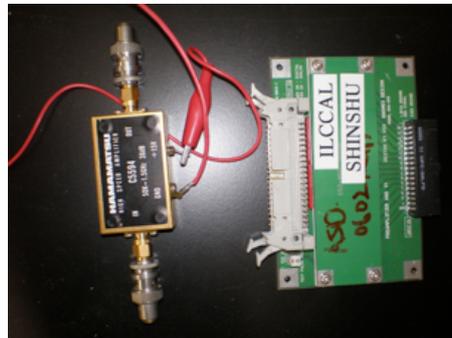


図 A. 1 63 倍の浜松ホトニクス製のアンプ(左)と ASD アンプ(右)

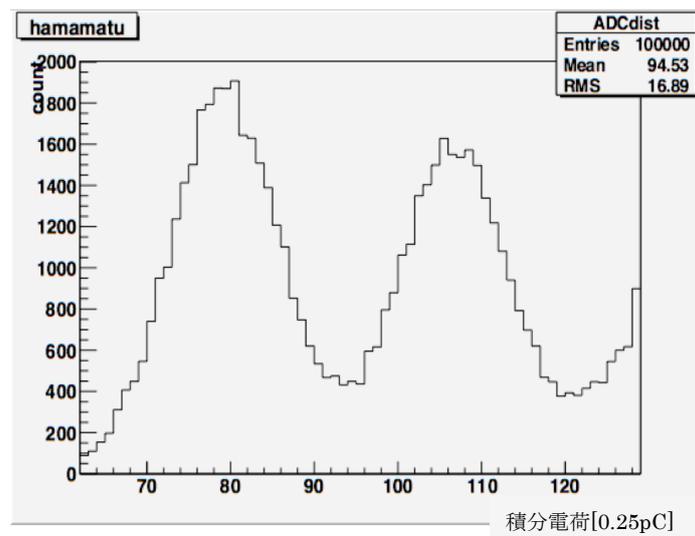


図 A. 2 MPPC の信号を 63 倍のアンプを通した時の ADC 分布

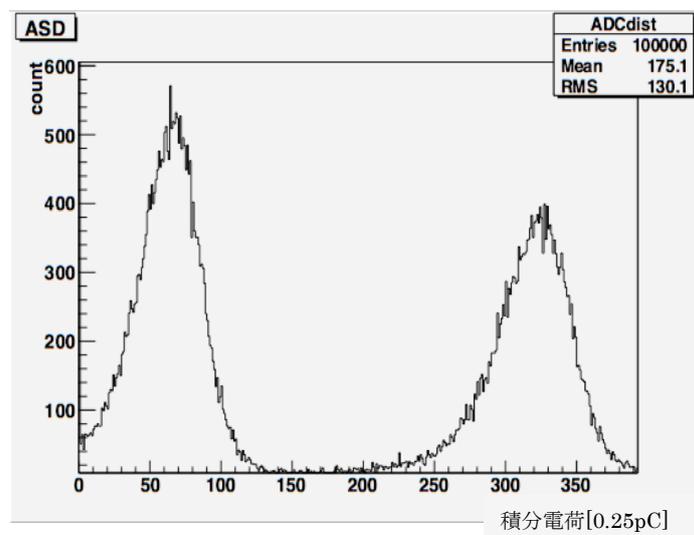


図 A. 3 MPPC の信号を ASD アンプに通した時の ADC 分布

ASD アンプでも図 A. 3 の様に ADC 分布を取り、同様に 2 つのガウス分布で Fitting を行い、ピークの差を求めた。その結果、浜松ホトニクス製のアンプの 63 倍との比より ASD アンプの倍率は 596.4 倍となった。本論文ではこの値を用いて Gain を求めている。

## 付録 B クエンチング抵抗の測定

MPPC の 1 ピクセルは図 B. 1 のように APD とクエンチング抵抗からなっている。クエンチング抵抗を APD に接続すると、フォトンが入射した APD からクエンチング抵抗に電流が流れて電力が消費される。信号が出力され、APD は再び印加電圧によって再充電される。

