

修士学位論文
次世代線型加速器実験へむけての
新型光検出器の評価

神戸大学大学院 自然科学研究科
博士課程前期課程
物理学専攻
高エネルギー物理学研究室

046S115N

田村 勇樹

指導教官

川越清以

平成 18 年 2 月 14 日

概要

現在計画中の電子陽電子衝突型加速器実験においては、その存在が理論で予見されつつも未だ発見されておらず LHC(Large Hadron Collider) にておそらく発見されるであろうヒッグス粒子の性質の精密測定、また標準理論を越える物理の探索などの様々な要請によりその検出器は従来のもよりも高性能なものが望まれている。

現在神戸大学では実験における粒子検出器の一つであるカロリメータについて研究を行っている。カロリメータは様々な種類があるが、ILC のカロリメータにおいては(シンチレータ)+(Pb もしくは W)+(光検出器)のサンプリング型カロリメータが研究されている(新潟大学の NEM, 筑波大学の TEM など)。カロリメータについてはシミュレーションにおける最適化が研究されると同時に、ここに用いる光検出デバイスについても様々な種類が検討されているが、カロリメータに要求されている性能として、ジェット(発生粒子の束)の成分を分割する為の granularity(細分割性)の高さ、および入射までの物質量を小さくする為にカロリメータ全体がトラッキングチェンバーに使用する 2~3T(テスラ)のソレノイドコイルに内包されることによる磁場に対する安定性の高さが挙げられ、このことから多チャンネルであるか単価が安いこと、またそれに加えて磁場による性能変化が小さいことがデバイスには要求される。

これらの要求を満たすものとして近年有力視されているものに MPPC(Multi Pixel Photon Counter)・SiPM(Silicon Photo Multiplier)がある。MPPC(SiPM)は APD をピクセル状に配列した構造を持つ半導体光検出器で、増幅領域が極短距離であることから磁場に対して増幅率が不安定になることもなく、またその仕組み上 1p.e 分解能もよいとされており、単価も\$10(予定)と安価で上に挙げた要求を満たしている。しかしロシア製 SiPM も浜松ホトニクス(株)製 MPPC もまだ開発途上の段階にあるデバイスであり様々な問題を抱えている。

本研究ではロシア製 SiPM、及び浜松ホトニクス社製 MPPC の性能を測定すると同時にその問題点や開発・研究に関する今後の課題を打ち出すことを主な目的としている。

目次

| | |
|----------------------------------|-----------|
| Chapter1 ILC 実験 | 6 |
| 1.1 線型加速器実験 | 6 |
| 1.2 ILC 実験の物理 | 9 |
| 1.2.1 ヒッグス粒子とは | 9 |
| 1.2.2 ヒッグス粒子の生成過程 | 9 |
| 1.2.3 ヒッグスの崩壊過程 | 10 |
| 1.3 測定器構想 | 15 |
| Chapter2 カロリメータ | 18 |
| 2.1 カロリメータの構造と原理 | 18 |
| 2.2 カロリメータの性能 | 20 |
| 2.2.1 エネルギー分解能 | 20 |
| 2.2.2 1 粒子エネルギー分解能 | 21 |
| 2.2.3 ジェットエネルギー分解能 | 21 |
| 2.2.4 グラニュラリティー | 21 |
| 2.2.5 補償の概念 | 22 |
| 2.3 カロリメータの動向 | 24 |
| 2.4 PFA とデジタルカロリメータ | 24 |
| Chapter3 光検出器 | 33 |
| 3.1 これまでの光検出器 | 33 |
| 3.2 光電子増倍管 [13] | 34 |
| 3.3 電子打ち込み式 CCD (EBCCD) | 37 |
| 3.4 アバランシェフォトダイオード (APD) | 39 |
| 3.5 ハイブリッド型アバランシェフォトダイオード (HAPD) | 40 |
| Chapter4 MPPC / SiPM | 42 |
| 4.1 半導体 | 42 |
| 4.2 p 型半導体と n 型半導体 | 45 |
| 4.3 ダイオードとフォトダイオード | 46 |
| 4.4 ダイオードの諸特性 | 48 |
| 4.4.1 空乏層の幅 | 48 |
| 4.4.2 ダイオードの静電容量 | 50 |

| | | |
|-----------------|--------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.3 | 逆方向電圧とブレイクダウン | 50 |
| 4.4.4 | 半導体光検出器 | 50 |
| 4.5 | SiPM/MPPC | 54 |
| 4.5.1 | Limited Geiger Mode Microcell Silicon Photodiode (LGP) | 54 |
| 4.5.2 | SiPM/MPPC の構造 | 55 |
| 4.5.3 | SiPM/MPPC の一般性能 | 56 |
| Chapter5 | 研究：SiPM・MPPC の性能評価 | 57 |
| 5.1 | 研究内容 | 57 |
| 5.2 | 評価対象とした SiPM 及び MPPC | 58 |
| 5.2.1 | 外部構造 | 58 |
| 5.2.2 | 内部構造 | 61 |
| 5.3 | 実験環境 | 62 |
| 5.4 | 測定結果 | 65 |
| 5.4.1 | 応答波形 | 65 |
| 5.4.2 | 放電とシグナル | 65 |
| 5.4.3 | Noise Rate | 69 |
| 5.4.4 | Gain | 75 |
| 5.4.5 | Linearity と Efficiency | 83 |
| 5.4.6 | 2006 年 1 月現在における MPPC の開発の進捗 | 84 |
| Chapter6 | まとめと今後の課題 | 91 |
| 6.1 | 測定結果のまとめ | 91 |
| 6.2 | 今後の課題 | 92 |
| 付録 A | 新潟大学における研究 | 96 |
| A.1 | 実験環境 | 96 |
| A.2 | 観測波形と光量分布 | 97 |
| A.3 | 性能測定 | 97 |
| A.4 | 考察 | 100 |
| 付録 B | カロリメータシミュレーションにおける MPPC の効果 (神戸大学 林晋氏 提供) | 101 |
| 付録 C | KEK 測定器開発室において開発されている ASIC のテスト | 103 |
| C.1 | テスト環境 | 103 |
| C.2 | テスト結果 | 106 |
| C.3 | 参考ボード図及び電圧値について | 107 |

目次

| | | |
|------|-------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | ILC 実験構想図 | 8 |
| 1.2 | 真空の世界と対称性の破れた世界 | 9 |
| 1.3 | Higgs 生成の様子 | 10 |
| 1.4 | ヒッグス粒子の崩壊分岐比 | 11 |
| 1.5 | ヒッグス粒子崩壊のファインマン図 | 11 |
| 1.6 | 粒子の反応断面積とエネルギーの関係 | 14 |
| 1.7 | 測定器の構成概念 | 16 |
| 1.8 | 測定器に要求されている性能 | 17 |
| 2.1 | 電磁シャワーの様子 | 19 |
| 2.2 | カロリメータにおける荷電粒子 | 19 |
| 2.3 | ジェット分解能と再構成の様子 | 22 |
| 2.4 | グラニュラリティーのいいカロリメータを想定したシミュレーション | 23 |
| 2.5 | ストリップ型カロリメータ | 25 |
| 2.6 | タイル型カロリメータ | 25 |
| 2.7 | MPPC を用いたカロリメータ構想 | 26 |
| 2.8 | Jupiter における Calorimeter の構造 | 28 |
| 2.9 | Z 生成の Event Display と PFA を用いての Z mass Reconstruction | 29 |
| 2.10 | DHCAL におけるセル数と deposit energy の関係 | 30 |
| 2.11 | GEM の構造 | 31 |
| 2.12 | RPC の構造 | 32 |
| 3.1 | PMT の一般的構造 | 34 |
| 3.2 | ダイノードの構造 | 35 |
| 3.3 | H6568-10 の構造図 | 36 |
| 3.4 | EBCCD の基本構造 | 37 |
| 3.5 | CCD の動作と構造 | 37 |
| 3.6 | EBCCD の写真 | 38 |
| 3.7 | APD の組成と構造 | 39 |
| 3.8 | HAPD の構造 | 40 |
| 4.1 | Si 単結晶の構造 | 42 |
| 4.2 | エネルギーバンド構造 | 43 |

| | | |
|------|------------------------------------|----|
| 4.3 | キャリアとバンド構造 | 44 |
| 4.4 | p型半導体とn型半導体 | 45 |
| 4.5 | p型半導体とn型半導体におけるバンド構造 | 46 |
| 4.6 | ダイオードの構造 | 47 |
| 4.7 | ダイオードにおけるエネルギーバンド図 | 48 |
| 4.8 | 空乏層内の物理量分布 | 49 |
| 4.9 | ダイオードの一般的な電流電圧特性 | 51 |
| 4.10 | なだれ増幅とツェナー増幅 | 51 |
| 4.11 | フォトダイオードの構造とバンド構造 | 52 |
| 4.12 | フォトダイオードおよびガス検出器における逆電圧と信号 | 53 |
| 4.13 | LGPの構造 | 54 |
| 4.14 | SiPMの構造 | 55 |
| 5.1 | SiPMの全体像及びピクセルの拡大写真 | 59 |
| 5.2 | MPPCの全体像およびピクセルの拡大写真 | 59 |
| 5.3 | DESY HCALでのSiPM | 60 |
| 5.4 | MPPCのスペック一覧 | 61 |
| 5.5 | 実験環境図 | 62 |
| 5.6 | 使用したPMT H6568-10のEfficiency | 63 |
| 5.7 | Linearityの測定環境 | 63 |
| 5.8 | SiPMおよびMPPCの読み出し回路 | 64 |
| 5.9 | SiPM・MPPCのノイズ波形 | 66 |
| 5.10 | SiPM・MPPCのノイズ波形のストレージ | 66 |
| 5.11 | 放電とLGMのシグナルの違い | 67 |
| 5.12 | 放電とLGMのシグナルの違い | 67 |
| 5.13 | 二種類のゲインによる光量分布の様子 | 68 |
| 5.14 | MPPC 100pixelの放電ピクセル数のバイアスに伴う変化 | 68 |
| 5.15 | 各SiPMの室温でのNR | 69 |
| 5.16 | 各MPPCの室温でのNR | 70 |
| 5.17 | SiPMのThresholdによるNRの変化 | 71 |
| 5.18 | MPPCのThresholdによるNRの変化 | 72 |
| 5.19 | SiPMの温度変化に伴うNRの変化 | 73 |
| 5.20 | MPPCの温度変化に伴う | 74 |
| 5.21 | バイアスとゲインの変化の様子 | 75 |
| 5.22 | SiPMの温度によるGainの変化 | 76 |
| 5.23 | MPPCの温度によるGainの変化 | 77 |
| 5.24 | SiPMの V_o を考慮に入れたノイズレート | 78 |
| 5.25 | MPPC 100pixelの V_o を考慮に入れたノイズレート | 79 |
| 5.26 | MPPC 400pixelの V_o を考慮に入れたノイズレート | 80 |
| 5.27 | MPPCのノイズレートとGainの関係 | 81 |

| | | |
|------|----------------------------------------------------------|-----|
| 5.28 | SiPM のノイズレートと Gain の関係 | 82 |
| 5.29 | SiPM の Linearity と Efficiency の様子 | 83 |
| 5.30 | MPPC 400pixel の Linearity と Efficiency の様子 | 84 |
| 5.31 | 2006 年 1 月に浜松から届いた MPPC のスペック | 84 |
| 5.32 | 2006 年 1 月に浜松から届いた MPPC のピクセルの写真 | 85 |
| 5.33 | 新しい MPPC400pixel の波形 | 85 |
| 5.34 | 新しい MPPC1600pixel の波形 | 86 |
| 5.35 | 新型 MPPC の p.e.peak 検出の様子 | 87 |
| 5.36 | 新型 MPPC の室温下におけるノイズレート | 89 |
| 5.37 | 新型 MPPC の室温下における Gain | 90 |
| | | |
| A.1 | 新潟大学における実験図 | 96 |
| A.2 | レーザーによる信号波形と光量分布 | 97 |
| A.3 | MPPC(H100) における一様性の様子 | 98 |
| A.4 | MPPC(H100) における各ピクセル毎の efficiency | 99 |
| A.5 | MPPC(H100) における Pixel 毎の Breakdown Voltage の様子 | 100 |
| | | |
| B.1 | MPPC のカロリメータに対するサチュレーションの効果 | 102 |
| B.2 | MPPC のカロリメータ分解能に対する効果 | 102 |
| | | |
| C.1 | Current Integrator のテスト環境 | 104 |
| C.2 | Current Integrator の出力波形 | 104 |
| C.3 | Current Integrator の回路図 | 105 |
| C.4 | Current Integrator における Linearity | 106 |
| C.5 | Current Integrator に与える電圧値表 | 107 |
| C.6 | Current Integrator ボードの回路図 | 109 |

Chapter1 ILC 実験

ILC 実験は Higgs などの新粒子の精密測定を目的にした次世代の電子陽電子衝突型線型加速器実験である。1978 年の計画の始まり以来、JLC (Japan Linear Collider)→GLC (Global Linear Collider)→ILC (International Linear Collider) とその名を変えていくにつれ、より世界規模の活動になりその技術も発展している。

本章では ILC 実験に関するいくつかの事項について述べておく。

1.1 線型加速器実験

高エネルギー物理学分野における現在の課題は、Higgs などの新粒子の発見や電弱相互作用の破れ等の物理の実現が可能な領域の重心系エネルギーを実現できていないことである。2005 年現在、稼動している最も高い重心系エネルギーをもつ加速器はアメリカのフェルミ国立研究所 (FNAL) の陽子反陽子衝突型加速器 TEVATRON で重心系エネルギーは、2TeV である。また、現在進行中のスイスの欧州原子核共同研究機構 (CERN) 大型陽子陽子衝突型加速器 LHC (Large Hadron Collider) (2007 年実験開始予定) は重心系エネルギー 14TeV とエネルギーは非常に高い。しかし、これらの加速器はいずれも (u,u,d)+gluon という内部構造をもった陽子同士を衝突させるため、実際反応に寄与する粒子はそのエネルギーの一部を持つに過ぎない。さらに反応する粒子の種類が陽子自身を構成しているクォーク (valence quark) のほかグルオンから対生成されるクォーク (sea quark)、またグルオン自身など多数あり、実際目的としている反応以外のバックグラウンドが非常に多いことも特徴であり、目的とした反応を選び出すことが困難であるという短所を持つ。これに対して電子陽電子型衝突実験においては内部構造を持たない素粒子同士の衝突である為ハドロン衝突型実験と比べてバックグラウンドが少なく非常に綺麗に反応を捕らえる事が可能であるという長所がある。

現在構想中の ILC(電子-陽電子衝突型線型加速器)においては、線型加速器の形を取っているが、その理由は円形加速器の形を取ると次式

$$\Delta E = \frac{4\pi e^2}{3R} \beta^3 \gamma^4 \propto \frac{1}{m^4} \quad \Delta E : \text{シンクロトロン放射によるエネルギー損失} \quad (1.1)$$

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \gamma = \frac{E}{mc^2} \quad R : \text{加速器の半径} \quad m : \text{粒子質量} \quad c : \text{光速} \quad v : \text{粒子の速度}$$

のようにシンクロトロン放射がおこるため質量の軽い電子は損失が大きく達成できる重心系エネルギーがハドロンの場合に及ばないがあげられる。この為加速に際しては直線上に加速空洞を設けるという線型加速器の形を取ったほうが高い衝突エネルギーを電子や陽電子については得られることがわかる。但し線型加速器にも短所がある。それは円形加速器のように衝突できなかった粒子を別の衝突点で再利用するといったようなことが出来なかった

り、次に述べるルミノシティに關係するビームの集束や高加速の為の高電界を作り出すことが難しいことなどが挙げられる。

現在稼動中のレプトン衝突型加速器は、次式

$$L = \frac{N_{e^+} N_{e^-} f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} R_L \quad (1.2)$$

N_{e^+} : バンチに含まれる陽電子の数 N_{e^-} : バンチに含まれる電子の数 f : バンチの衝突頻度

R_L : 幾何学的な要因による補正項 σ_x : 衝突点での水平方向ビームサイズ σ_y : 衝突点での垂直方向のビームサイズ

で表されるルミノシティ¹を蓄積リングにおけるビーム電流を大きくしたり、衝突点におけるビームサイズを小さくするなどして高くすることで統計データ量をあげるように設計されており、測定精度の良い実験を行うことができる。例えば B ファクトリーと呼ばれる日本の高エネルギー加速器研究機構の KEKB、アメリカの SLAC の PEP2 が例として挙げられる。それぞれの重心系エネルギーは 10GeV 程度と、低いエネルギーであるが、近年、B 中間子、反 B 中間子生成ルミノシティにおける最高記録を次々と塗り替えている。また、レプトン衝突型加速器で達成できた最も高い重心系エネルギーは、CERN の LEP (Large Electron Positron Collider) と呼ばれる電子陽電子衝突型円形加速器による、210GeV である。ルミノシティは ILC でも重要なパラメーターであり従来の mm オーダーから nm オーダーへと高める必要があるが、これを高めることは技術上非常に難しい課題の一つである。

上述のように、電子陽電子の円形加速器ではシンクロトロン放射によるエネルギー損失が存在するため、円形加速器を用いて、LEP 以上の重心系エネルギーを達成するのは不可能に近く、今後の電子陽電子加速器は、高エネルギーを目指す為、粒子を直線的に加速する線形加速器が主流になる。

¹反応断面積をかけることで反応数となる

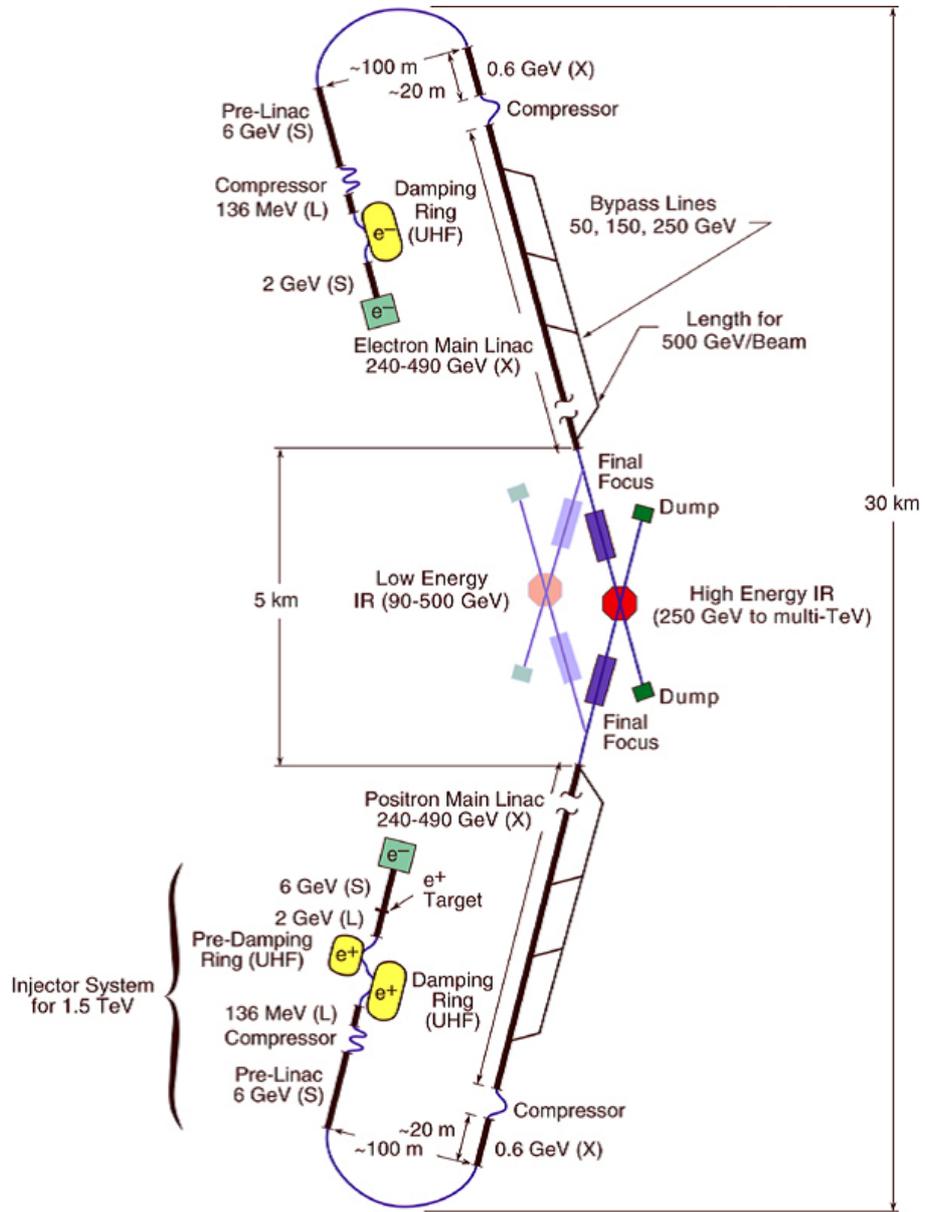


図 1.1: 次世代線形加速器構想図 (GLC 時代のもの) : 現在のところ超伝導加速器になる予定である。超伝導加速器とは超伝導物質でできた空洞内で粒子の加速を行うもので、加速する為にかかる RF(Radio Frequency) 波に対して発生する熱的なエネルギーロスが少なく低電力で高い加速が行える。

1.2 ILC 実験の物理

次世代線型加速器計画は TeV 領域のエネルギーに到達することで今までにない新しい物理現象を探索する事を目的としている。その中でも電磁相互作用・弱い相互作用を統一的に記述する標準模型において、最後の未発見粒子であるヒッグス粒子の性質の精密な測定、および超対称性 (SUSY) の発見がこの実験計画において重要視されている。

1.2.1 ヒッグス粒子とは

標準模型の世界では全ての素粒子の質量が厳密に 0 であるとした上で成立しているが現実の世界において素粒子はそれぞれ質量を持っている (光子やグルオンにはないが)。このズレを説明する為に取り入れられたのがヒッグス場である。大昔、宇宙の生まれた瞬間 (ビッグバン) にはまだ全ての素粒子が真空中を光の速度で動き回っていた。しかしビッグバンから 10^{-13} 秒を過ぎた頃に相転移 (自発的対称性のやぶれ) が起こりヒッグス場が形成され相互作用を受けた素粒子は質量をもち光速では運動できなくなったと仮定されている。このヒッグス場を導入し、粒子の質量がこの場との相互作用で発生するとすることで粒子に質量を持たせ、ゲージ不変性のみの導入における矛盾²を解決することが出来る。