クエンチング抵抗の測定には順バイアスを用いる。APD は半導体の pn 接合なので、順バイアス方向には普通に電流が流れるので図 B. 2 の様にセットして図 B. 3 のように電圧計と電流計で電圧電流依存性を図示すればオームの法則より傾きが MPPC 全体の合成抵抗となる。図 B. 3 より MPPC のクエンチング抵抗は  $0.195 \pm 0.003 \text{M}\Omega$  であることがわかった。

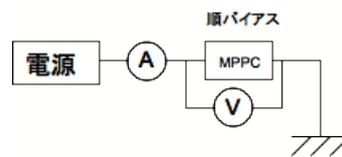
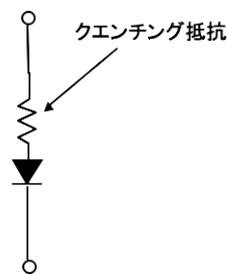


図 B. 1 MPPC の 1 ピクセル

図 B. 2 クエンチング抵抗測定のセットアップ

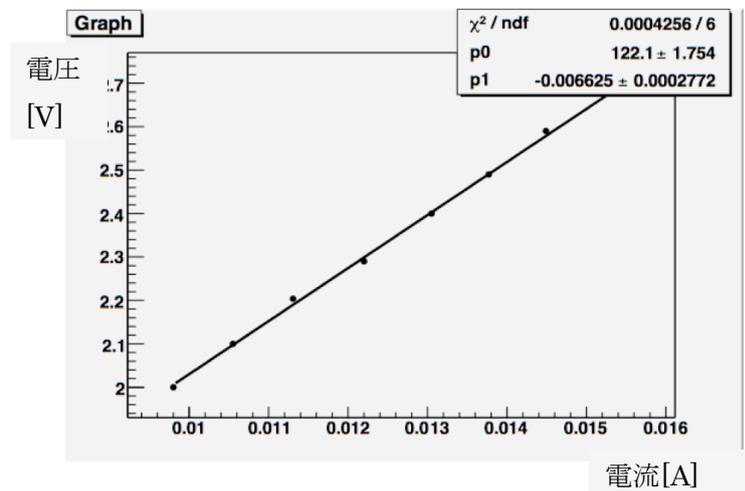


図 B. 3 順バイアスの電圧電流依存性

傾きを示す p0 の 122.1 が合成抵抗の値  $[\Omega]$  となる。実験に用いている MPPC は 1600 ピクセルなので p0 に 1600 を掛けた  $0.195 \pm 0.003 \Omega$  が 1 ピクセル当たりのクエンチング抵抗となる。

## 付録 C リファレンスの測定

各実験では温度変化による影響を無くすため恒温槽を用いて、温度一定の条件で測定を行った。しかし、室温の影響で恒温槽の中の温度も多少なりとも変化してしまう。また、ノイズや作成したプログラムによる Fitting にも誤差が生じるかもしれない。

各実験の影響による変化を確かなものとするためにリファレンスとして各実験で刺激を与えた素子とは別に、刺激を与えていない素子を恒温槽の設定温度 18°C の下で日時を変えながら同様に Gain、Noise Rate、Cross Talk を測定した。Gain、Noise Rate、Cross Talk の結果を図 C. 1、図 C. 2、図 C. 3 に示す。この測定結果より、3.3.1 節、3.3.2 節、3.3.3 節の実験において同じ電圧で before と after が Gain は  $2 \times 10^4$  程度、Noise Rate は  $2 \times 10^4$  程度、Cross Talk は 0.02 程度の変化ならば誤差とした。