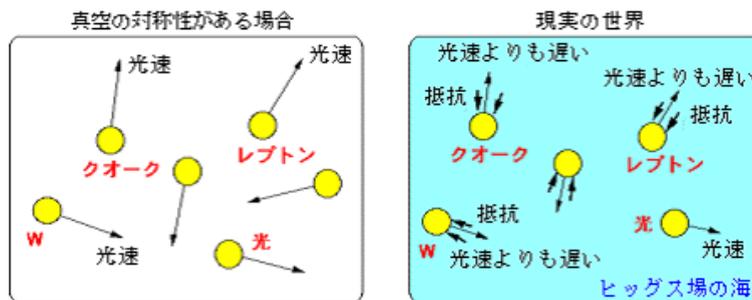


図 1.2: 真空の世界と対称性の破れた世界

ヒッグス粒子は発見されれば上記のように宇宙における粒子質量の発生も説明できたりと、素粒子理論の観点だけでなく宇宙論の観点からも重要な役割をもつ粒子であるといえる。

1.2.2 ヒッグス粒子の生成過程

ヒッグス粒子を観測する為にはその生成過程をすることでバックグラウンドとの区別をつけることが必要である。ここではヒッグス粒子がどのような過程で生成されるかを述べる。

現在、ヒッグス粒子の質量は LEP 実験より 95% C.L で

$$114\text{GeV} < m_H < 211\text{GeV} \tag{1.3}$$

となっている。

²これのみでは粒子は質量をもてない

電子陽電子衝突におけるヒッグス粒子の生成反応として考えられる主なパターンは

- (a) $e^+e^- \rightarrow Z^0H^0$
- (b) $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H^0$
- (c) $e^+e^- \rightarrow e^+e^-H^0$

等がある。ここで H^0 は中性ヒッグス粒子をあらわす。(b) や (c) の反応はベクトルボソンフュージョン過程と呼ばれ、1TeV を超えるようなエネルギーで衝突させた際に断面積が大きくなるので、重いヒッグス粒子を探す際に重要になる。一方 (a) の反応は低エネルギーにて断面積が大きくなることから軽いヒッグスを探す際に重要になる。図 1.3 に上の反応のファインマンダイアグラムを示す。

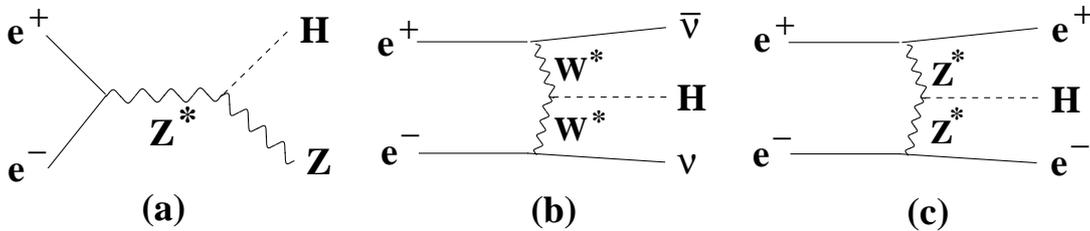


図 1.3: Higgs 生成の様子: * は仮想粒子をあらわす。仮想粒子は性質としては実際の粒子と変わらないが、観測されることのない粒子のことである。

1.2.3 ヒッグスの崩壊過程

実際検出器上ではヒッグス粒子はそのままの形で観測することは出来ず、ヒッグス粒子の崩壊後の粒子を検出し、そのエネルギーから質量を組みなおすという操作を行わなければならない。このことからヒッグス粒子の崩壊反応についても把握しておく必要がある。

ヒッグス粒子のフェルミオン、及びウィークボソンとの結合はその質量に比例し、崩壊の部分巾は、

$$\Gamma(H^0 \rightarrow f\bar{f}) \propto \left(\frac{gm_f}{2m_W}\right)^2$$

$$\Gamma(H^0 \rightarrow V\bar{V}) \propto (gm_V)^2 \quad < g : \text{結合定数} \quad V : \text{VectorBoson}(W^\pm, Z^0) \quad f : \text{fermion} >$$

となる。よってヒッグス粒子は運動力学的に許される範囲内で最も重い粒子への崩壊巾(崩壊確率)が大きい。しかし、140GeV 以上ではウィークボソン対への崩壊巾はクォーク対への崩壊巾より大きいので、仮想的な W 粒子を含めて、 $H^0 \rightarrow W^+W^-$ への崩壊巾が最も大きくなる。図 1.4 にヒッグス粒子の崩壊分岐比を、図 1.5 に主な崩壊のファインマン図を載せる。

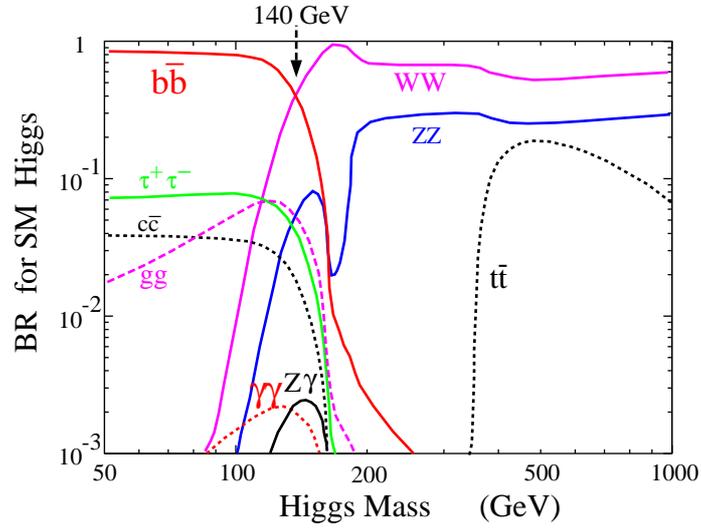


図 1.4: ヒッグス粒子の質量とそれにともなう崩壊分岐比 (Branching Ratio) [4]

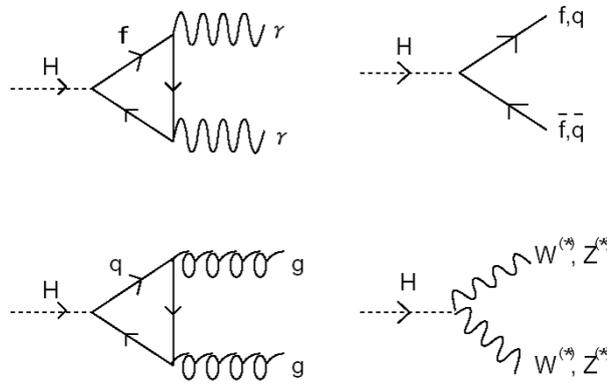


図 1.5: ヒッグス粒子崩壊のファインマン図 : *は仮想粒子を表す

次に、次世代電子陽電子線形加速器計画でのヒッグス粒子の探索の方法について述べる。まずヒッグス粒子の質量が $2m_W$ より小さいときであるが、このときの生成過程は上で述べたように $e^+e^- \rightarrow Z^0 H^0$ であり、ヒッグス粒子は図 1.4 より b クォークと反 b クォークに主に崩壊するので、その終状態は Z^0 粒子の崩壊モードによって

1. $Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}$ $H^0 \rightarrow b\bar{b}$
2. $Z^0 \rightarrow l^+l^-$ $H^0 \rightarrow b\bar{b}$
3. $Z^0 \rightarrow q\bar{q}$ $H^0 \rightarrow b\bar{b}$

のように 3 つに分けられる。3 つの反応について 1 の場合は四元運動量欠損 (ニュートリノは検出されないので単に 2 つの $b\bar{b}$ の不変質量を組む)、2 では二つのレプトンの recoil mass (レプトンのエネルギー、運動量からヒッグスのエネルギーと運動量は求まる)、3 の場合は $b\bar{b}$ 起因の二つのジェットの不变質量の分布にピークとなってヒッグス粒子はあらわれる。

このときの主なバックグラウンドは、

1. $e^+e^- \rightarrow Z^0 Z^0$
2. $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$
3. $e^+e^- \rightarrow e\nu W$

であるが、このうち 1、2 は反応後の粒子の角度分布において前方にピークを持ち、2 と 3 はヒッグス粒子の崩壊過程の特徴である b クォークを含んでいない。よって、中心部に発生した事象を選び、その事象に二つの b クォークのジェットを要求することにより、効率よくヒッグス粒子の事象を選ぶことができる。ヒッグス粒子の質量が $2m_W$ よりも重い場合、ヒッグス粒子は二つの W 粒子に崩壊するのでその終状態の六つ、四つあるいは二つのジェットや残りのトラックから Z^0 粒子に一致する組み合わせをみつけて先ほどと同じようにしてヒッグス粒子を見つけることができる。

このようにしてヒッグス粒子が見つかったときにはその性質 (崩壊分岐比、スピン、パリティ etc...) を詳しく調べることが次の課題となる。なかでも、見つかったヒッグス粒子が標準模型³のそれか、最小超対称性粒子 (MSSM)⁴のそれかを調べることは重要である。

超対称性理論とは、標準理論で述べられている全ての粒子に対して超対称パートナー (Fermion に対しては Boson, Boson に対しては Fermion) の存在を预言するものである。超対称パートナーとは例えば $e^- \leftrightarrow \tilde{e}^-$ (スカラー電子) や $\gamma \leftrightarrow \tilde{\gamma}$ (フォティーノ) 等がある。このような超対称パートナーを導入することでナチュラルネスの問題⁵や階層性の問題電弱相互作用のスケールと究極理論のスケールの間の領域において何か階層化できるものがあるだろうかという問題、宇宙における Cold Dark Matter⁶や GUT (Grand Unified Theory)⁷などのこれまでの標準理論などでは説明のつかなかったことが出来るようになる。超対称性理論はまさに物理における究極理論のひとつである。MSSM はパラメーターが非常に多い超対称性理論において必要最小限のパラメーターのみを導入したものである。

³電弱相互作用を記述するワインバーグ=サラム理論と強い相互作用を記述する QCD をまとめた体系をいう

⁴最も単純な超対称性理論。この対称性において Higgs 粒子は 5 種類 (H^\pm, H^0, A, h) あるとされている。

⁵量子補正が発散してしまう問題、超対称パートナーを導入することで発散を抑えることが出来る

⁶LSP (Lightest Supersymmetric Particle) が候補として上がっている。

⁷大統一理論、非常に高いエネルギースケールでは標準理論で言われる電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用の間に区別がないとしているものである

MSSM においては Higgs 二重項と呼ばれるものを仮定しており次のように H_1 、 H_2 で表す。

$$H_1 = \begin{pmatrix} \Phi_1^0 \\ \Phi_1^- \end{pmatrix} \quad H_2 = \begin{pmatrix} \Phi_2^+ \\ \Phi_2^0 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

この Φ_1 Φ_2 の組み合わせにより 5 種類のヒッグスが定義される。これを表 1.1 に示す。

| | |
|-----------------------------------|-----------------|
| Φ_1^-, Φ_2^- | 荷電ヒッグス H^\pm |
| Φ_1^0, Φ_2^0 の虚部 (CP-奇対称) | 擬スカラーヒッグス A^0 |
| Φ_1^0, Φ_2^0 の実部 (CP-偶対称) | $\eta_1 \eta_2$ |

表 1.1: Higgs 二重項と Higgs 粒子

表における η_1, η_2 においてはこの 2 つの混合によって 2 種類の中性ヒッグス H^0, h が定義される。この内 h が標準模型で予言されている (もしくは MSSM において最も軽い) ヒッグス粒子となり、 H^0 が 500GeV 程度の重い Higgs 粒子となる。このことから発見されたヒッグスが MSSM におけるものか標準模型におけるものかを考えることは標準模型もしくは超対称性を実証する上で重要になる。

最後に重心系エネルギーの関数として電子陽電子衝突におけるさまざまな生成過程を図 1.6 に示す。

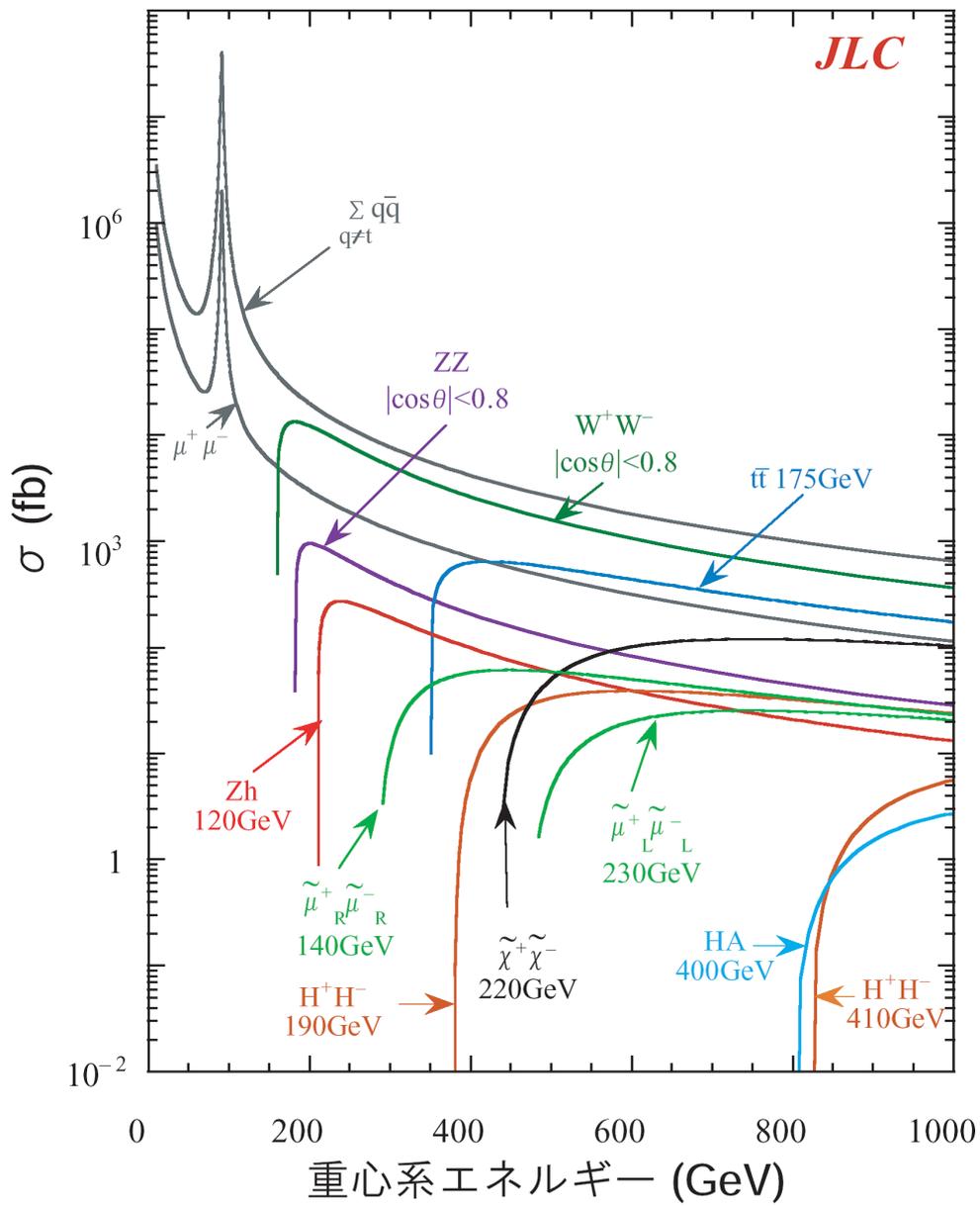


図 1.6: 粒子の反応断面積とエネルギーの関係

1.3 測定器構想

次世代線形加速器における測定器は前節で述べた質量の再構成を正しく行うことができるよう精密な測定が出来るものでなければならない。特にZ粒子やW粒子より発生したジェットの再構成およびbジェットの識別はヒッグスの発見のためには精度よく行えなければならない。本節ではILC測定器の構成を述べる。測定器は内側より次のような構成となっている。概念図を図1.7に、求められている性能を図1.8に示す。

- **バーテックス測定器：**
電子陽電子衝突点の極めて近傍に設置され衝突直後に発生した粒子の崩壊点を検出する為の測定器である。これによりクオークの共鳴状態として生成されたD中間子やB中間子の崩壊点を見つけ、ジェットがbクオークやcクオークから発生した事を識別する。bクオークについては前節のヒッグスの終状態 ($e^+ e^- \rightarrow Z_0 H \rightarrow l^+ l^- q \bar{q}$ のような) から、ヒッグス探索において非常に重要である。また検出器に入射する粒子束は非常に密な為バーテックス検出器には二次元分解能の高かつ読み出し速度の高いデバイスを用いる。
- **中央飛跡検出器：**
荷電粒子の飛跡を正確に測定し、その曲率と磁場の大きさから運動量を測定する。デバイスにはMPGD(Micro Pixel Gas Detector) を用いたTPC(Time Projection Chamber) が想定され、研究が進められている。
- **カロリメータ：**
入射粒子のエネルギーを測定する。飛跡検出と組み合わせることで入射粒子の質量を知ることが出来る。ILCでは $H \rightarrow b\bar{b} \rightarrow 2Jet$ のようなジェット発生イベントが主なので単に入射粒子全体のエネルギーだけでなく個々の粒子のエネルギーに分解できるようにすることで粒子ジェットの構成要素を認識する事が可能になるものを考えている。詳しいことは次章で述べる。
- **ミューオン検出器：**
 μ 粒子の同定を行う。 μ 粒子は電子よりも質量が重くまたレプトンであることから電磁シャワーをおこさず強い相互作用を受けない為非常に透過能力が高く測定器の外側まで通り抜けてしまう。この性質を考慮してミューオン検出器は測定器のもっとも外側を覆う形で設置される。 μ 粒子の運動量は内部の飛跡検出器で特定できるのでこれとミューオン検出器によるものとが一致するかを調べる。 μ 粒子は新粒子を探索する上でもっとも他の粒子との区別が付き重要な信号であることから隙間のないように並べる。デバイスとしてはまだ具体的に決まっていない。

以上のように次世代型線形加速器における測定器構想はまだ個々の分野でR & Dが続けられている状態であるのが現状である。本研究も含めデバイスの確立が急務となっている。

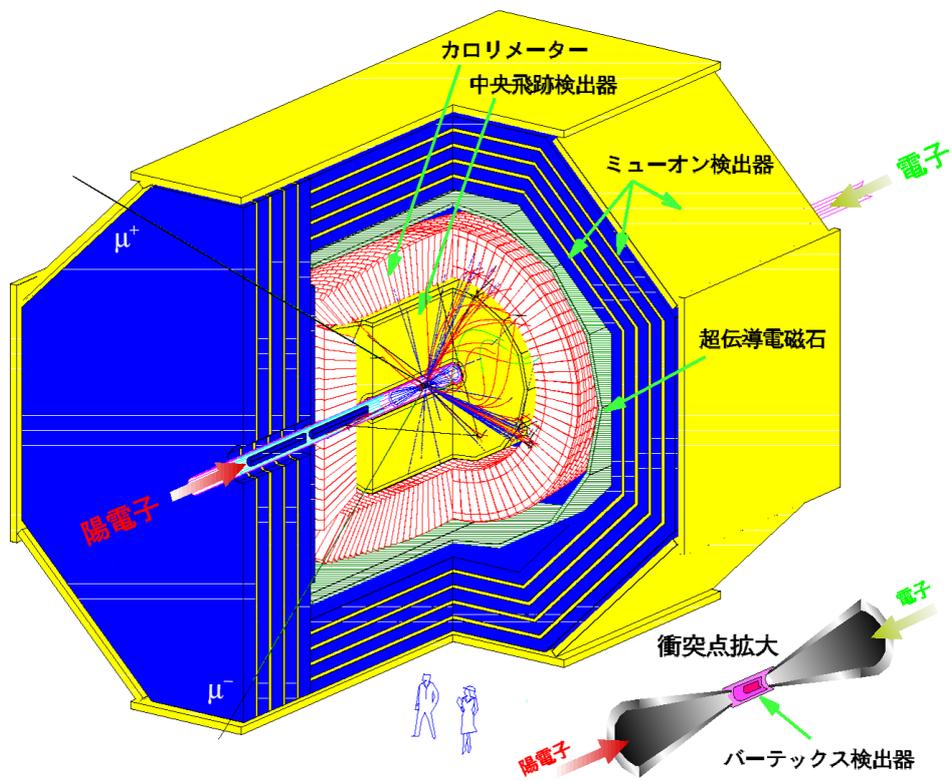


図 1.7: 測定器概念図:神戸 ILC グループはこの中のカロリメーターについての研究をおこなっている

| 検出器 | 設定 | 性能 |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 崩壊点検出器 (CCD) | $ \cos\theta < 0.90$ ピクセル $25\mu m$ 、厚さ $300\mu m$ 4層 $r = 2.4, 3.6, 4.8, 6.0cm$ | 位置分解能 $\sigma = 4.0\mu m$ $\delta^2 = 7^2 + (20/p)^2 / \sin^3\theta [\mu m]$ $t_b = 50\% @ 93\% \text{purity}$ |
| IT (Si-strip) | $\cos\theta < 0.90$ ストリップ幅 $100\mu m$ 、厚さ $300\mu m$ 5層 $r = 9, 16, 23, 30, 37cm$ | $\sigma = 4.0\mu m$ |
| 中央飛跡検出器 一般 2Tesla 3 Tesla | $\cos\theta < 0.70$ (fullsample) $\cos\theta = 0.95$ (1/5samples) $r = 45 \sim 230cm, L = 460cm$ サンプリング数 80 $r = 45 \sim 155cm, L = 310cm$ サンプリング数 50 | $\sigma_s = 1.0mm$ 2トラック分離 $2mm$ $\sigma = 100\mu m$ $\sigma_{Pt}/P_t = 3 \times 10^{-4} P_t + 0.1\%$ $\sigma_s = 85\mu m$ $\sigma_{Pt}/P_t = 3 \times 10^{-4} P_t + 0.1\%$ |
| カロリメータ (Pb/Sci) 一般 2Tesla 3Tesla シャワーマックス | EM= $27X_0$ (3部分) HAD= $6.5\lambda_0$ (4部分) $\sigma_{\theta,\phi} = 24mrad(EM), 72mrad(Had)$ $\cos\theta < 0.985$ (全厚) $r = 250 \sim 400cm, z = \pm 290cm$ $\cos\theta < 0.966$ (全厚) $r = 160 \sim 340cm, z = \pm 190cm$ シンチストリップ (1cm幅)、Si-pad(1cm×1cm) | $\sigma/E = 15\%/\sqrt{E} + 1\%(EM)$ $\sigma/E = 40\%/\sqrt{E} + 2\%(HAD)$ $e/\pi \text{ ID} = 1/1000$ $\sigma = 3mm/\sqrt{E}$ |
| μ 粒子検出器 (SWDC/RPC/TGC) | $\cos\theta < 0.998$ 6 Super Layer | $\sigma = 0.5mm$ μ 粒子 ID |

図 1.8: 測定器に要求されている性能 [5]

Chapter2 カロリメータ

神戸大学 ILC グループでは次世代型線形加速器におけるカロリメータの開発を主に行っている。本章ではカロリメータとはなにか、また近年のカロリメータデザインの動向について述べる。