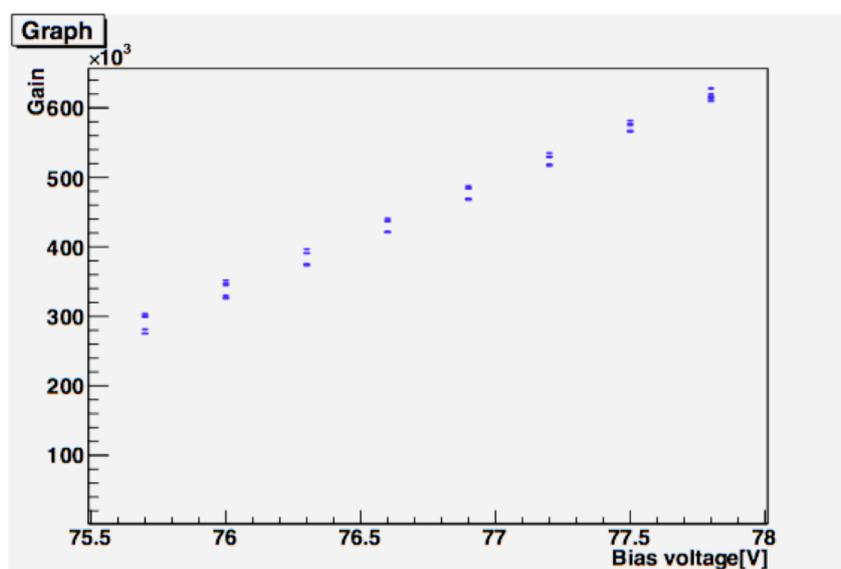


図 C. 1 リファレンスとしての Gain の測定

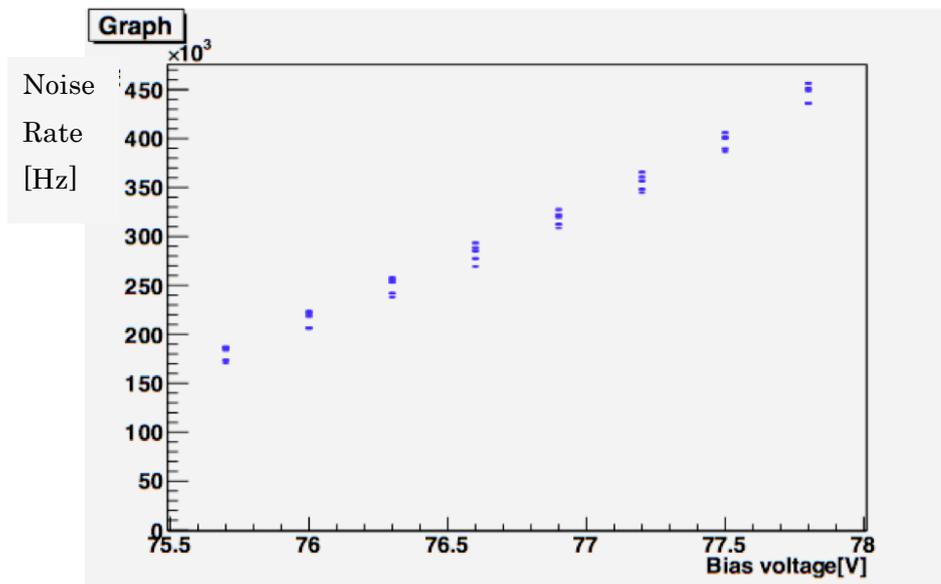


図 C.2 リファレンスとしての Noise Rate の測定

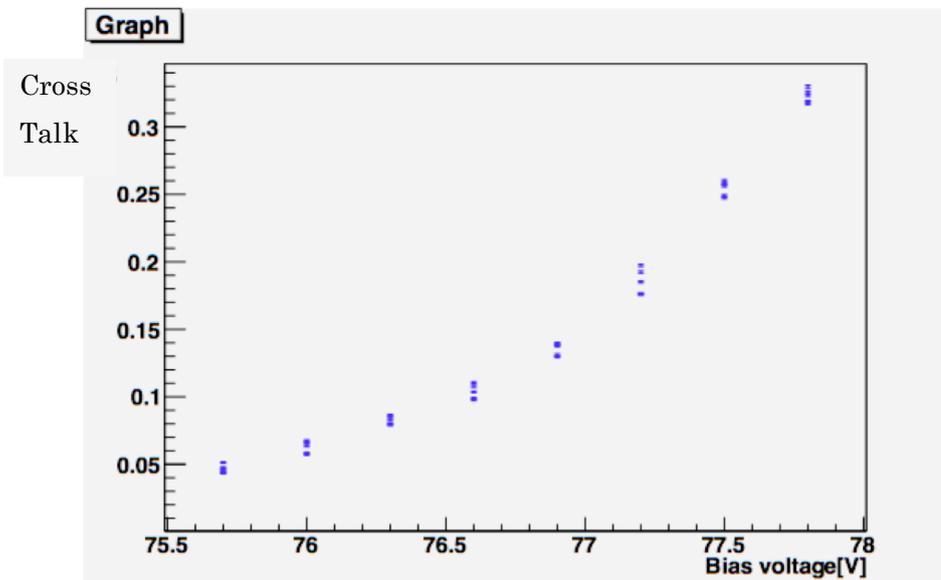


図 C.3 リファレンスとしての Cross Talk の測定

## 謝辞

高エネルギー研究室に所属してからの1年間、本当に多くの方々に助けられながら研究をしてきました。未熟な私がここまで来られたのはひとえに皆様方のお力添えのおかげです。

研究をご指導していただいた竹下徹教授、長谷川庸司準教授の御二人には大変お世話になりました。御二人は忙しい身にも関わらず無知な私に適切な助言や技術的な御指導して頂き、沢山御迷惑をお掛けしたと思いますが、沢山の事を学ばせて頂きました。改めて御礼を申し上げます。現在神戸大学に在籍されている魚住聖さんにはMPPCについて直接御指導頂き感謝しています。まだ、右も左もわからなかった私を適切に導いていただき、本当にありがとうございました。魚住さんがいらっしゃられなかったら、ここまで辿り着けなかったと思います。

MPPC の制作元である浜松ホトニクスの方々には素子の提供や技術的な御指導感謝致します。また、1、2回しかミーティングに参加しなかった私に多くの助言をして頂いた他大学の皆様にも、御礼を申し上げます。

研究室の院生の方々には勉強はもちろんのこと勉強以外でもさまざまなことでお世話になりました。また、学部生としてのこの4年間。共に歩んだ研究室や物理科の友人達、寮生活での友人達、部活の先輩や後輩それに同期の方々、沢山の人に支えられながらここまで来ました。充実した学生生活を送れたのは皆さんのおかげです。この場を借りて深く御礼を申し上げます。