2.1 カロリメータの構造と原理

カロリメータは入射した粒子のエネルギーを光に変換してその光量を光検出器で測定したり (ex:シンチレータ、鉛ガラス...)、直接電気信号に変換して読み出す (ex:Liquid Ar, SiW...) ことでエネルギー測定を行うものである。GLD-CAL¹では現在シンチレータを用いたものを組み込む予定である。

構造としては入射粒子の反応を促進しカロリメータ内のエネルギー損失・反応による二次粒子生成を促進する吸収体と反応によって生成された二次粒子のエネルギーを光に変換する検出体の層の組み合わせからなるサンプリング型カロリメータと吸収体と検出体の両方の性質を持つ物質 (CsI 等の無機シンチレータや鉛ガラス等のチェレンコフ放射体) を使った全吸収型カロリメータがある。吸収体については鉄・鉛・タングステン・ウラニウム等が挙げられ、検出体についてはプラスチックシンチレータや半導体、ガス、有機液体等が挙げられ、その目的に合わせて選択される。

いずれのカロリメータについても電子や光子のエネルギーを検出する電磁カロリメータとハドロンのエネルギーを検出するハドロンカロリメータがある。ハドロンは電子や光子と比べ反応長が長く多くの物質質量が必要とされる為電磁カロリメータの後方にハドロンカロリメータが置かれる。

電磁カロリメータにおいて電子や光子はカロリメータに入射すると吸収体にて対生成 ($\gamma \rightarrow e^+ e^-$) や制動放射 ($e^- \text{ or } e^+ \rightarrow \gamma e^- \text{ or } e^+$) を起こし (図 2.1)、発生した粒子 (電子や光子) が検出体の電子を励起する。励起された電子がもとの基底状態に戻った際に発生した光を光検出器に引き入れることで光量を測定する

サンプリング型カロリメータについては吸収体、検出体を層状に交互に組み合わせた構造となっているのである検出体の層で停止しない (臨界エネルギーよりも大きい) 電子や光子は次の吸収体に入射し対生成・制動放射を起こす。このような反応が繰り返されと電磁シャワーと呼ばれるカスケードシャワーが生成される。最終的に電磁カロリメータはこの電磁シャワーのエネルギーを検出することになる。

またハドロンについては物質中での弾性もしくは非弾性散乱により二次粒子を発生させこれがイオン化または次なる弾性・非弾性散乱を発生させることでカスケードシャワーを発生させる。これをハドロンシャワーと呼びハドロンカロリメータはこのハドロンシャワーのエネルギーを検出する。電磁シャワーと異なりこのハドロンシャワーは離散的に発生するのでシャワーの起源を特定することが難しいのが特徴である。図 2.2 に模式的な図を示す。

¹ILC 加速器に対する測定器概念の一つである GLD(Global Large Detector) における Calorimeter の開発グループ。他にも LDC や SiD 等がある。

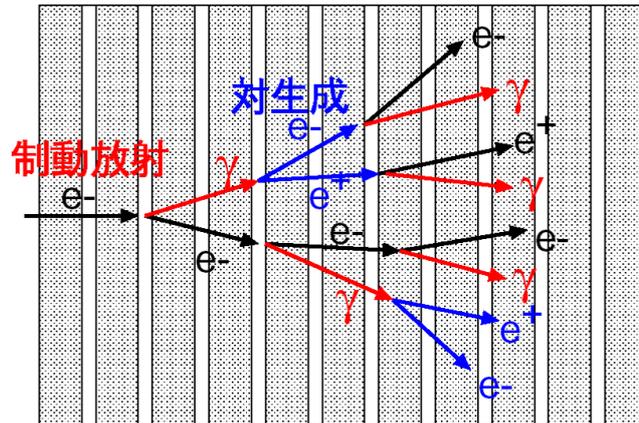


図 2.1: 電磁シャワーの様子 [5] : 対生成と制動放射の繰り返しである

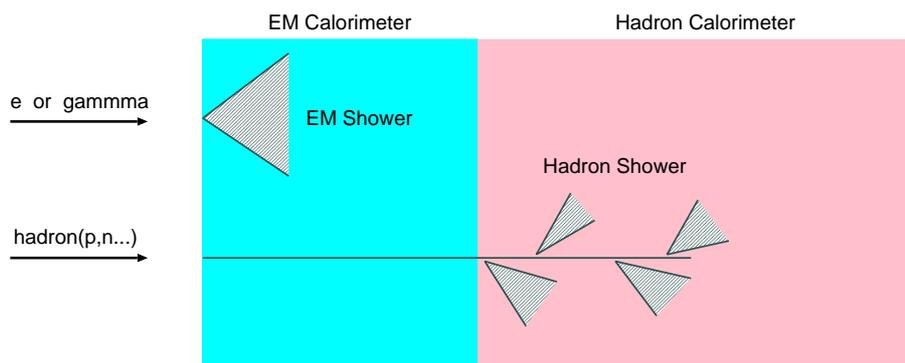


図 2.2: カロリメータにおける荷電粒子の反応

2.2 カロリメータの性能

カロリメータに要求される性能にはどのような性能があり何の関係しているのでしょうか。本節では次に挙げるカロリメータに要求される性能及び概念について述べる。

- エネルギー分解能
- 1粒子エネルギー分解能
- ジェットエネルギー分解能
- グラニュラリティー
- 補償の概念

2.2.1 エネルギー分解能

カロリメータに入射した粒子のエネルギーをどの程度正確に（揺らぎを少なくして）検出できるかを示すパラメータをエネルギー分解能と呼ぶ。エネルギー分解能は以下の式のように表すことができる。

$$\frac{\sigma_E}{E} = a \oplus \frac{b}{E} \oplus \frac{c}{\sqrt{E}} \quad (2.1)$$

E : 入射エネルギー σ_E : 分解能 a : 定数項 b : ノイズ項 c : 統計項

ここで、 $A \oplus B = \sqrt{A^2 + B^2}$ を表す。定数項は読み出しチャンネル毎のゲインの不均一性やカロリメータのエネルギーの漏れに起因する。よって入射エネルギーに比例する形を取ることから上の式では定数項となる。ノイズ項については読み出し回路などのエレキ部などのノイズによる寄与を表しているので入射エネルギーに関わらず一定である。これより上の式では $\frac{1}{E}$ に比例する。最後の統計項については下の三つの寄与に分類できる。

- σ_{int} : intrinsic な揺らぎ
- σ_{photo} : 検出される光子数の揺らぎ
- $\sigma_{sampling}$: サンプルングによる揺らぎ (サンプルング型カロリメータについてのみ存在)

ここで σ_{int} とはカロリメータに入射したシャワー自身の揺らぎである。

σ_{photo} についてはシンチレーターや鉛ガラス等の検出体からの光量検出において光検出器が検出する光電子数の揺らぎで次式のように表される揺らぎである。

$$\frac{\sigma_{photo}}{E} = \frac{1}{\sqrt{N_{p.e.}}} \quad (2.2)$$

最後に $\sigma_{sampling}$ はサンプルング型カロリメータにおける有感層（検出体で構成されている層）におちるエネルギーのゆらぎでありサンプルング型カロリメータのエネルギー分解能に寄与する。

2.2.2 1 粒子エネルギー分解能

文字通り 1 粒子が入射した際のエネルギーの測定精度である。サンプリング型カロリメータでは主に統計項におけるサンプリング揺らぎがこれに大きく寄与する。光子数揺らぎについては光学系の設計の良し悪しによって決まり、実際最新の設計開発が行われている。これに対してサンプリング揺らぎは検出体と吸収体の構成に依存しており、シミュレーション・ビームテストを通して調査しなければならない。

現在のところ実際に次世代型加速器実験においては、

- 電磁カロリメータ : $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{15\%}{\sqrt{E}}$
- ハドロンカロリメータ : $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{40\%}{\sqrt{E}}$

が要求されていた。ただしハドロンカロリメータの 40% という数値は PFA の適用を前提としていない場合に要求される値であり、PFA の適用を前提すると 40% という値は実現する必要がなく、むしろハドロンカロリメータにおいては 1 粒子のエネルギー分解能よりも次に述べるジェットエネルギー分解能が良いことが重要になる。PFA については後述する。

2.2.3 ジェットエネルギー分解能

実際の実験においては 4 ジェット事象などジェットが絡むイベントを精度良く測る必要がある。これは前章でのべたようにヒッグス発生イベントは実際に検出できる形としてジェットを伴うものが多いためである。このジェットエネルギー分解能が悪いと質量再構成の際、精度よく組みなおすことが出来なくなるので大変重要な性能である。図 2.3 にジェット分解能とその時の質量再構成の様子を載せておく。分解能が高いと W と Z 粒子の質量分布をを分離して捉えられていることが分かると思う。

2.2.4 グラニュラリティー

前節で述べたように実際の実験では非常に多くのハドロン・レプトンからなるジェットを精度よく捉えることが重要になる。では精度よく捉えるにはどうすればよいだろうか。答えは捉えるカロリメータの読み出し単位(タイル型カロリメータで言えばタイルのこと)を非常に細かいものにすればよいのである。これは画素のサイズが大きい撮像素子では一定サイズの被写体に対して大雑把な映像しか捉えられないのと同じ具合である。読み出し単位を非常に細かいものにするとジェットの解きほぐし(1 粒子 1 粒子の軌跡に分解すること)が行うことができ、トラックとクラスタの対応付け(Matching)やバックグラウンドの除去なども容易に行うことが出来るはずである。この読み出し単位の細度をグラニュラリティー(Granularity)といい、細かければ細かいほどグラニュラリティーがいいという。

しかしこの概念には問題がある。それはこれを実現するには、

- 読み出しチャンネル数が莫大なものになり、コストが大変高くなってしまふ(コストの問題)
- 均一な応答を保持するのが難しい(均一性(uniformity)の問題)

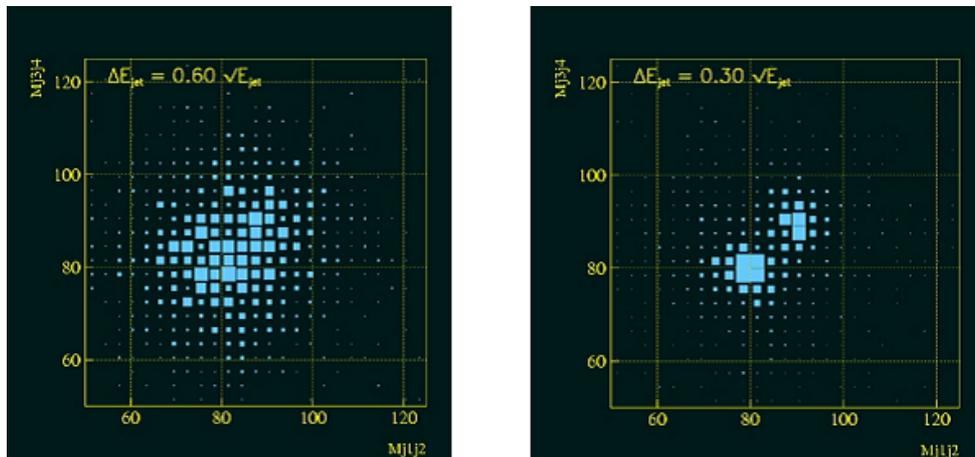


図 2.3: $\nu\bar{\nu}W^+W^-$, $\nu\bar{\nu}Z^0Z^0$ を用いたジェット質量再構成シミュレーションの様子 [2]: (左は 60%, 右は 30% の様子) 分解能が上がると Z の質量と W の質量が識別できているのが分かる

- ファイバー読み出しの場合、効率よく読み出すには不感部分(デッドスペース)が大きくなってしまう(取り回しの問題)
- 読み出し単位を小さくすると同時に読み出し単位から得られる光量も小さくなりノイズとの区別がつかない(S/N 比の問題)

などのことが障害となることである。但しこれらの問題にも解決策がある。それは単価が低く、かつ p.e. 分解能および量子効率の高い検出器で無感部分を小さく出来るような光検出器を用いればよいのである(当然であるが...)。本研究もふくめて様々な光検出器が研究され、この構想に用いることが出来るかどうか検討されてきた。これについては次章および本論で述べたいと思う。

最後に図 2.4 にグラニュラリティーがいいカロリメータに対してジェットがどう捕らえられるか(シミュレーション)を示す。

2.2.5 補償の概念

一般にカロリメータにおいて電磁シャワーから得ることの出来る信号と比べて、ハドロンシャワーから得ることの出来る信号のほうが小さい。これはハドロンシャワーの散乱プロセスにおける核破砕反応にて原子核の結合エネルギー分はそこから発生する粒子には伝播されない為である(純粹にこのエネルギーはロスされる)更に核反応で発生した中性子は中性であることから荷電粒子に変換されるような反応を起こさない限りはエネルギーを持ち去ってしまう。またハドロンシャワーにおいて π^0 粒子の生成もカロリメータの性能において大きな影響を及ぼす。 π^0 粒子は電磁相互作用によって $\gamma 2$ つに崩壊し電磁シャワーを発生させる為ハドロンシャワーに電磁シャワーの成分が混ざることになる。このことからハドロンのエネルギーを評価することが難しくなり(同一の信号を得てもどの程度電磁シャワー成分があるかでエネルギーは異なるから)分解能も悪化する。そこで補償という概念をもちいた補償型カロリメータを用いる。補償とはカロリメータのハドロンシャワーに対する応答と電磁シャ

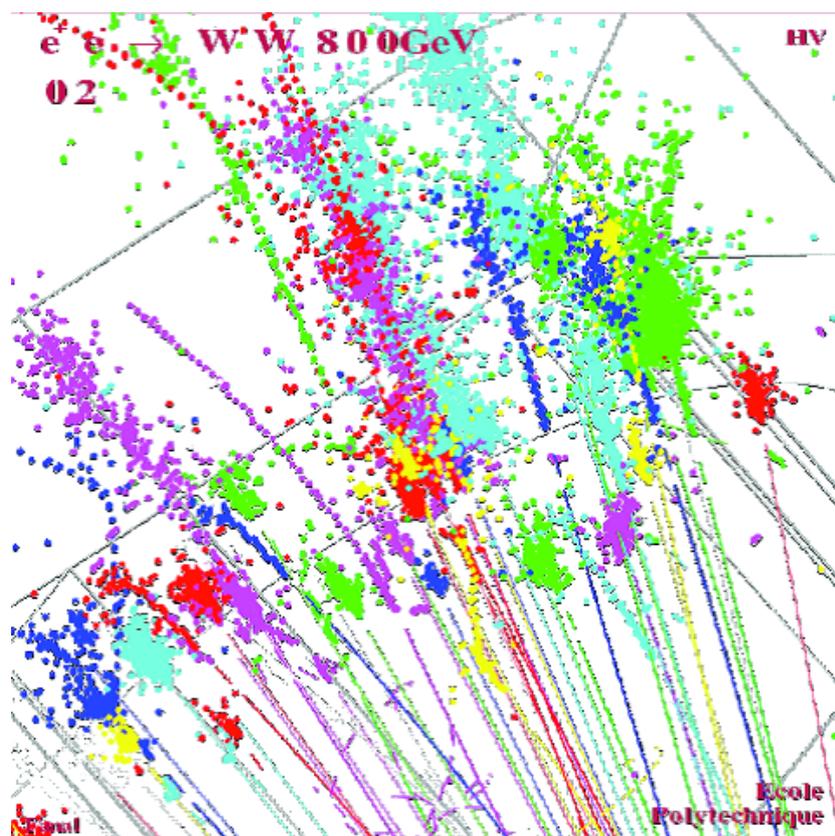


図 2.4: グラニュラリティーの高いカロリメータを使ったときのジェット分解 [シミュレーション] [3]: $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ により発生したジェットを解きほぐしている。

ワーに対する応答を同一にする事をいう。
方法としては以下のようなものが挙げられる。

- 吸収剤に鉛などの重元素を用いることで、核破碎反応のエネルギー消費をへらす
- 検出体に水素原子を多く含むプラスチックシンチレーターを用いることによって陽子中性子散乱を誘発する
- 吸収体の比を増やし電磁シャワーが検出体に落とすエネルギーを減らす

これらの方法は核結合エネルギーの低下によるロスの消費、中性子の核破碎もしくは陽子中性子散乱の促進、電磁シャワーにたいする応答の減少をとおして応答比 (e/h とする) を 1 にちかづけるものである。尚 3 番目のものについてはサンプリング数を減らすことでカロリメータの性能を悪化させることは望ましくないことから検出体を薄くしサンプリング数は多く保ったままで吸収体の比を増加させることがのぞましい。

2.3 カロリメータの動向

日本の GLD-CAL は現在に至るまで様々なタイプのカロリメータをテストしてきた。なかでも以下の 2 つについては現在も改良が考えられている

1. タイル型カロリメータ
2. ストリップ型カロリメータ

2005 年時点におけるカロリメータの動向としては、上記 2 つのサンプリング型カロリメータを候補としており、また有感体となるシンチレーターについてもストリップ型とタイル型それぞれがそのサイズおよび形状を最適化するべく検討中である。神戸大学ではストリップ型を現在は採用している。吸収体についてはこれまでは鉛を採用していたが、モリエール半径（横方向のシャワーの広がりをあらわす）がタングステンに比べ大きく、今後のジェット分解能の向上について考えた際不適とみなし、タングステンを採用する方向に動いている。また読み出しの光検出器については本研究にて用いている MPPC (Multi Pixel Photon Counter) が現在有力視されている。図 2.5, 2.6 にストリップ型カロリメータおよびタイル型カロリメータの図を載せる。

これらのタイプのカロリメータについては MPPC+Fiber Read Out のタイプも構想されている。小さな MPPC を用いることでファイバーに直付けすることが可能となりファイバーの取り回しによる Dead Space の問題が解消される。図 2.7 に MPPC を用いたカロリメータの構想図を載せる。

2.4 PFA とデジタルカロリメータ

最後に近年のカロリメータの概念的な動向としてデジタルカロリメータと Particle Flow Algorithm (PFA) について述べる。

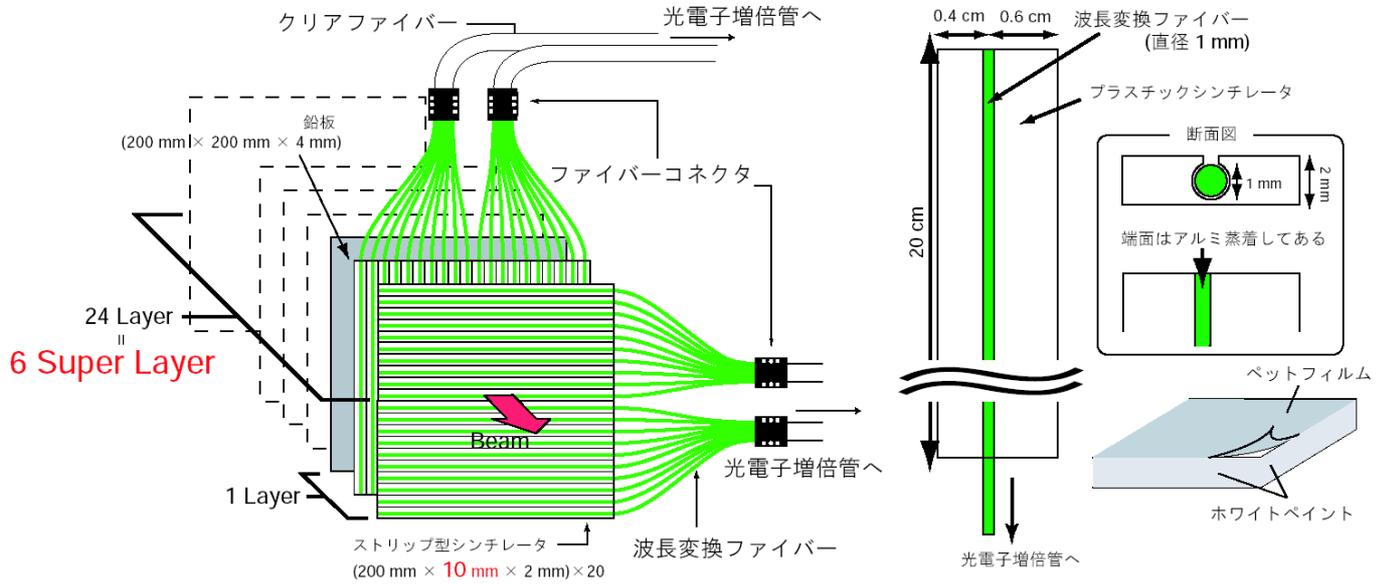


図 2.5: ストリップ型カロリメータ (筑波大) [4] : フィルムやホワイトペイントは光漏れを防ぐ

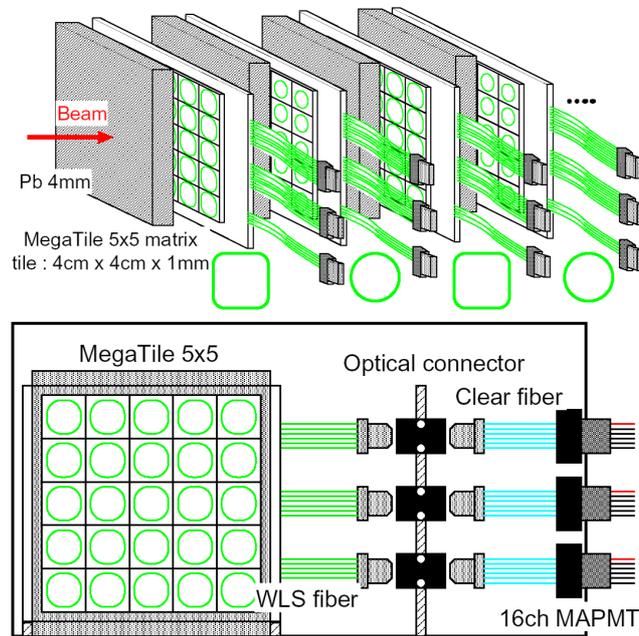


図 2.6: タイル型カロリメータ (新潟大) [5]

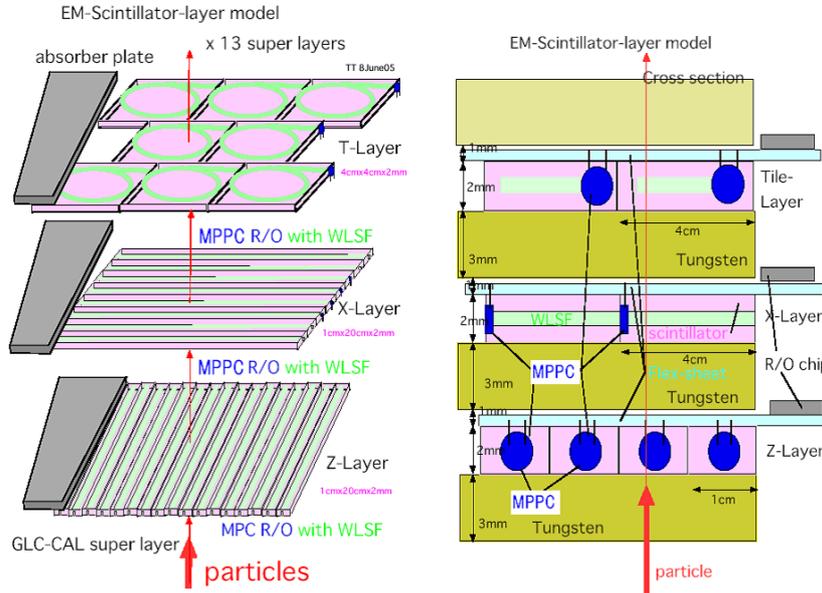


図 2.7: MPPC を用いたカロリメータ構想 [12]: ファイバーへの MPPC の直付けが可能に (図中では DPPD となっている)

Particle Flow Algorithm (PFA) PFA は衝突で生成されるジェットのエネルギーを精度良く測定するためにカロリメータで測定したエネルギーから荷電成分 (EM 成分と荷電ハドロン) を取り除く解析手法をいう。PFA が必要とされる理由は次のとおりである。ジェット中の粒子のエネルギーは相対論から

$$E = \sqrt{m^2 + p^2} \quad (\text{自然単位系}) \tag{2.3}$$

となりさらに運動量が質量に比べ非常に大きくなる ($m \ll p$) ことから $E \simeq p$ と考えられる。ここでトラッキングチェンバーの運動量分解能 $\frac{\sigma_p}{p}$ とカロリメータのエネルギー分解能 $\frac{\sigma_E}{E}$ において $\frac{\sigma_p}{p} \ll \frac{\sigma_E}{E}$ であることが知られており² [7]

$$(\text{トラッキングチェンバーの運動量}) \simeq (\text{粒子のエネルギー})$$

と考えることが出来る。但しこれはあくまで荷電粒子の場合であり中性粒子の場合はトラッキングできないため、カロリメータに頼るほかない。ジェット中における粒子の構成成分については表 2.1 に示すようにトラッキングできる荷電成分が 65% 含まれており多くが Tracker によるエネルギー測定が有効になることが分かる。またジェットのエネルギーにおける σ_{jet} は、

$$\sigma_{jet}^2 = \sigma_{charge}^2 + \sigma_{\gamma}^2 + \sigma_{hadron}^2 + \sigma_{confusion}^2 \dots \tag{2.4}$$

と書ける。ここで σ_{charge} は荷電粒子に対するエネルギー分解能、 σ_{γ} は光子に対するエネルギー分解能、 σ_{hadron} はハドロンに対するエネルギー分解能である。 $\sigma_{confusion}$ は荷電・中性両方の粒子のエネルギーがカロリメータ

²($dp/p \sim (5 \times 10^{-5} \text{ or } 1 \times 10^{-4})$ の関係がある $\times p$)

に落ちることによる揺らぎであることから、上手くクラスタリング (粒子由来ごとのシャワーに分別すること) を行い、カロリメータから荷電粒子由来の成分を除いてやることでこの揺らぎを小さくすることが出来る。(測定器構造においてジェットを解きほぐす為にカロリメータとパーティックスの距離を十分に離すことでも $\sigma_{confusion}$ は小さく出来る) 現在 ILC のフルシミュレーターである Jupiter に組み込むべき PFA が研究されているが、PFA の基本的な手順は以下の通りである。 [8]

1. 小クラスタの生成と γ の検出
 - 隣接のセル同士の結合
 - ハドロンと γ の分離
2. トラッカーのトラック情報とクラスタの対応付け
 - カロリメータにおける荷電成分をトラック情報より見つけ出す。
3. 残りのエネルギー成分を中性とする仮定

個々の手順でどのようにクラスタを生成するか、 γ をどのように見つけるかトラックとクラスタをどう対応付けるかが考えるべきところであり、参考文献 [8] において PFA を用いることで Z の mass reconstruction で 40% の resolution を出している。

図 2.8 に Jupiter におけるカロリメータの構造、図 2.9 に Z の mass reconstruction の様子を示す。

| ジェット中の粒子 | エネルギー成分比 | エネルギー測定に用いる検出器 | GeV 単位での Resolution |
|-------------------------------------|----------|----------------|---------------------|
| 荷電成分 | 65% | Tracker | Negligible |
| 光子 | 25% | ECAL | $0.05^2 E_{jet}$ |
| 中性ハドロン | 10% | ECAL+HCAL | $0.16^2 E_{jet}$ |
| これらの合成については 30% の Resolution が要求される | | | |

表 2.1: ジェット中の粒子成分 [6]:これらの値は平均値であり広がり (σ) は大きい

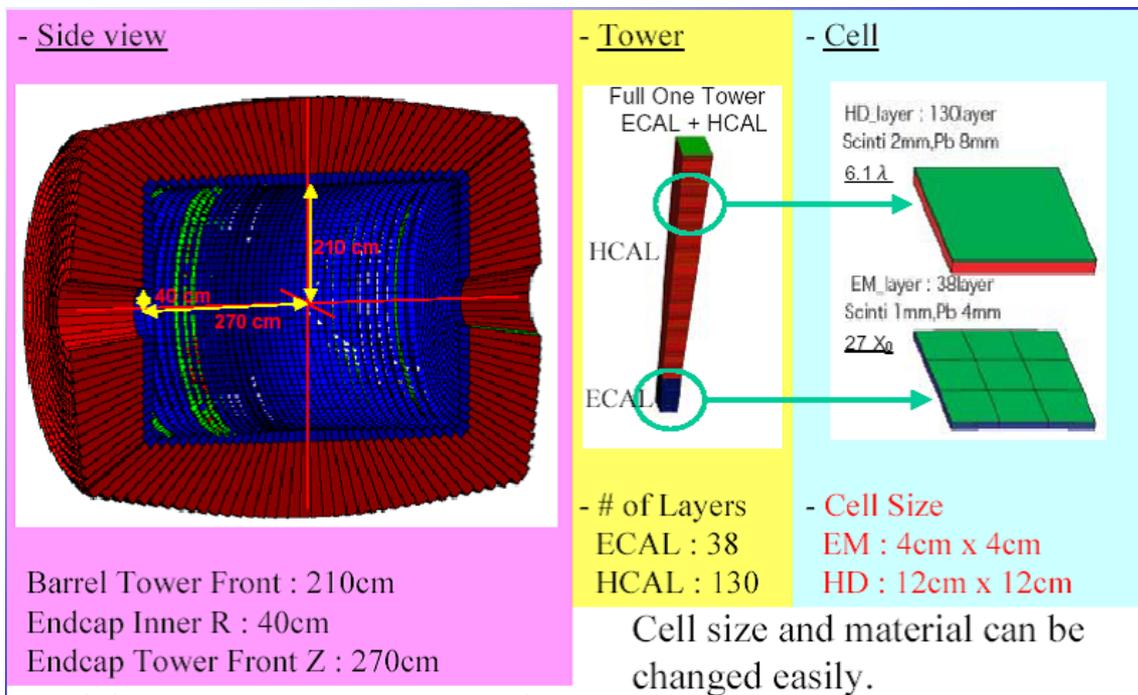


図 2.8: Jupiter における Calorimeter の構造 [8]: サイズなどはパラメーターで変更できる

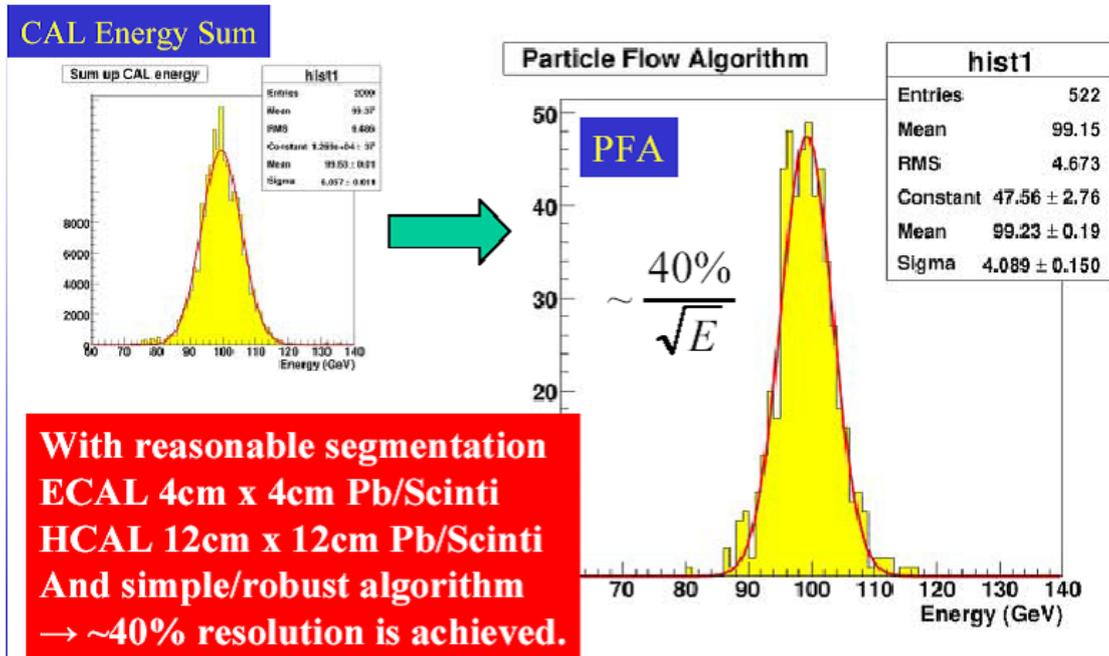
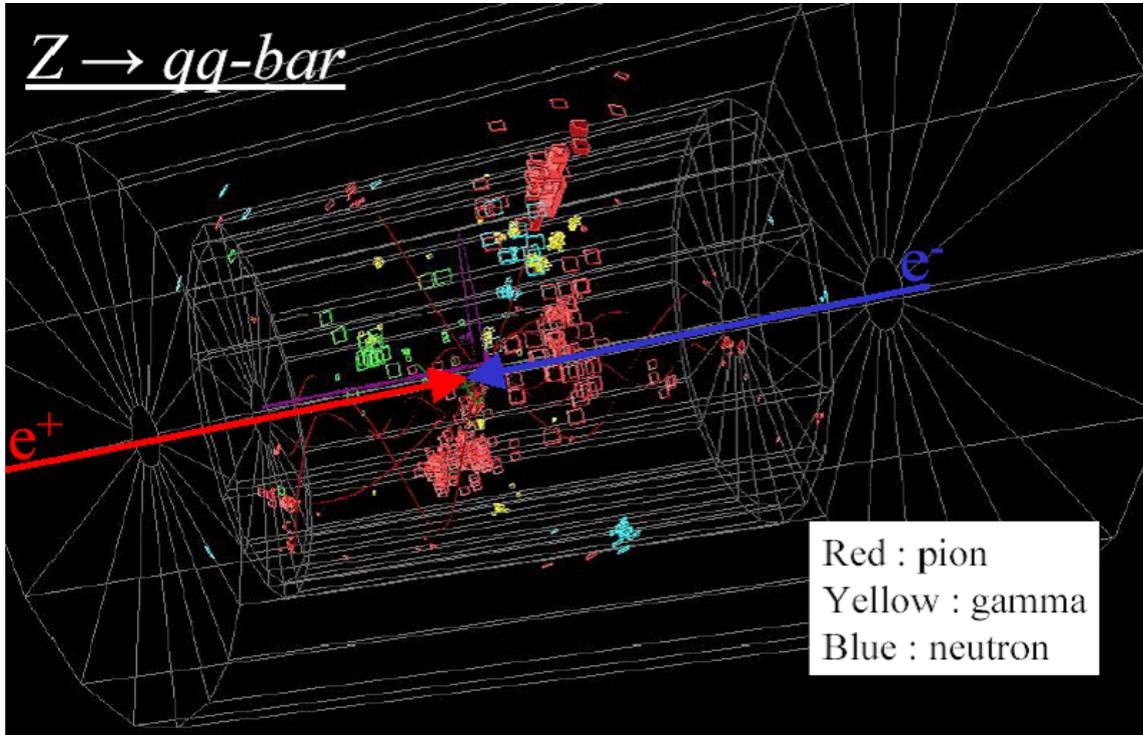


図 2.9: Z 生成イベントの Display と PFA を用いた mass reconstruction [8]:40% の resolution を得られた

デジタル (ハドロン) カロリメータ (DCAL(DHCAL)) PFA を上手く行う為には当然測定時点でシャワーが綺麗に解きほぐされていることが望ましく、高いグラニュラリティが必要である。しかし前に述べたように高いグラニュラリティを確保するには大変コストがかかる。これは光検出器にかぎらずこれに対する読み出しも同じである。そこで細分割された読み出し単位が光を検出したかしなかったかのみを読み取り、その個数でエネルギーを測定しようと考えられているのがデジタルカロリメータである。

DHCAL が AnalogHCAL よりも優れているのかを検証する為にシミュレーションがされているのでここで述べておく。参考文献 [9] によると K_L^0 粒子が完全に HCAL にてシャワーを起こした場合、AnalogHCAL では $\sigma/E = 45\%$ 、DHCAL では $\sigma/E = 39\%$ という結果となっている。また光ったセル数と deposit energy の対応についても図 2.10 に見るように中性ハドロン、及び荷電 π については一次線形の関係を持っている。この文献において DHCAL が AnalogCAL よりも性能的に良いとしているが、実際はまだ分からない。

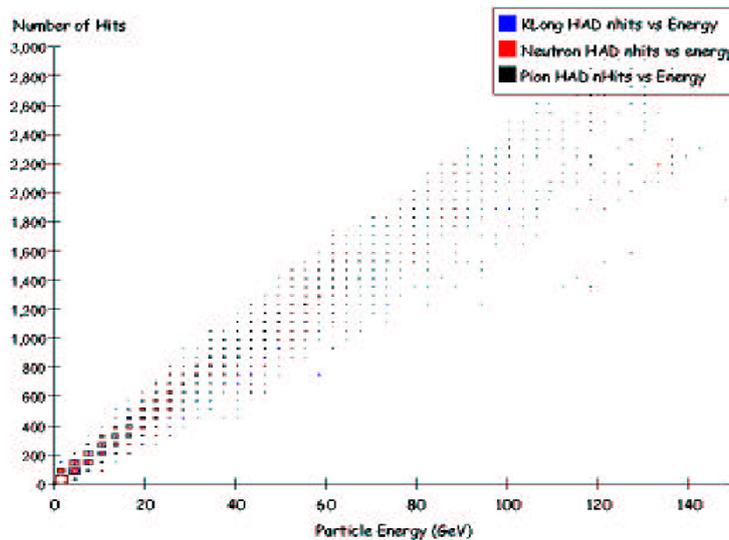


図 2.10: DHCAL におけるセル数と deposit energy の関係 [9]

DHCAL についてはシンチレータを使う案と RPC(Registive Plate Chamber) もしくは GEM(Gas Electron Multipliers) のようなガス検出器を使う案が挙げられている。DHCAL にガス検出器を用いることの利点は、

- Landau Tail による分布の広がりが少ないこと
- コストが低い

等が挙げられ、また短所としては

- 補償がないこと (PFA としてはジェットが細くなるので望ましいがエネルギー分解能については中性粒子の分が回収できなくなる)

などが挙げられる。図 2.11、2.12 に RPC,GEM の構造、表 2.2 に、[11] に述べられている性能を記す。但しこのデジタルカロリメータも電磁カロリメータとしては用いることが困難である。理由として電磁シャワーにおける 1 読み出し単位に落とすエネルギーのふらつきが大きいことがあげられる。そのためデジタルカロリメータはハドロンカロリメータに用いられることが考えられている。

以上のように次世代線形加速器実験においては高いエネルギー分解能と位置分解能をもつカロリメータが求められることになる。

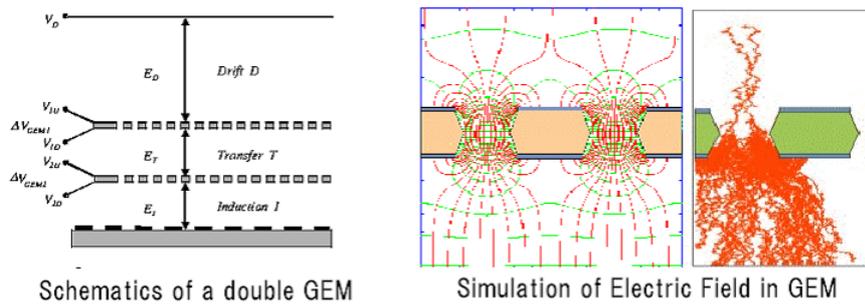
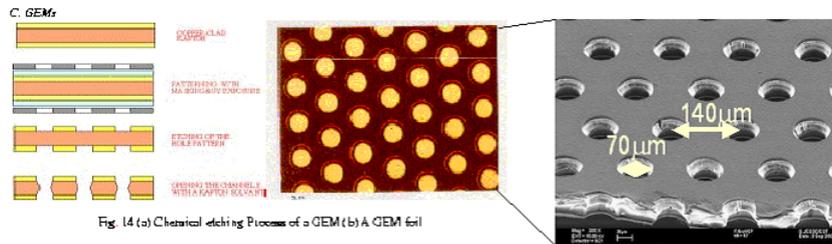


図 2.11: GEM の構造 [10] : 電極に収集されるまでに通過する孔で信号が増幅される、多段にすることで大きいゲインを得る

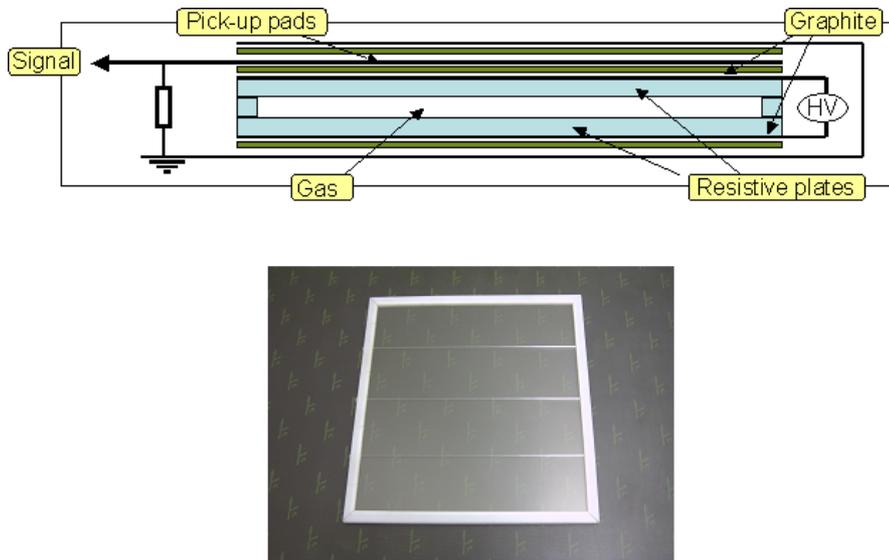


図 2.12: RPC の構造 [11] : ガスを高抵抗の板で閉じ込めその間に HV をかける。粒子が通過した際に発生したイオンを読み出し電極に集める

| | |
|-------------------|-------------------------------------------------------|
| 発生電荷 | 0.1/5pC in Avalanche Mode 5/100pC in Streamer Mode |
| Efficiency | 95% 以上 |
| Streamer Fraction | プラトー領域 数 100V にて Fraction は数% |
| Noise Rate | 0.1 ~ 0.2 Hz/cm ² |
| Different Gases | Freon : IB : SF ₆ = 94.5 : 5 : 0.5 |

表 2.2: RPC における性能 [11]

Chapter3 光検出器

これまで多くの粒子物理実験が行われてきたが、実験における光検出器の役割はカロリメータに組み込むことで粒子のエネルギーを電気信号として検出できる点やある事象を捉えるためのトリガーに用いることが出来る点で非常に重要である。次世代線形加速器実験においてはカロリメータに対する要請がこれまで以上に高いものになっているため従来使用してきたものより高い性能・安定性が必要とされており、様々な検出器がその候補として挙げられ、またテストされた。

本章ではこれまで次世代線形加速器実験のカロリメータに用いるためにテストされてきた光検出器を紹介する。

3.1 これまでの光検出器

これまで次世代線形加速器実験に向けて以下のような光検出器に関して研究が行われてきた。

- 光電子増倍管 (PMT)
- 電子打ち込み型 CCD¹(EBCCD)
- アバランシェフォトダイオード (APD)
- ハイブリッドアバランシェフォトダイオード (HAPD)

傾向として電子という荷電粒子を扱うことから磁場耐性が高くなければならない(信号が磁場によって不安定にならない)という要請による増幅領域の狭域化²、また高グラニュラリティの要請から読み出しが多くなることによる多チャンネル化が挙げられる。また電子管から半導体に移行している。本節では上に述べた光検出器について述べる。

¹電荷結合素子 (Charge Coupled Device) の事

²PMT のように増幅領域が広いと磁場によりローレンツ力等によりゲインが揺らぐ

3.2 光電子増倍管 [13]

光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube 以後 PMT) は光電陰極³と多段金属電極 (ダイノード) を組み合わせることで光量のある程度の大きさの電気信号に変換する光検出器である。高速応答で (nsec 単位)、高感度 (光電面の量子効率⁴による) 更に高ゲイン (10^7 程度) なデバイスでこの分野では広く使われている光検出器である。図 3.1 に PMT の基本的な構造を示す。

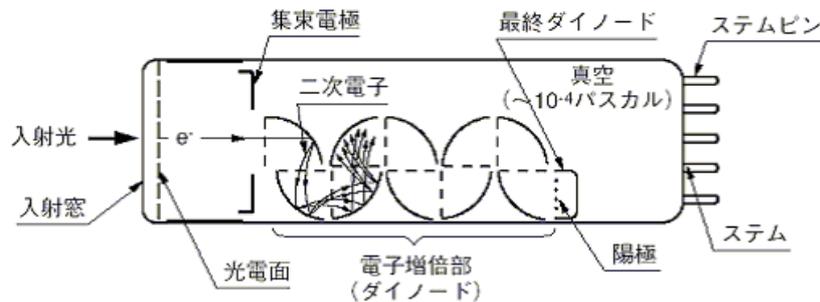


図 3.1: PMT の一般構造：図は 1 チャンネル、ボックス型ダイノードのものである

ガラスを通過した光子は光電陰極にて光電効果を起こし電子に変換される。光電面にはこの実験分野においてよく使用されるものとして GaAs (ガリウムヒ素) やバイアルカリ⁵などが挙げられるがこれはシンチレーターからの光に対する感度が高かったり、暗電流 (光子が入射していない状態で発生する電子) が少なかったりするためである。変換された電子はその後複数段のダイノードにて、加速されると同時にダイノードとの衝突から二次電子が放出される。この電子も次段のダイノードにて二次電子の放出を引き起こし、最初に光電面から発生した電子は $10 \sim 10^8$ 程度に最終的に増幅され、最終段のアノード (陽極) に到達し読み出される。ダイノードについては 1 段から最大 19 段まであり、それぞれの電極はニッケル金属やステンレス金属をもちいた基盤電極とアルカリアンチモンなどの二次電子放出材料から構成されている。また材質だけでなく構造においてもダイノードには様々な種類がある。主なものとしては光電子の収集効率にすぐれたボックス型、磁場の影響を受けにくくし、更に位置分解能をもたせたファインメッシュ型、コンパクトで応答性のよいサーキュラージェ型、時間特性やパルスリニアリティ特性が重要な測定に用いられるラインフォーカス型、大口径のものに使われユニフォミティのよいベネシアンブラインド型、そして応答時間が最も速く、磁場の影響を受けにくい MCP (マイクロチャンネルプレート) 等がある (図 3.2 参照)。これらは目的に応じて選択される。