最後に学生生活を通じてさまざまな形でお世話になった両親に、この場を借りて御礼を申し上げます。本当にありがとうございました。

2008年3月

佐久間 隆幸

## 参考文献

- [1] ILC project <http://www.liner-collider.org/>
- [2] Japanese Group on Collider Physics and Detectors  
<http://www-glc.kek.jp/>
- [3] KEK 測定器開発室 <http://rd.kek.jp/>
- [4] 浜松ホトニクス社 資料 <http://jp.hamamatu.com/>
- [5] 放射線計測ハンドブック  
Glenn F. Knoll 著 木村逸郎/坂井英次 訳
- [6] 素粒子物理入門 渡邊靖志 著
- [7] 素粒子を探る粒子検出器 政池明 著
- [8] 半導体エレクトロニクス 石原宏 著
- [9] 素粒子物理学 原康夫 著
- [10] 坪川貴俊 “MPPC の性能評価方法の研究”  
信州大学 工学系研究科 修士学位論文(2007 年)
- [11] 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 数理物質科学研究科 修士学位論文(2007 年)
- [12] 田村勇樹 “次世代線型加速器実験へむけての新型光検出器の評価”  
神戸大学 自然科学研究科 修士学位論文(2007 年)
- [13] 五味慎一 “半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築”  
京都大学 理学研究科 修士学位論文(2008 年)