³ 光電効果を起こす物質を陰極に塗布 (蒸着) している

⁴ 入射光子に対する光電子の割合をいう

⁵ 2 種類のアルカリ金属をもちいた材質

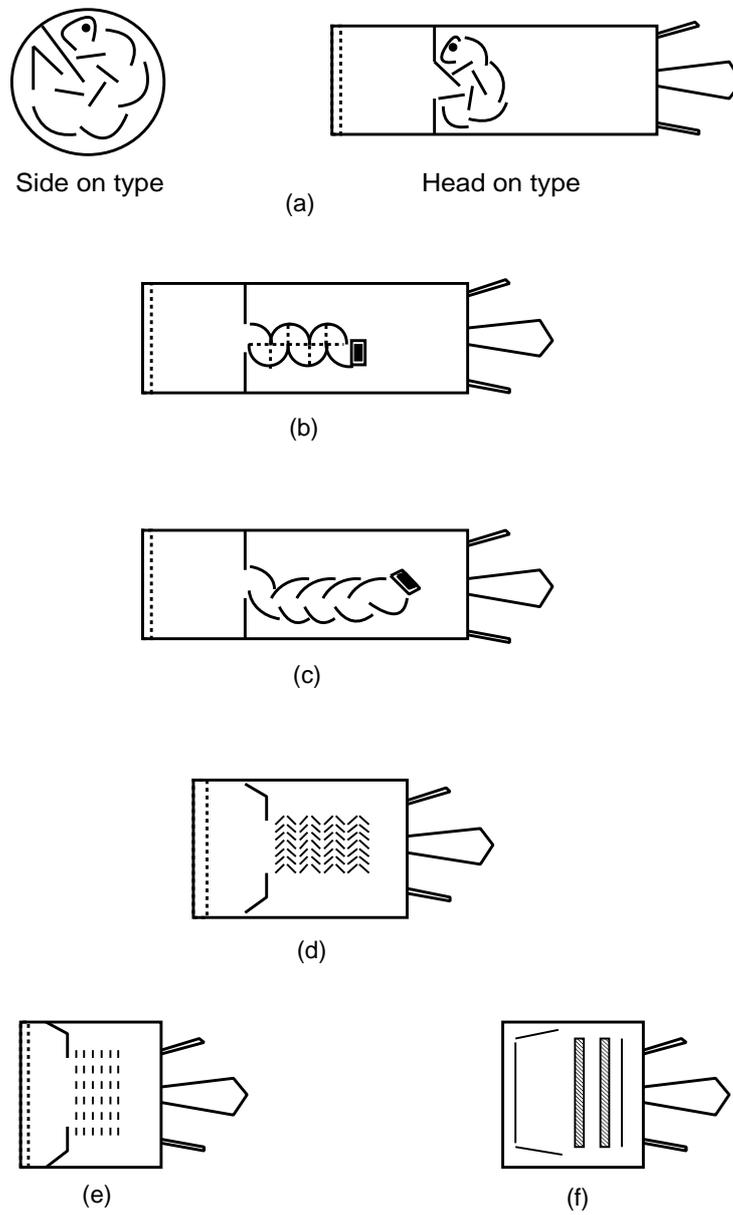


図 3.2: 代表的なダイノード構造 : (a) サーキュラーゲージ型 (b) ボックス型 (c) ラインフォーカス型
(d) ベネチアンブライト型 (e) 近接メッシュ型 (f) MCP

PMT は上に述べたように非常に種類も豊富で優れた光検出器だが増幅に要する距離が長い為磁場が存在するような状況下では磁力線に増倍される電子が捕らえられてうまく増幅できない可能性がある。したがってビームテストのようなカロリメータそのものの性能をテストしたり磁場の影響が少ない状況下（大気を越えてきた宇宙線測定）での使用が望ましい。

本研究では光量リファレンスの為に 16ch マルチアノード PMT H6568-10 を使用している。マルチアノード PMT はアノード部が分割されており、一本で複数チャンネル (10~ 数 10 チャンネル) の読み出しが出来る。ダイノードについてもメタルチャンネル型を採用しており極薄型の電極を高精度で積層しているため小型で時間特性に優れている。図 3.3 に寸法と概観を、表 3.1 にその特性を示す。

| | |
|-------------|-------------------|
| 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 段 |
| 光電面材質 | バイアルカリ |
| 最大印加電圧 | 1000V |
| 量子効率 | 15% |
| 増幅率 (@800V) | 0.7×10^6 |

表 3.1: H6568-10 の主な特性

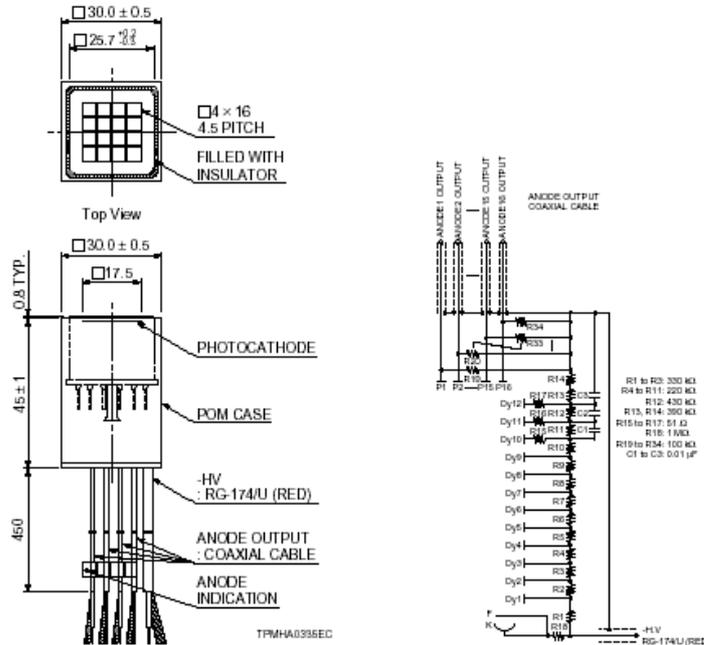


図 3.3: H6568-10 の構造図

3.3 電子打ち込み式 CCD (EBCCD)

電子打ち込み式 CCD(以後 EBCCD) は光電面から増幅部である CCD までの距離が非常に短く、また CCD はカメラなどにも用いられるように有感部(これを画素 (pixel) とよぶ) を非常に小さくかつ多数に出来ることから、多数のファイバーからの光を個別に読み出すことが出来ると考えられ次世代加速器実験における光検出器の候補に あがったものである。EBCCD の基本構造を図 3.4 に示す。

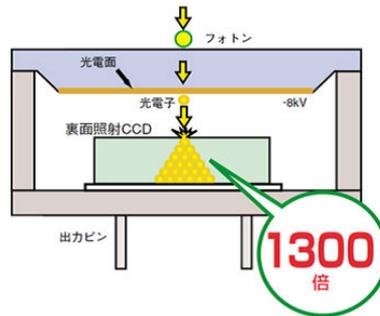


図 3.4: EBCCD の基本構造：裏面照射 CCD は表面電極等の通過による電子のエネルギー消費を防ぐ為に用いられている

EBCCD の基本構造は光電面と CCD の組み合わせである。光が光電面に入射すると光電効果により電子が生成され、CCD と光電面の間にかけている高電圧 (-8kV) により加速され CCD に入射する。入射した電子のエネルギーは CCD 内部で多数の電子-正孔対を生成するのに使われ、これらの電子を転送し信号として読み出す。次

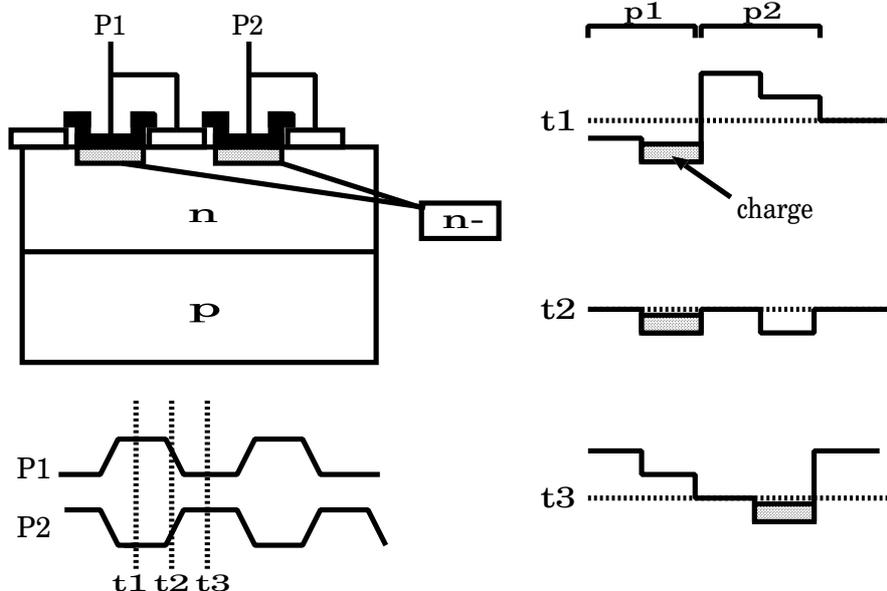


図 3.5: CCD の動作と構造：2 つの金属電極にかかる電圧の時間的变化で半導体中の電子を転送させる

に光電子を増幅する CCD の部分の構造と動作を図 3.5 に示す。

図に示した CCD は 2 相 (駆動) CCD と呼ばれるタイプのものであるが、その動作原理は次のとおりである。

CCD に入射した電子はそのエネルギーを電子 - 正孔対を作るのに使う。次に生成された電子は電極にかける電圧を図左下のようなタイミング電圧 (クロック信号) によって、ポテンシャルの井戸に閉じ込められ転送されていく。転送の様子を示しているのが図の右の部分である。このような動作はシフトレジスタという回路で実現され、これを 2 次元的 (垂直・水平シフトレジスタ) に用いることで CCD 上の電荷を一定の読み出し順序で行うことができ、入射した光子の位置を知ることが出来る。

CCD は確かにチャンネルも多く、光子の入射位置も単チャンネル読み出しで知ることが出来るが、半導体であることから来る熱的なノイズや順次読み出しから来る読み出し時間の長さという欠点もある。

以前用いていた EBCCD の特性を表 3.2 に示す。

| | | |
|--------|--------------------|---------------|
| CCD 部 | チャンネル数 (ピクセル数) | 512 × 512 |
| | 素子面積 | 1.2cm × 1.2cm |
| 光電面部 | 材質 | マルチアルカリ |
| | 光電面量子効率 | 15% (@400nm) |
| ゲイン | 1300 | |
| 電圧印加区間 | 2.5mm | |
| 読み出し時間 | 4~8sec (動作クロックによる) | |

表 3.2: 神戸で使用した EBCCD の諸特性



図 3.6: EBCCD の写真

3.4 アバランシェフォトダイオード (APD)

APD はフォトダイオードに高い逆電圧をかけることでアバランシェ増幅を起こし、ある程度のゲインをもつ光検出器としたものである。構造上は PIN 型ダイオードと同じものであるが、高い電圧をかけて使う為、表面絶縁破壊を起こすほど表面の電場を大きくしないでかつ検出器有感領域内に高い電界を作ることが出来るような半導体組成にする必要がある。

半導体の一般的な性質としてアバランシェ増幅におけるゲインは周囲の温度に大きく依存するという点では PIN 型フォトダイオードに劣る。しかしながら APD を使うことで小さいゲインを補うことが出来、また PIN 型に比べ高い S/N 比⁶をもつ。

APD の構造を図 3.7 に示す。高電場は p-n ダイオードの境目 (空乏層) に出来ており、i 型半導体⁷(真性半導体) はこの空乏層に電子を導くドリフト領域の役割を担っている。この構造は主に反応速度の速さを重視したものである。半導体光検出器の基礎的な知識は次章で述べる。

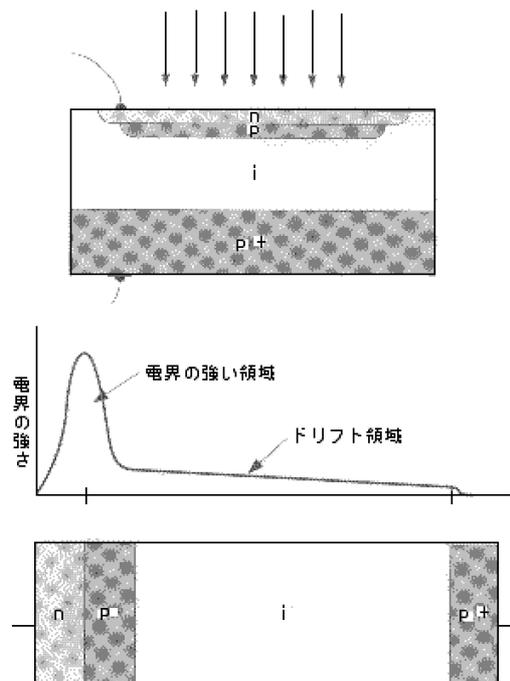


図 3.7: APD の組成と構造：電子の増幅は p-n ダイオードの空乏層で行われる

⁶ ノイズと信号の比、これが高いほどノイズが少ない

⁷ 不純物を加えていない 100% のシリコンのこと

3.5 ハイブリッド型アバランシェフォトダイオード (HAPD)

HAPD は光電陰極と APD で構成された光検出器でその具体的な構造において EBCCD とほぼ同じである。(電子検出および増幅部が CCD であるか APD であるかの違いのみである) 動作原理および構造を図 3.8 に示す。入射光はまず光電陰極で光電効果により光電子に変換される。光電陰極と APD の間には、数 kV ~ 10kV の高電圧がかけられており光電子はこの電場により加速される。加速された光電子は APD 表面にある電極層を通過し半導体内部でその運動エネルギーを電子-正孔対の生成に費やしながらかやがて停止する。生成された電子は各々アバランシェ増幅を起こしながら読み出し電極に収集される。以前研究で用いられた HAPD の特性を表 3.3 に示す。

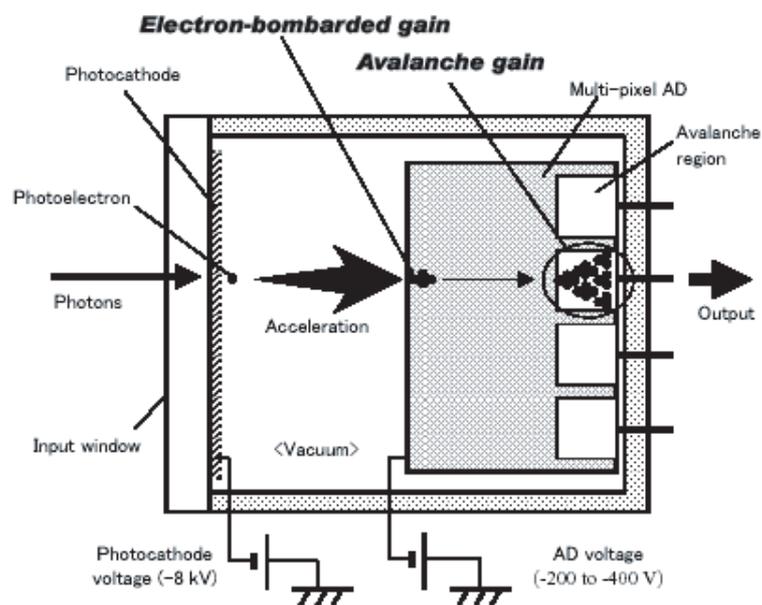


図 3.8: HAPD の構造

| | | |
|----------------|----------------------|-----------------------------|
| フォトカソード | 材質 | マルチアルカリ |
| | 量子効率 | 20%(@400nm) |
| | 供給電圧 | -8kV |
| アバランシェフォトダイオード | ピクセルサイズ | $2 \times 2 \text{ mm}^2$ |
| | ピクセル数 | 8×8 |
| | 有感域 | $16 \times 16 \text{ mm}^2$ |
| ゲイン | アバランシェゲイン | 30 |
| | 打ち込みゲイン | 2200 |
| | トータルゲイン | 6.6×10^4 |
| 時間特性 | 立ち上がり時間 | 1.0ns |
| | 立下り時間 | 1.0ns |
| その他の性質 | 2 光電子まで検出可能 | |
| | 1T(テスラ) 以上での磁場での使用可能 | |

表 3.3: 以前神戸で使用していた HAPD の諸特性 [14]

Chapter4 MPPC / SiPM

前章で述べてきた光検出器は一定程度の要求は満たすもののやはりコスト(読み出し回路なども含めて)が高く、実際のカリメーターに組み込む際のスペースの問題(物理的サイズの問題)もある。そこでGLD-CALが着目したのがロシアで開発されたSiPMである。本章では光検出器SiPMおよびMPPCの紹介と本研究で重要になる半導体の知識について述べる。尚これらの解説については参考文献[15]を参考にさせていただいた。

4.1 半導体

固体の電子デバイスのほとんどは半導体の単結晶¹でつくられる。半導体とは電気を通す「導体」と電気を全く通さない「絶縁体」の中間の性質を持つ物質でSi(シリコン)が主な例である。Siの結晶では図4.1に示すようなダイヤモンド構造と呼ばれる配置を取っており、規則正しく原子同士で結合を作りながら配列している。

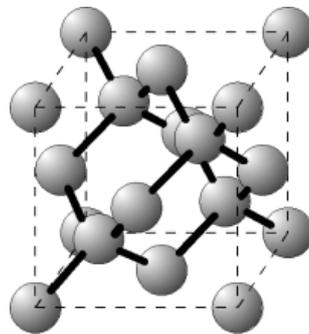


図 4.1: Si 単結晶の構造

¹その構成元素である原子が規則正しく並んで出来る構造

このような結晶の内部には多数の電子が存在し、それぞれの電子が持つエネルギーは図 4.2(a) に示すような許容帯と呼ばれるいくつかの幅を持った領域の値のみが許されていて許容帯と許容帯の間にある禁制帯と呼ばれる領域には電子は存在できない。また許容帯それぞれにおいて存在出来る電子の数には上限がある。このような構造をエネルギーバンド構造と呼ぶ。このような不連続性が生じるのは周期的なポテンシャルにおける量子的な条件が課せられるためである。(詳しくはクローニツヒ・ペニーのモデルを参照)。図において横軸は位置をしめし縦軸は電子から見た電氣的ポテンシャルを意味する。

ここで全ての半導体結晶では熱的に閉じた絶対零度の系において、そこに含まれるべき電子をエネルギーが低い状態から順に埋めていくとある許容帯が一杯になるところで電子がなくなりその上の許容帯には電子が入らないという状態になる。このとき最大エネルギーの電子が入った許容帯を価電子帯 (valence band)、その上の許容帯を伝導帯 (conduction band) と呼ぶ。図 4.2(b) に電氣的性質の異なる 3 つの物質、すなわち導体、半導体、絶縁体のエネルギーバンド図を載せる。電氣的な振る舞いは伝導帯と許容帯のエネルギー (バンドギャップという) の差あるいはフェルミレベルと呼ばれるエネルギーレベルとバンドの位置関係などから考えることが出来る。

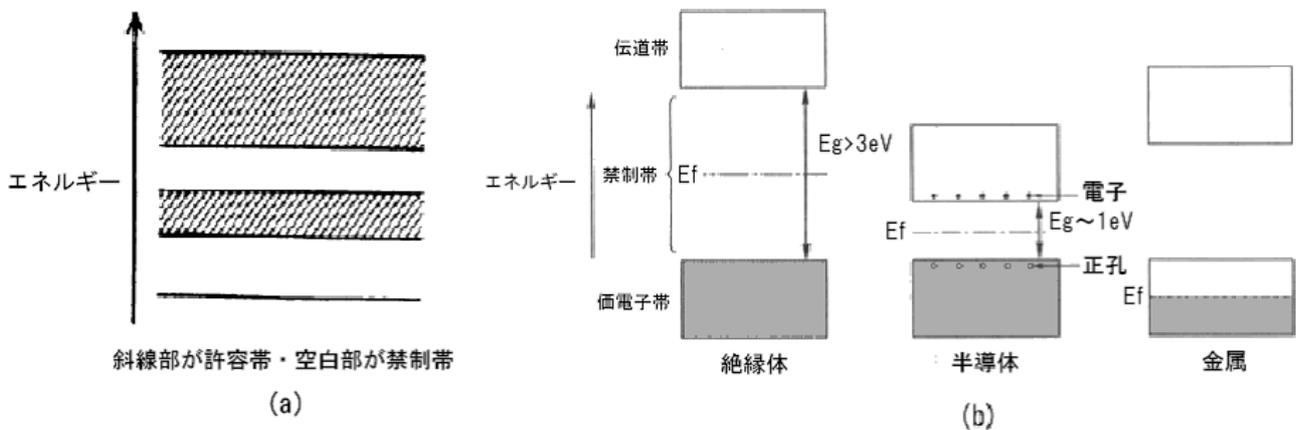


図 4.2: エネルギーバンド構造

次に半導体の電氣的な振る舞いについてだが、絶対零度では価電子帯にのみ電子が存在し伝道帯にはまったく電子が存在しない状態であるが温度が上がるにつれて価電子帯の電子の一部が熱的に励起され伝導帯のエネルギー準位をとるようになる。このときもともと電子が存在していたエネルギー状態に穴ができることになり、これは電子の存在していた状態に比べ正に帯電していることから正孔 (hole) と呼ばれる。電子そして正孔は半導体中の電荷の担い手であることからキャリアと呼ばれる。

ここで半導体の両側に電圧をかけ、内部に電界が生じた場合図 4.3 (b) のようにバンドに傾きが生じさせることで表現ができる、こうすることでキャリアはそれぞれ容易に移動できる。電子と正孔は逆向きに移動するが電荷が逆なので結局両方が同じ方向の電流を担うことになる。

このように半導体が2種類のキャリアを持つことは、金属のキャリアが電子のみであるのと非常に大きな違いであり、半導体という材料がもつ機能性の源であると言える。

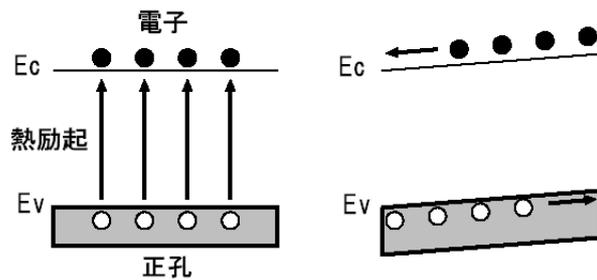


図 4.3: キャリアとバンド構造

4.2 p型半導体とn型半導体

一般の電子デバイスでは純Siをそのまま使うといったケースは少なく、これに各種の不純物を混入させる(不純物ドーピングまたは単にドーピングという)ことで半導体内の電子と正孔の濃度を大幅に変化させて用いることが多い。純Siでは単位体積辺りの電子と正孔の数は等しくこれを真性半導体と呼ぶ。一方ドナーと呼ばれる5価の原子をSiにドーピングすると、共有結合に使われない電子が自由電子として半導体内を動き回る。このような半導体をn型半導体と呼ぶ。またアクセプタと呼ばれる3価の原子をSiにドーピングすると、今度はSiの共有結合を取り込んで正孔を作り出す。このような半導体をp型半導体と呼ぶ。

更にこれらの不純物のドーピング量によって多い場合には p^+ 、 n^+ 型、少ない場合には p^- 、 n^- 型と呼ぶ。

これらの様子を図4.4に示す。

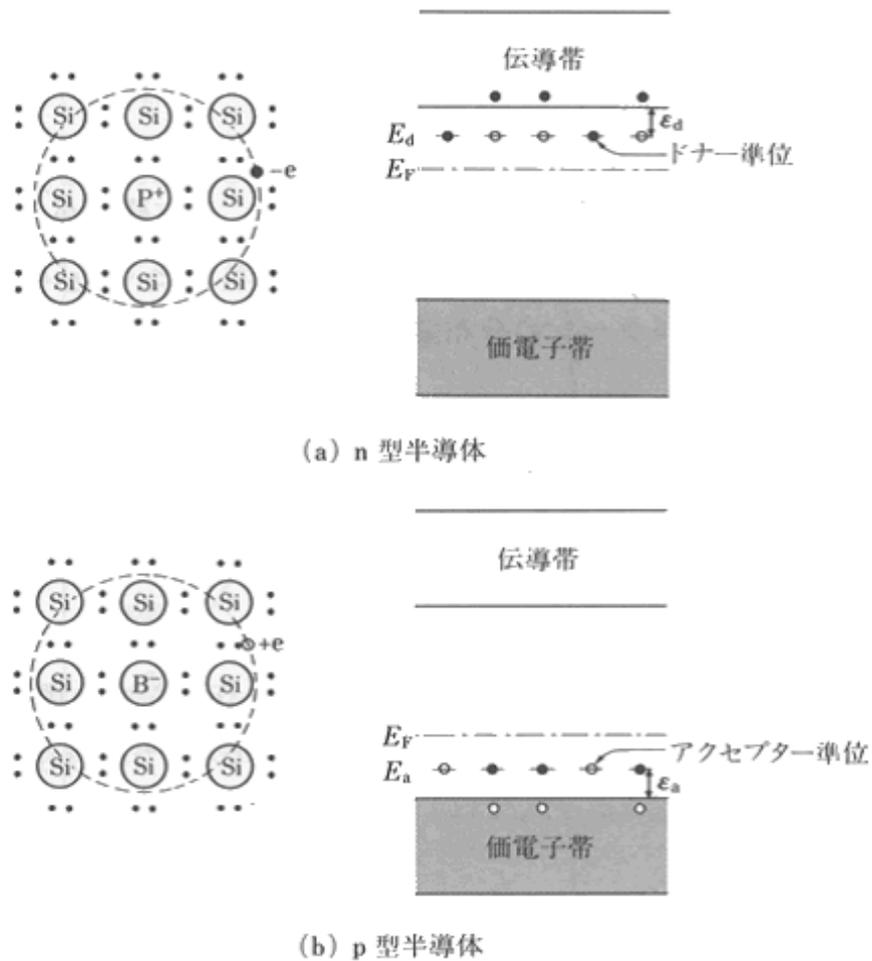


図 4.4: p型半導体とn型半導体

p型半導体およびn型半導体について重要なことはフェルミレベルの違いである。電子の状態数は状態密度を $N(E)$ 、フェルミディラックの分布関数を $f_n(E)$ とすると $N(E) \times f_n(E)$ とかけるが、p型半導体のフェルミレベルは真性のものとくらべて価電子帯側に、n型半導体のフェルミレベルは伝導帯側によるので結果としてp型は正孔が伝導帯(電子から見ると価電子帯)に多くn型は電子が伝導帯に多いという結果になる。具体的には真性半導体のキャリア濃度を n_i 、ドナー濃度を N_D 、アクセプタ濃度を N_A とすると

$$E_F = E_i + kT \ln \frac{N_D}{n_i} \tag{4.1}$$

$$E_F = E_i - kT \ln \frac{N_A}{n_i} \tag{4.2}$$

となる。尚 E_i は真性半導体のフェルミエネルギー、 E_F はn型、p型それぞれのフェルミエネルギーである。またこのレベルの違いはダイオードの原理を説明する上でも重要になる。ダイオードについては次章で述べる。図 4.5 に各ドーパにおけるバンドの変化を示す。

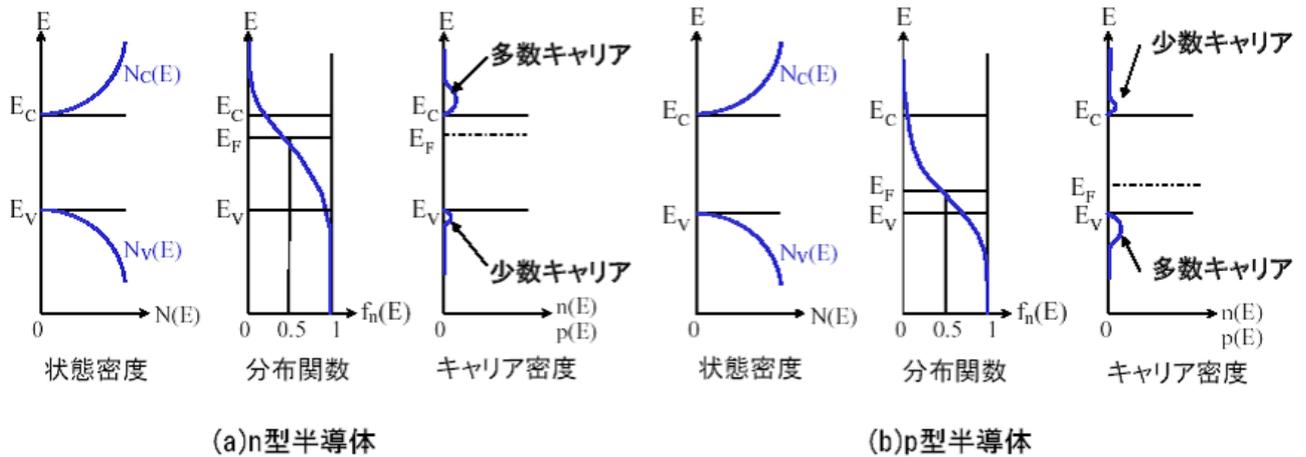


図 4.5: p 型半導体と n 型半導体におけるバンド構造

4.3 ダイオードとフォトダイオード

p型半導体及びn型半導体はそれぞれ単独で用いられることは少なく、電子デバイスではそれらを組み合わせた形で用いることが大抵である。ここでは最も基本的な素子であるダイオード及び受光デバイスとして用いられるフォトダイオードについて述べる。ダイオードは図 4.6 に示すように p 型半導体と n 型半導体をつなぎ合わせたような構造(これを pn 接合という)を取っている。図 4.7 はダイオード内部のエネルギーバンドの変化を示したものである。p 型半導体と n 型半導体をつなぎ合わせるとそれぞれのキャリアの濃度の差より拡散が起こり、互いに相手の領域に入り込み電子と正孔が結合することで消滅する。これが繰り返されると p 型と n 型の接合領域

ではキャリアが存在しない領域が出来る。これを空乏層 (Depletion layer) とよぶ。この領域ではアクセプタが陰イオン、ドナーが陽イオンになることで電界が形成されポテンシャルに傾斜がおこる。この傾斜とキャリアの拡散がつりあったところで拡散は停止しこれ以上の空乏層の広がりをとめる。

ダイオードは整流作用のある素子として知られているが、その動作原理についてもバンドを用いて説明できる。電圧を先程の電位勾配 (図 4.7 における eV_ϕ) を打ち消すようにかけると傾斜を超えていくキャリアの数が増え、結果として電流が流れる。これを順方向電圧という。また電圧を勾配が大きくなるようにかけると空乏層をこえるキャリアがなくなり電流はほとんど流れない。これを逆方向電圧という。このように p 型と n 型をつなぎ合わせるだけで特殊な動作を備えた電子デバイスとなる。

次にフォトダイオードについてだが、基本的な構造およびエネルギーバンドはダイオードと同じであり、これに光が入射するとバンドギャップより光のエネルギーが大きい場合電子が伝導帯まで励起され結果として電流が流れる。

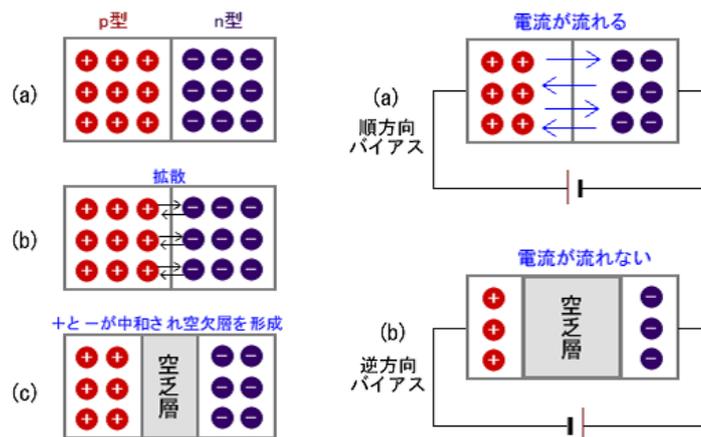


図 4.6: ダイオードの構造:ダイオードは p 型と n 型の半導体を接合したものである

フォトダイオードは半導体光検出器の最も基本的なモデルでありこの後述べる SiPM および MPPC も基本的にこの構造をとっている。ただしこれは APD (アバランシェフォトダイオード) であり、応答速度を重視した構造になっている (構造については前節の図を参照)。その仕組みは i 型半導体を真ん中に入れることで半導体内部をドリフト空間としているところにある。こうすることでドリフトをかけていない場合の拡散による応答速度の低下を防ぐ (pn のみのダイオードでは中性領域で発生したキャリアは拡散で空乏層まで移動する)。

次節では SiPM および MPPC の振る舞いを理解・考察するうえで重要となるダイオードの諸特性について述べる。

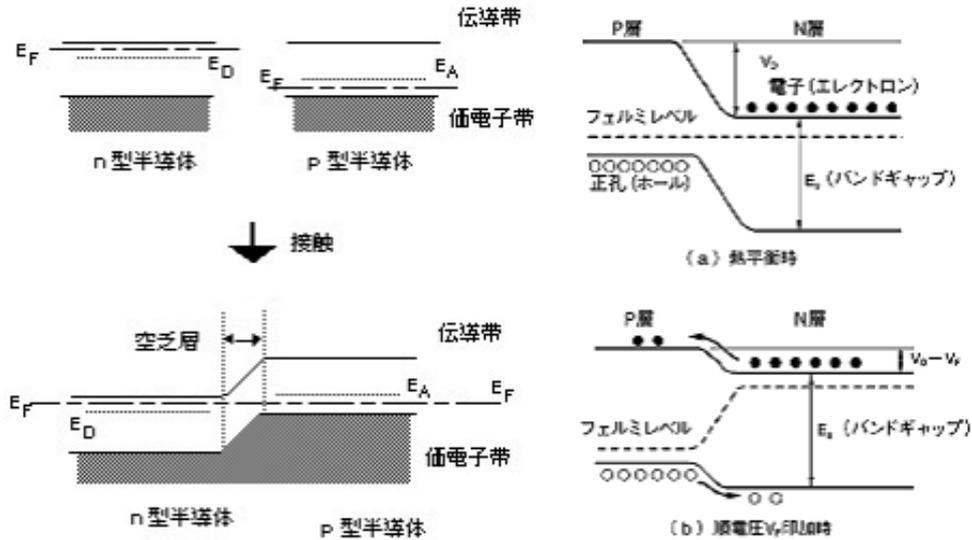


図 4.7: ダイオードにおけるバンド図: 接合後は一つの系になるのでフェルミレベルがそろうようにバンドが曲がる

4.4 ダイオードの諸特性

ダイオードには様々な特性がある。これらはデバイスとしての性能を評価する上で非常に重要である。本節ではダイオードに関する様々な特性と概念を述べる。

4.4.1 空乏層の幅

pn 接合形成時には空乏層が形成されることを述べた。空乏層はキャリアが非常に少ない為に絶縁層的な性質を持ち、その内部に大きな電解が存在しえる。そのため空乏層は静電容量を発生させダイオードはコンデンサのように振舞うことになる。この性質は接合の耐電圧特性、漏れ電流特性や光照射に対する特性などデバイスの特性に重要な関わりを持っている。これらの特性にとっては空乏層の厚さが重要なパラメーターであり、この厚さは印加電圧によって変化する。図 4.8 に空乏層内の物理量の分布の様子を示す。空乏層の厚みについては空乏層内の電荷量から次の式で表せる。

$$W = W_p + W_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\epsilon_0}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (\Phi_D - V)} \tag{4.3}$$

ここで ϵ_s は半導体の比誘電率、 ϵ_0 は真空の誘電率、 q は単位電荷、 Φ_D は内蔵電位 (印加電圧のない状態での p 型と n 型間の電位差)、 V は印加電圧である。この式より半導体の空乏層の厚さは逆電圧が大きいほど広く、不純物濃度が大きいほど狭くなる傾向にある。

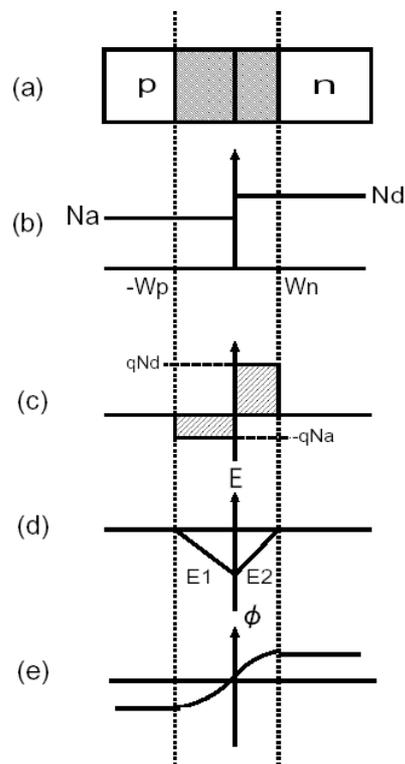


図 4.8: 空乏層内の物理量分布 : (b) ドナーアクセプタの濃度分布 (c) 電荷分布 (d) 電場分布 (e) 電位分布

4.4.2 ダイオードの静電容量

前節で述べたようにダイオードは静電容量をもつコンデンサとして考えることも出来る。本節ではこの静電容量について述べる。

単位面積あたりの静電容量を考えると先程の W を用いて $C_J = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{W}$ と書けるので、これより、

$$C_J = \sqrt{\frac{q\varepsilon_s\varepsilon_0 N_D N_A}{2(N_D + N_A)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Phi_D - V}} \quad (4.4)$$

となる。ただし正しくはこの静電容量は $C_J = \frac{\Delta Q}{\Delta V}$ から導かれるものであり、微分容量として表される (W は電圧と共に変化するので)。また $V=0$ にて空乏層はやはり存在するので実体を正しく表していないことになる。この容量を接合容量と呼び空乏層内の電気容量を示す物理量となる。

静電容量には中性領域 (空乏層外の領域) のもつ拡散容量というものもあるがこれは順方向に電圧を与えた場合に発生する容量であるので、本研究には関係しない物理量である。ダイオードの静電容量は応答速度に関係してくる (RC 時定数関連)。

4.4.3 逆方向電圧とブレイクダウン

接合にかける逆方向電圧を大きくしていくと、図 4.9 のようにやがて大きな電流が急に流れ始める。これはブレイクダウン (降伏) とよばれ、これが起こる電圧をブレイクダウン電圧あるいは逆方向耐圧などという。ブレイクダウンの起こる機構は主になだれ降伏とツェナー降伏がある。なだれ降伏では大きな逆方向電圧による高電界において、空乏層中をキャリアがドリフトする際にそのエネルギーで結晶格子の結合を切り、そこに新たな電子と正孔を作り出す。ここで生成された電子や正孔は再び電界によって加速され新たな電子-正孔対を作るのに必要エネルギーをえるので、電子-正孔対の数はネズミ算式に増えて、大電流が結果として流れる。この増倍現象のことをなだれ増倍現象 (アバランシェ増幅) と呼ぶ。一方ツェナー降伏では逆方向電圧の絶対値が大きくなると中性 p 領域の価電子帯と、中性 n 領域の伝道帯との間の空乏層による障壁の厚さが薄くなり、価電子帯の電子が量子力学的なトンネル効果で伝道帯に抜けるようになる。この結果、大きな電流が流れるようになる。逆電圧における増幅のバンド図を図 4.10 に示す。

なだれ増倍現象は、キャリア濃度が正帰還的に増大する現象であり、またトンネル効果の電子の透過率は障壁の厚さの指数関数に依存するので、どちらも電圧に対して強い非線形性をもつ現象である。したがって図 4.9 のようにブレイク電圧付近の電流の増大の勾配は非常に大きい。なだれ増倍にはキャリアが走行する距離が必要であるので、比較的的空乏層が厚く、高い電圧でブレイクダウンする場合に支配的である。これに対してツェナー降伏は不純物濃度が高く、空乏層の薄い場合に起こりやすくブレイクダウン電圧は低い。

半導体光検出器において光入射による電子-正孔対の生成からなだれ増幅により信号を可測化するという仕組みがとられているものとして APD が代表的である。

4.4.4 半導体光検出器

これまでは半導体デバイスの一般的な性質を述べてきたが、実際に半導体をどのように光検出器として用いていくのかについて本節で述べる。光信号を高感度かつ高速の応答性で検出する目的で作られる pn ダイオードがフォトダイオードである。動作領域は、逆バイアス領域に設定される。図 4.11 にその構造を示すように通常は光

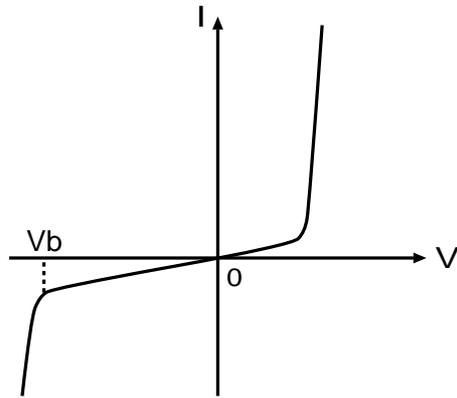


図 4.9: ダイオードの一般的な電流電圧特性

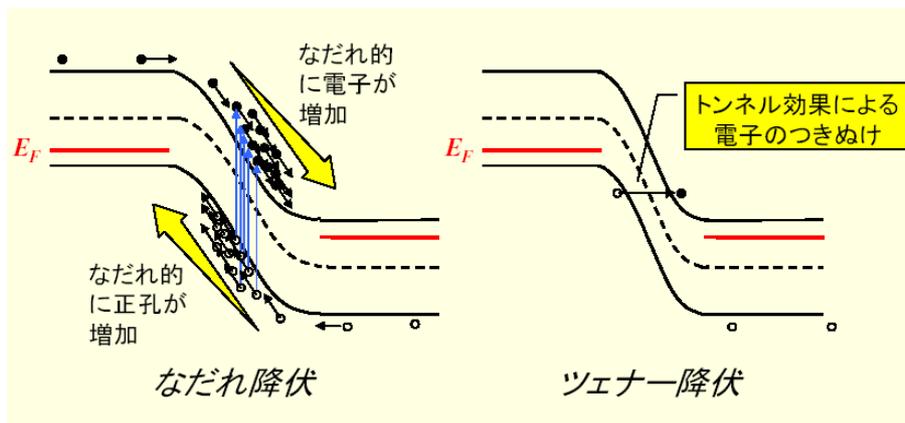


図 4.10: なだれ増幅とツェナー増幅

は接合面に垂直に表面から入射するが、Si などのフォトダイオードでは、基礎吸収が起こる波長領域においても μm オーダーの深さまで侵入する。したがって、ダイオードを逆バイアスして空乏層を広げることによって、空乏層内の励起キャリア数を増やすことが有効である。動作としては暗状態ではわずかな逆方向飽和電流しか流れないが、光が入射すると光電流が流れ光検出器として働く。

応答速度において、図 4.11 左の pn 接合ダイオードでは、励起キャリアは中性領域と空乏層と両方で発生する。このうち、空乏層内は高電界で大きなドリフト速度で移動するが、中性領域の発生キャリアは空乏層端までは拡散で移動する。中性領域が厚いとこの部分の走行時間が大きくなり、応答速度は遅くなる。そこで、図 4.11 右のように p 層と n 層の間に i 層を挟んだ、pin 型ダイオードが使われている。この構造では、広い範囲にドリフト電界がかかり、光電流の大部分をドリフトで光速に引き出せるので、光速応答性に優れる。

応答速度を決めるもう一つの要因は、CR 時定数である。ダイオードは接合容量をもっているので、ダイオードの内部抵抗や外部の回路の抵抗成分との時定数で応答特性が劣化する。逆バイアスで空乏層を広げる、あるいは pin 構造をとることが接合容量を低減させ、応答速度の向上に貢献することが分かる。また接合面積を小さくすることで応答速度の向上が見込める。

フォトダイオードの逆方向バイアスを大きくしていくと、やがてなだれ増倍現象による電流の増大が見える領域になる。ここでは、光電流がなだれ増倍によって数十から数百倍になり、増倍利得を持ったフォトダイオードとして動作することが可能になる。この動作を目的として作られたものがアバランシェフォトダイオード (APD) である。

なだれ増倍は非線形性の強い不安定な現象であるから、素子構造やバイアス電圧の高安定制御などに留意する必要があるが、高速応答性を維持して大きな利得を得る素子として重要な役割を担っている。

これらのフォトダイオードは一般的に光通信におけるキーデバイスとなっている。

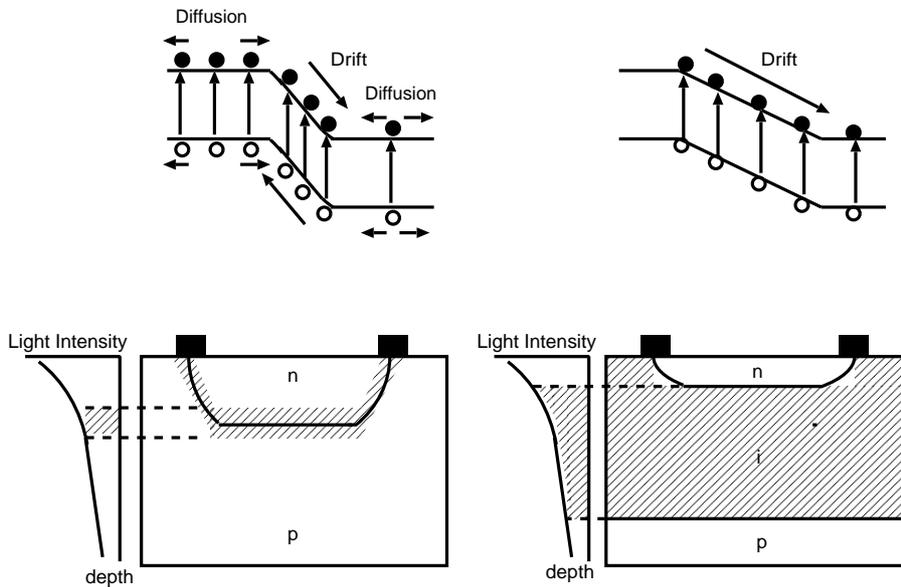


図 4.11: フォトダイオードの構造とエネルギーバンド

フォトダイオードにおいて加える逆電圧により出力される信号の大きさは変わるがその様子はガス検出器におけるものと似ている。この様子を図 4.12 右に示す。入射光量と出力信号の間に比例の関係のある領域から入射光量に関わらず一定の信号を出す領域に逆電圧を上げていくにつれ変化していく。光量に関わらず信号が一定になる状態のことをガイガーモードという。半導体光検出器においてはその用途に合わせこれらの逆電圧のどの領域を用いるか様々である。

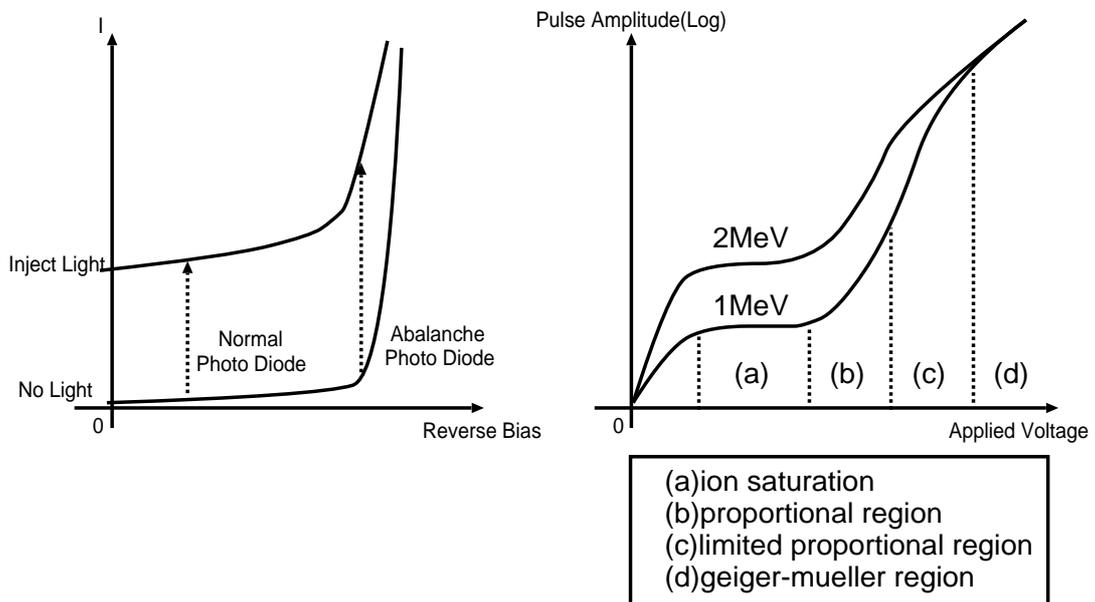


図 4.12: 左:フォトダイオードにおける逆電圧と信号 右:ガス検出器の電圧と信号

4.5 SiPM/MPPC

4.5.1 Limited Geiger Mode Microcell Silicon Photodiode (LGP)

LGP は single-photon silicon avalanche diode (SPAD) と呼ばれるデバイスを元に考えられたデバイスである。SPAD は $20\text{-}500\mu\text{m}$ 程度の大きさのピクセルのフォトダイオードでブレイクダウン電圧の $10\sim 20\%$ 上の領域で駆動する。熱的もしくは光入射によって生成されたキャリアはガイガーモードにおける放電を起こす。この SPAD を一枚の基盤の上に複数設けたのが LGP である。これによって光量をデジタルに測定できることが期待される。図 4.13 に LGP の構造を示す。右上の図において有効な受光領域の面積が全体の 3.6% しかなく結果として全体的な efficiency は 1% しかない。ここで efficiency をあげる最も簡単な方法として受光 n^+ 領域の濃度の増加があるが、これによって隣接ピクセルとの結合が強くなってしまいピクセルの独立性や限定ガイガー領域におけるパフォーマンスを下げることになってしまう。そこで左の 2 つの図のような構造的な改良が加えられた。まずは a) のように先程のものに SiO_2 の層を加え、更に b) のように台形構造をとることで結果として 25% の有効受光領域を得ることができている。[16]

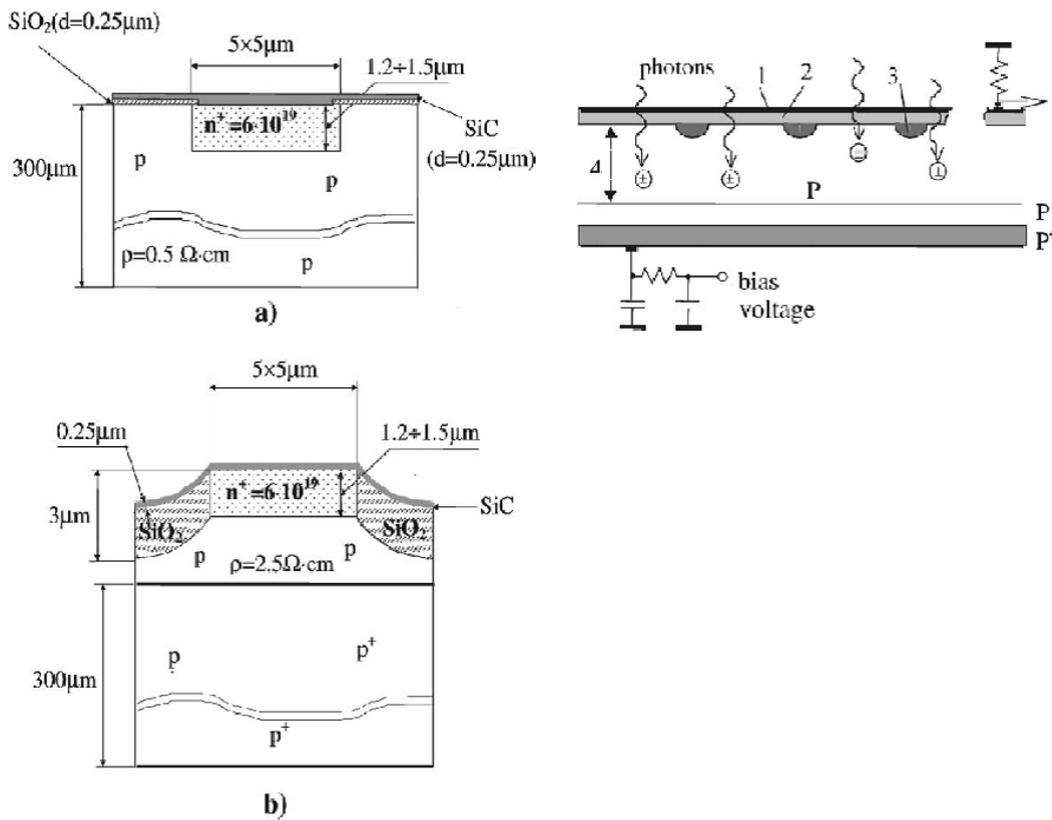


図 4.13: LGP の構造

4.5.2 SiPM/MPPC の構造

SiPM/MPPC における基本構造は図 4.14 で示すように一枚の p^+ 型基礎半導体の上にダイオードのピクセルを設けている。ガードリング (n^- 型半導体で構成) は隣接するピクセルへの電荷漏れを防ぐ役割を担っている。電荷増幅に関しては p^+ 、 n^+ ダイオードにおける空乏層で起こる。substrate p^+ に関してもドリフト領域となっており高速応答性を考えた構造となっている。

各ピクセルについては限定ガイガー領域 (Limited Geiger Mode)² と呼ばれる電圧領域で駆動し入射光量に関わらず一定量の信号を放出する。これによって LGP と同じく光量をデジタルに検出することが可能でありかつ高い p.e. 分解能を得ることが期待される。

ガイガーモードで駆動するピクセルから放出された信号は Al の導線の流れ、読み出しワイヤーから読み出されるが、このとき表面に各ピクセルに対して実装されている Si 抵抗 (100-200k Ω) によって放電したピクセルにかかる電圧をブレイクダウン電圧よりも下に押さえる。(信号が流れることで電圧降下が起こる) またこの抵抗はデカップル (個々のピクセルを独立させる) の役目も担っており隣接するピクセルからのノイズが入り込むのを防いでいる。

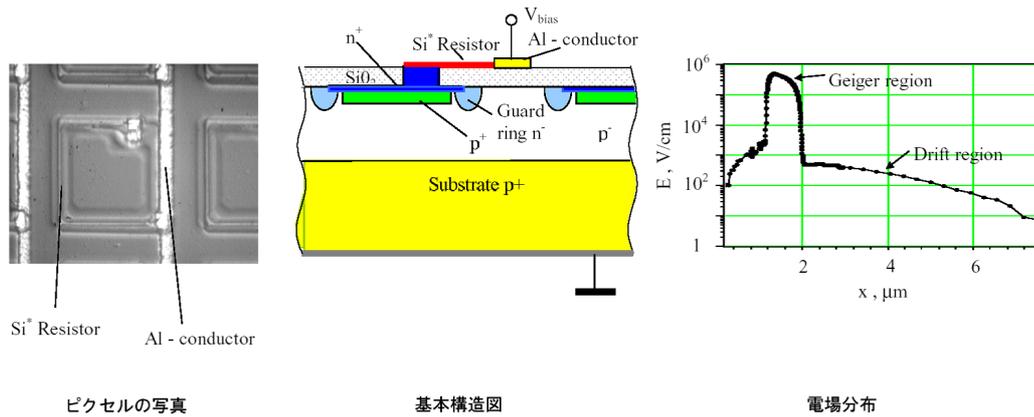


図 4.14: SiPM の構造 (空乏層の厚みは $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 程度で電圧勾配は $(3 - 5) \cdot 10^5 \text{V/cm}$ となっている) [17]

一方、MPPC は浜松ホトニクス株式会社が現在開発中の光検出器でこれが完成することで日本における高性能光検出器の調達が可能になる。具体的な内部構造は明かされていない (企業秘密により) が、原理的には SiPM 及び LGP と同じで、クエンチング抵抗の値や不純物濃度を調整することにより複数のプロトタイプを現在作っている。

²LGP の項で述べたブレイクダウン電圧から 10 ~ 20% 上の電圧領域のこと

4.5.3 SiPM/MPPC の一般性能

SiPM および MPPC における一般的な性能は次のようになる。

・ Gain

ガイガーモードにおいて入射光量に関わらず出力信号は一定である。そこで出力信号を Q_{out} 、ゲインを G とすると

$$G = \frac{Q_{out}}{e} \quad (e = 1.6 \times 10^{-19} C) \quad (4.5)$$

となる。またガイガーモードにおいて 1 ピクセルで増幅される電荷はピクセルの接合容量を C_{pixel} とすると。

$$Q_{out} = C_{pixel} (V - V_o) \quad (V \text{ 及び } V_o \text{ は逆電圧だが } + \text{ とする}) \quad (4.6)$$

となる。ここで V_o はガイガーモードが開始する電圧値である。

この関係からゲインの測定を行うことで各ピクセルにおける接合容量とガイガーモードの始まるバイアス電圧が分かる。

・ Noise

SiPM および MPPC においてノイズの主な要因は熱励起によるノイズであり熱的に励起されたキャリアが空乏層内で増幅されて生成されるノイズがほとんどである。本研究においてもこのノイズレートの測定を行っており、特に MPPC についてはこのノイズの目標値を掲げる必要があり、1MHz 以下であることが望まれている。

・ Efficiency と Photon Detection

PMT などの電子管において Efficiency は光電面の量子効率で決まるが、SiPM/MPPC においては次の式で Efficiency は決まる。

$$\epsilon = \epsilon_q \epsilon_{geiger} \epsilon_{geometry} \quad (4.7)$$

ϵ_q : 半導体の量子効率 ϵ_{geiger} : Geiger 放電の起こる確率 $\epsilon_{geometry}$: 構造による量子効率 (有効受光面積など)
この式で問題になるのは $\epsilon_{geometry}$ である。これは LGP の節でも述べたように構造によっては大変小さくなってしまっているので開発に関して留意されなければならない。Efficiency は実際の光子検出の際に次のように関係してくる。

$$N_{pix} = N_{max} \left(1 - \exp \left(-\frac{\epsilon N_{ph}}{N_{max}} \right) \right) \quad (4.8)$$

ここで N_{max} は検出器のピクセル数、 N_{ph} は検出器に入射する光子数、 N_{pix} は実際に応答したピクセル数である。これは一つのピクセルについて平均 $\frac{N_{ph}}{N_{max}}$ 個の光子が入射しており少なくとも一つ光子が入射し放電する確率は Efficiency を含めてポアソン分布より $1 - \exp \left(-\frac{\epsilon N_{ph}}{N_{max}} \right)$ となる。これが N_{max} 個のピクセルについて成り立つので全体的な期待値は式 4.8 のようになる。

Chapter5 研究：SiPM・MPPCの性能評価

前章までは本研究に関する諸々の知識及び概念について述べてきた。ILC 実験において SiPM/MPPC の利用価値として、

- 増幅領域が狭いことからカロリメータにかかる磁場の影響をあまり受けない。
- 単価が\$10(あくまで浜松の予定である)と非常に安価であることから granularity の高いカロリメータを作る際に低予算で棲む

という点が挙げられる。この2点は従来使ってきた PMT にはないもので非常に魅力的である。本章では本研究である新型光検出器 SiPM 及び MPPC の性能評価及びそこから導き出される問題を述べていく。

5.1 研究内容

本研究では SiPM の主に温度変化による性能の変化の測定および光量に対する理想的な応答が成されているかどうかを調べる為の測定を行っている。項目としては、

- Noise Rate (温度変化 有)
- Gain (温度変化 有)
- Linearity (温度変化 無)
- Efficiency (温度変化 無)

となっている。ただしあくまで MPPC については試験機なのでシグナル等が正常に出力されているかどうかはまだ議論されている段階であることを念頭に置いた上で結果については見ていただきたい。また本研究では素子全体としての評価を行っているが、ピクセル毎の評価については新潟大学で研究されており付録 A を参照されたい。尚、現在のところ SiPM/MPPC に対する性能的な要求として、以下のようなものが挙げられる。

- 高いゲイン (10^6 程度) → 少光量イベントも無光状態の信号とはっきり区別できるように
- ゲインの各ピクセルにおける一様性 → uniformity の高いカロリメータに
- 高い Particle Detection Efficiency (PDE) → MIP のような少光量イベントでも検出可能に
- 多ピクセル → サチュレーション (付録 B 参照) の効果を減らす為。

現在 2mm の Sci + 1mm ϕ WLS + PMT で MIP に対して 2.5p.e. 程度の検出であることがわかっておりこれを 10p.e. 程度まで増やす為の上のような条件 (特に 3 番目) が必要になる。

本研究ではまた前章で述べた MPPC・SiPM の動作を確認・把握することも目的としている。

5.2 評価対象とした SiPM 及び MPPC

5.2.1 外部構造

本研究では JINR (Joint Institute for Nuclear Research) より頂いたロシア MEPHI/PULSAR 製 SiPM および、浜松ホトニクス (株) より頂いている MPPC を評価の対象としている。写真 5.1, 写真 5.2 に SiPM および MPPC におけるピクセルの拡大写真および全体像を載せる。尚全体的な大きさとしては基本的にダイオードなどの一般的な回路素子と同程度なので、回路上に半田付けしてパッケージの足に逆電圧をかける必要がある。

写真 5.2 から多ピクセル MPPC においては Geometrical Efficiency が 42.0% 程度になっており、有効受光域の広域化が望まれる。また MPPC においては素子上部に薄いアクリル板が保護の為に設けられており、実験においてファイバー等に接着する際、光を拡散してしまう。MPPC についてはまだこのようなパッケージングにおける改良は可能であり、よりこちらの用途に合わせた構造をモデリングする必要がある。

SiPM については逆に素子及び素子の読み出し部とパッケージの足を結ぶボンディングワイヤがむき出しになっており、あまりに細い為ちょっとした衝撃で切れてしまう。このように切れたボンディングワイヤは再びつなぐことが困難である為、非常に手間がかかってしまう。又、SiPM についてはロシアで調達しなければならないため、今後は日本で調達できる MPPC の構造の改良につとめることが必要となる。

現在 MPPC に要求されている構造的な要求として

- 外形として 2mm 幅以内 (シンチレーター厚から)。受光面はファイバー半径により決まり、直径 1 mm あるいは 1.5mm。
- ピクセル数は ECAL のためには、数千以上、HCAL だと 1000 程度。 μ 粒子に対しては数百で十分。

が今のところ挙がっている。またベンチテストやカロリメータを作成してのビームテストなどを行うことも考慮したうえで、構造の改良について今のところ考えられるものとして、

- ファイバーを密着してもワイヤーが切れないようにワイヤーとピクセル群の距離を離す。
- ファイバーの断面に最大限適応する為ハニカム型の素子にする。
- 実際のカロリメータに組み込む際にはデッドスペースが問題になるのであるべく薄くする。

等が挙げられる。

SiPM を実際にカロリメータに適用している例として図 5.3 に DESY において現在テストされている HCAL に取り付けられた SiPM を載せる。

DESY CALICE における HCAL について SiPM はタイルの隅の空間に挿入されており円状に挿入されたファイバーからの光を検出する。この SiPM からの信号の読み出しは層と層の間に読み出し基盤の層を設けることで可能にする。ILC としてもこのようなモデルで ECAL を構想している。

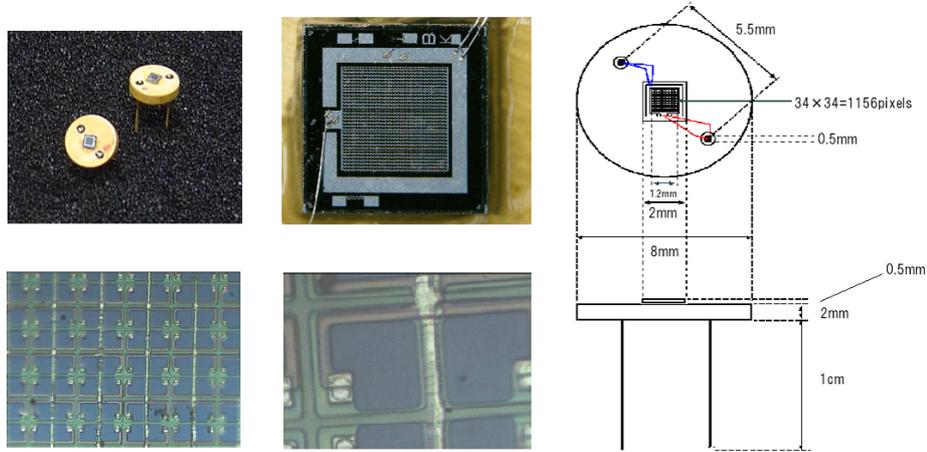


図 5.1: SiPM の全体像及びピクセルの拡大写真 [18]:有感領域の面積は $30 \times 30 \mu\text{m}^2 \times 1156$ でこれは全体の 73.35% である

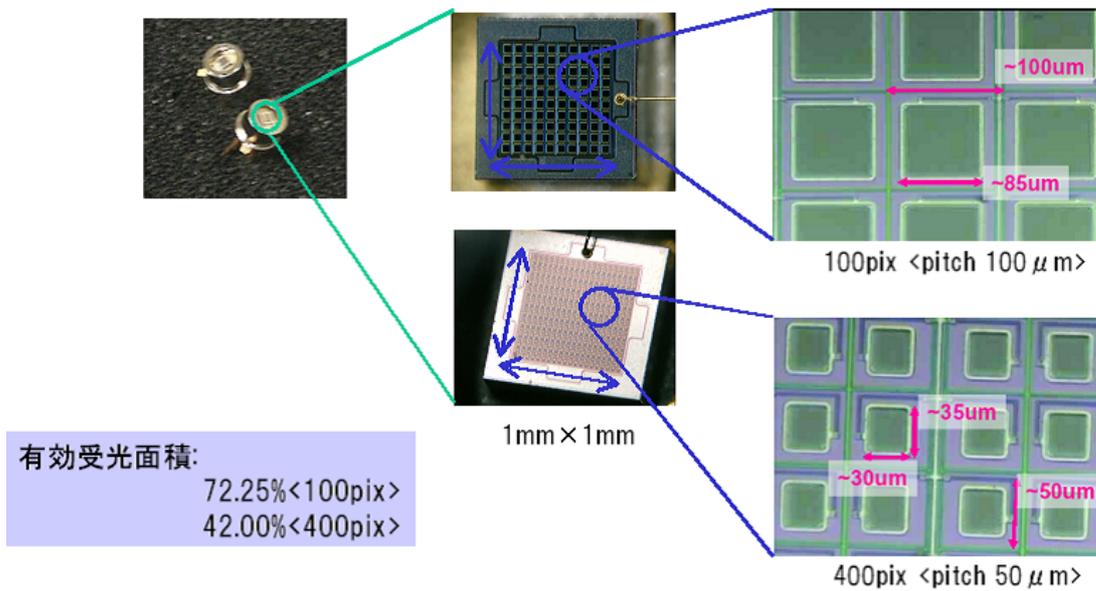


図 5.2: MPPC の全体像及びピクセルの拡大写真 [18]

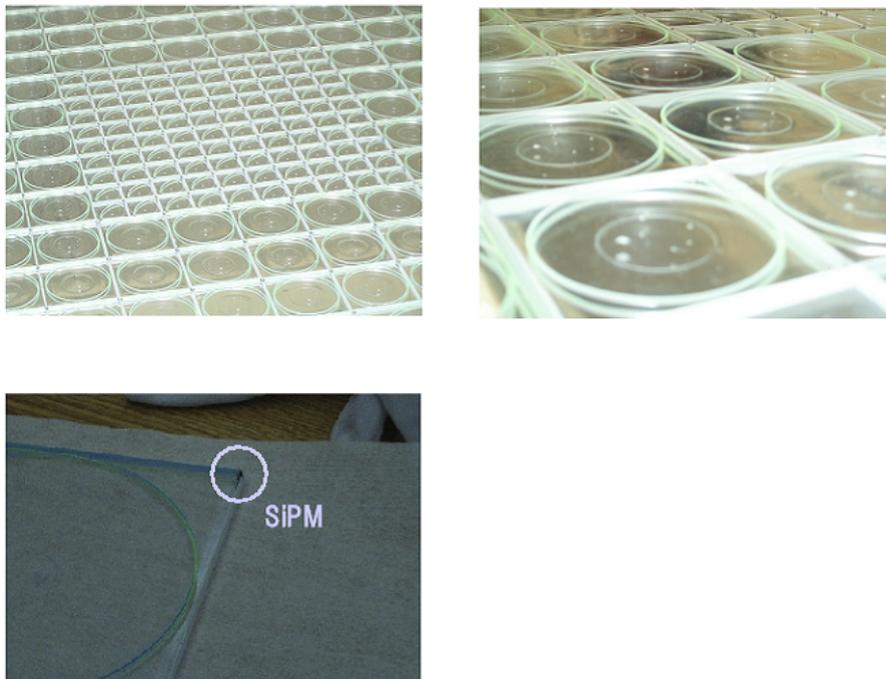


図 5.3: DESY における HCAL と SiPM

5.2.2 内部構造

SiPM 及び MPPC の内部構造についての具体的なことは分からない (特に MPPC については企業秘密となっている) が、基礎構造はこれまで述べてきたものに従う。出力に関しては MPPC はホール、SiPM については電子となっているので配線の際注意が必要である。図 5.4 に MPPC のスペックを載せる。MPPC については 100pixel、400pixel の 2 種類を頂いており動作電圧は 50V 程度と Russian SiPM と比べ低い電圧で駆動する。SiPM については詳細なスペック表というものを現在は入手していないが動作テストから 62~67V 程度であることが予測された。

| Serial | Quenching Register (k Ω) | Vb(V) | Vr(V) | Id(nA) | Type |
|------------|----------------------------------|-------|-------|--------|------|
| H100-1 | UK | UK | UK | UK | UK |
| H100-2 | UK | UK | UK | UK | UK |
| H400-1 | UK | UK | UK | UK | UK |
| H400-2 | UK | UK | UK | UK | UK |
| 1-53-1A-11 | 108 | 53 | 48.9 | 20.7 | UK |
| 1-53-1A-12 | 108 | 53 | 49.3 | 38.5 | UK |
| 1-22-2A-12 | 180 | 54 | 48.3 | 11.4 | UK |
| 1-22-2A-13 | 180 | 55 | 48.7 | 6.5 | UK |

図 5.4: MPPC スペック一覧:UK は確認不可 (Unknown) を表す

パラメータについて、Quenching Register はピクセル放電をおさえるもので時間応答を決める要因の一つとなる。Vb はブレイクダウン電圧でこれをこえると SiPM/MPPC に大きな逆電流が流れ始める、 I_d は逆電流でブレイクダウン電圧を超えていない状態にて流れる電流値をしめしノイズの大きさを示す量になる。Type は浜松ホトニクスが内部で定めている分類でその違いについては不明である。内部構造については今のところ要求として

- 2 mm 厚 Sci + 1 mm 径 Fiber にて 12 photons の光量が MIP で発生することから、この信号がちゃんとノイズ 1pixel 程度と分離できる能力が必要

となっている。カロリメータに適用することが目的なので素子そのものに対する要求として主に efficiency と Gain に優れていることが必要とされる。

本研究では主に 100pixel については 1-53-1A-12、400pixel については 1-22-2A-12、1156pixel については No12 を評価の対象としている。

5.3 実験環境

実験を行った環境については以下のように設定した。尚 LED と MPPC/SiPM の間は 10cm ほど離している。温度変化については恒温槽内の温度が一定になってから 30 分程度まって測定している。

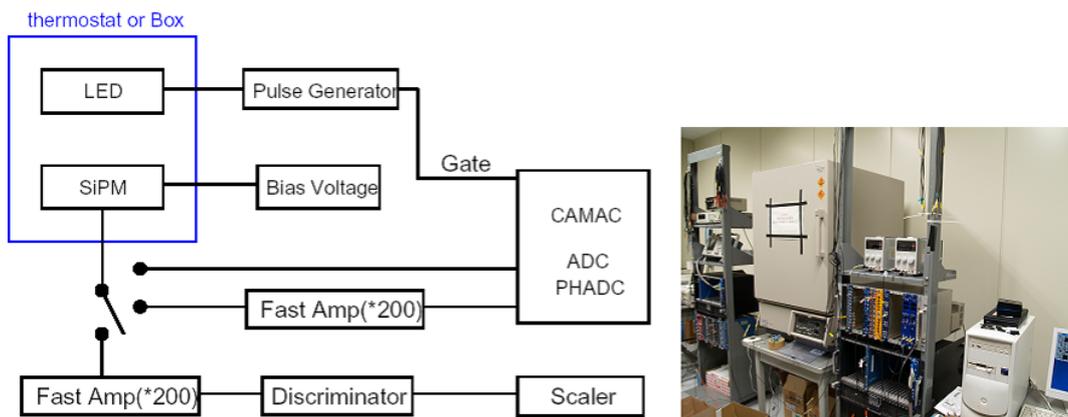


図 5.5: 実験環境の図：測定に応じて接続をかえている

- 恒温層 : ESPEC 製 LHU-112 : -20 ~20 まで変化可能
- LED : 日亜化学工業社製 NSPB500・NSPG520S : 緑色 (525nm) と青色 (470nm) を使用
- パルスジェネレーター : Hewlett Packard 社製 8110A
- 直流電源 : KENWOOD 社製 PA250-0.25A
- ADC : LeCroy 社製 2249W CAMAC ADC (1count=0.25pC の分解能)
- Fast Amplifier : ORTEC 社製 FTA820

Linearity および Efficiency の測定については暗箱をもちいて図 5.7 のように測定している。上のようにファイバーなどで 2 分割する測定系に関しては素子上部のアクリルの影響で光量が減少してしまい上手くはかれなかったのので、下のように LED 光を直接あてるようにした。尚このときの PMT は素子と同じ光量を受けるように受光面積を 1mm×1mm に限った。この測定系について詳細な位置設定を必要としないようにするため Diffuser を用いたが実際にきちんと光量の位置依存を和らげているかについては調べる必要がある。(設計図上では MPPC の位置に受光面が来るようにしている) 図 5.6 に使用した PMT の性能について載せておく今回の測定についてはこの性能表の値をそのまま使用している。

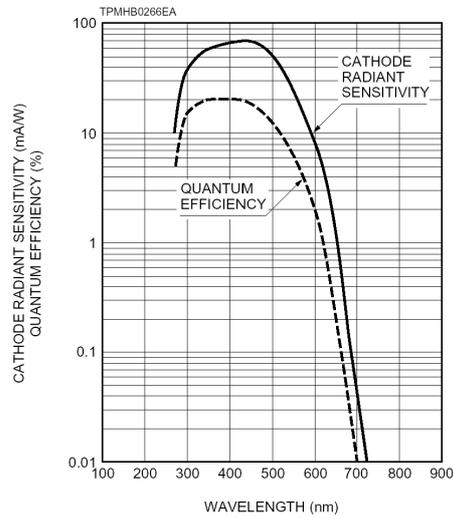


図 5.6: PMT H6568-10 の Efficiency:本研究では 525nm の LED を使っているので 10%としている

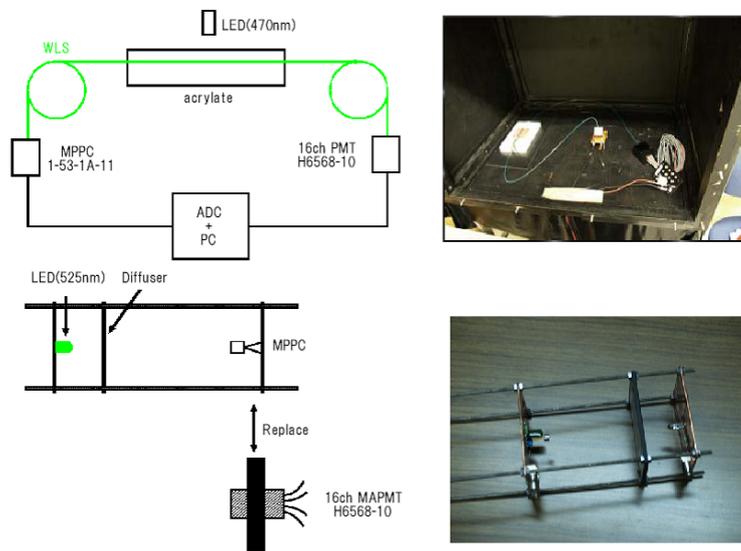


図 5.7: Linearity の測定環境

次に MPPC および SiPM については以下の回路で信号の読み出しを行っている。読み出し回路については浜松ホトニクス (株) から回路図を頂いておりこれを下に作成している。図 5.8 において電源からの Low Pass Filter と交流信号を取り出すコンデンサの組み合わせというシンプルな組み合わせである。図中のクエンチング抵抗は先程の図 5.4 のものと読みかえていただきたい。読み出し部のコンデンサの変化により信号のテールなどが大幅に変わることはなく、図中の数値のものから変更することはなかった。

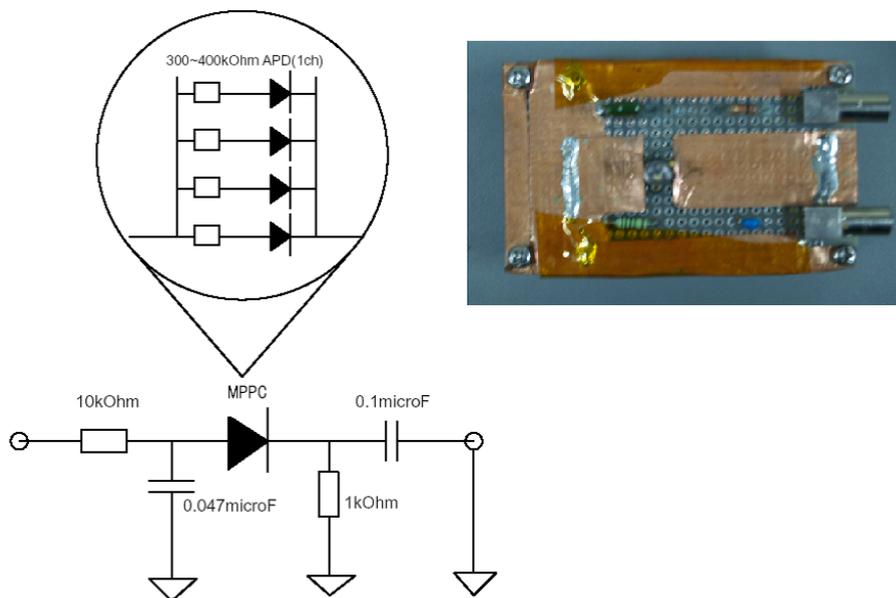


図 5.8: SiPM 及び MPPC の読み出し回路 [19]

5.4 測定結果

5.4.1 応答波形

まず応答波形について見てみる。pixel ノイズは光に対する応答と同じはずなのでノイズ波形を観測する。写真 5.10 は室温における SiPM、MPPC それぞれについてのノイズ波形であるが信号幅が 5ns~100ns(数 100ns のものもある) と非常に幅広くある、この応答速度を決める主な要因は MPPC 自身の空乏層の厚み、クエンチング抵抗があり、この写真からも分かるようにピクセルが小さいほど立下りの時間が短くなることがわかる。立ち上がりについては面積の最も小さい SiPM においては 2ns 程度であり他のものについても数 ns 程度であった。ノイズの波形ではあるがこれは LED 光に当てた際も同様である。また p.e. ピークが見えることから原理通りデジタルに信号がでていのようにみえる。

ピークがはっきり分かれていることが分かるが、SiPM・MPPC(400pixel)のものについてはピークの高さの差が均等でないことがわかる。

これについては次項で述べる。

5.4.2 放電とシグナル

前項の図 5.10 にてゲインの大きいシグナルと小さいシグナルの 2 種類が観測されている件について述べておく。SiPM および MPPC は本来 Limited Geiger Mode で動作するもので電圧にある程度依存した大きさのシグナルが出力されるはずである。しかしゲインの大きいシグナルについては後述する Gain の項の図 5.23 の 100pixel におけるものように電圧に対してほとんど変化がない。

(400pixel や 1600pixel MPPC、1156pixel SiPM についてはゲインの低いほうをグラフにプロットしている。)

これは Limited Geiger Mode の信号と異なり真の放電がピクセルの内部で発生し出力されている為である。今回の研究において 100pixel については放電のシグナルをグラフにプロットし、他のピクセルについては LGM のシグナルをグラフにプロットしている。これはこの放電の問題が 2006 年 2 月現在明らかに成ったものでそれまで 100pixel についてはこのシグナルが LGM のものだとして認識されていた為である。100pixel については初期のものを使用しており、この 100pixel が放電のとても多いものであったためこのような誤認識が生まれた。なお 2006 年 2 月現在ではこのような放電が起こりにくいモデルが浜松でテストされており、2006 年中には LGM のシグナルが正常に出力されるモデルが完成する予定である。写真 5.11,5.12 に放電と LGM のシグナルの違いを示す。100pixel のものについては LGM と放電の信号の差が 20 倍程度あった。また図 5.13 には京都大学で確認された放電と LGM のシグナルが混在したヒストグラムを示す。放電が多い MPPC を使うとこのようなヒストグラムが観測される。

図 5.14 は後述する Efficiency を図る為にとったグラフであるが、100pixel のシグナルが放電によるものであった為このグラフから Efficiency を読み取ることは出来ない。しかしサチュレーション時のピクセル数に着目すると電圧を変化させることでどの程度のピクセルが放電してしまうのかが分かる。式 4.8 の式において N_{max} の値をパラメーター化しフィットすることで放電を起こしているピクセル数を調べた。

結果は、19.7pixel@49.5V, 28.9pixel@49.8V, 88.2pixel@50.0V となった。放電ピクセル数の少ない領域では LGM のシグナルそのものの大きさも小さく(用意したアンプを経由したとしても)この 100pixel はうまく駆動していなかったというように考えられる。この結果をうけて浜松は近々放電を極力押さえた 100pixel を作成する予定である。

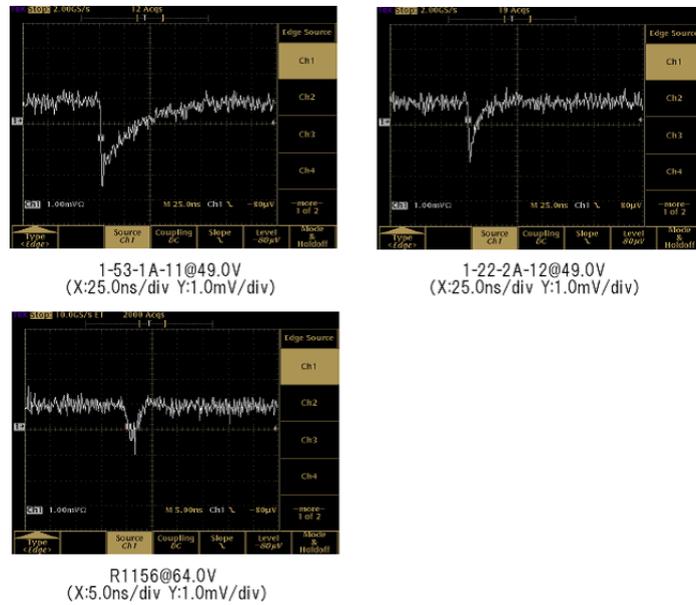


図 5.9: SiPM・MPPC のノイズ波形:ピクセルサイズの小さいものほど信号幅は小さい

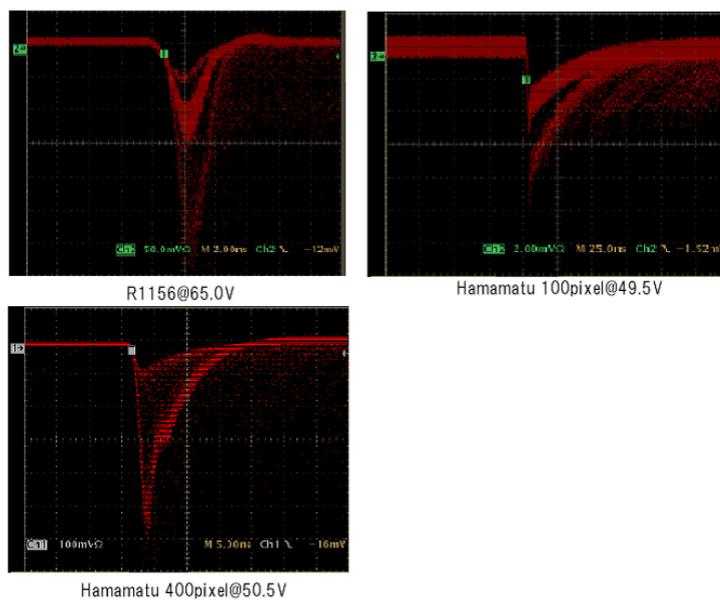


図 5.10: SiPM・MPPC のノイズ波形のストレージ:R1156 及び Hamamatu 400pixel にはアンプを使用している。

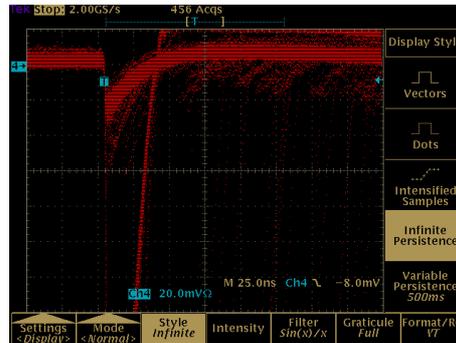


図 5.11: 100pixel における放電と LGM のシグナルの違い：100pixel@49.7V で取ったものである。放電は大きすぎてオシロスコープに納まっていない

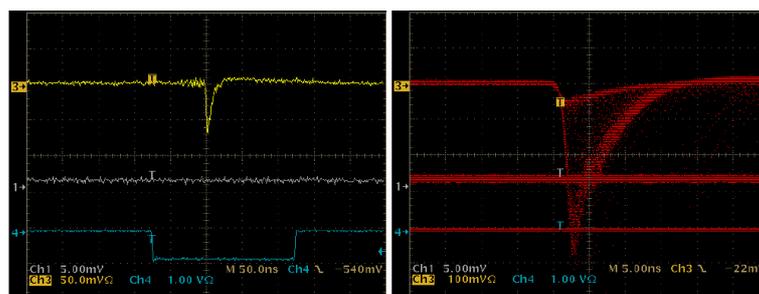


図 5.12: 放電と LGM のシグナルの違い：400pixel@50V の MPPC についてのもの左は微小光量入射時のシグナル、右はノイズについて信号をストレージしたものである。ノイズについては放電が多く存在し LGM のシグナルと混ざると光量の測定が厳しくなる。最も新しい MPPC 400pixel では改善されている。

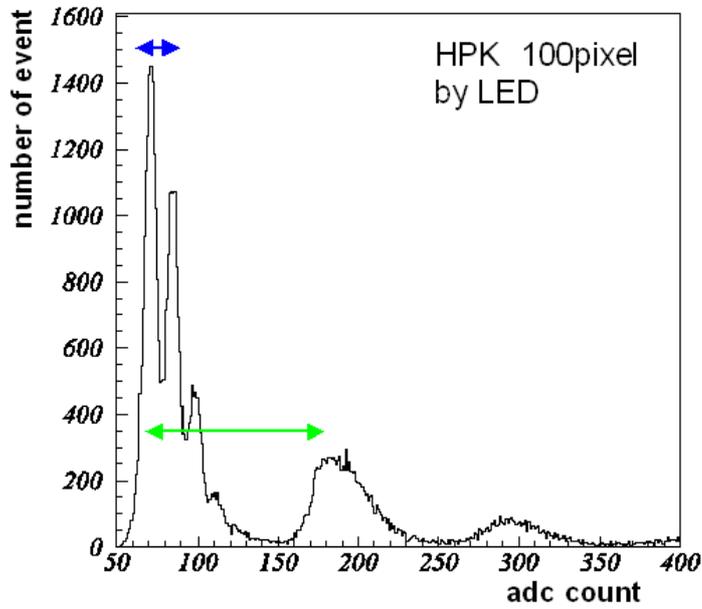


図 5.13: 二種類のゲインによる光量分布の様子 (京都大学 信原氏によるもの) : 緑の矢印で表される幅が放電によるもの。type1 は放電が非常に起こりやすい

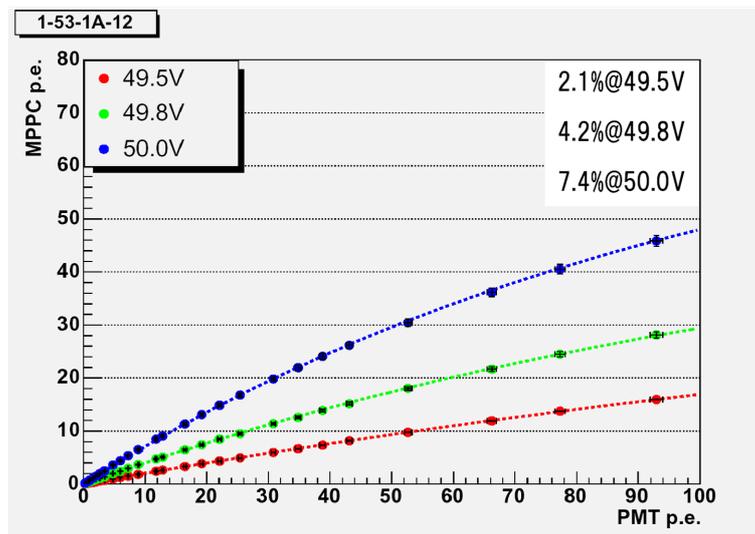


図 5.14: MPPC 100pixel の放電ピクセル数のバイアスに伴う変化

5.4.3 Noise Rate

ノイズレートについて見てみる。ノイズレートは以下の条件で測定している。

- バイアス：測定結果のグラフを参照
- 測定温度：-20 ~ 20 : 10 刻みで測定 (標柱の M は minus を表す)
- ディスクリミネーターの出力ゲート：25ns 程度

尚結果の各グラフにおける縦軸は全て 10^6 を単位としている。グラフにおける表記が小さいのでここで述べておく。

個体差

測定結果のグラフを次から載せていく。まず SiPM について個体差に着目してとったものを図 5.15 に載せる。測定環境としては室温のもとでバイアスを変えながあ測定している。個体差については測定範囲の最大である 67.5V において $1.5 \sim 4.2 \times 10^6 \text{ Hz}$ となっている。また一つの基準として、1MHz 以下という値 (この値では $1\mu\text{s}$ に一つノイズが混入する) を掲げているが、これについてはほぼ全ての SiPM が 65V 以下で満たしている。またこのノイズレートの個体差はおそらくガイガーモードに突入する電圧の個体差の表れであると思われる。(シリアル No25 はガイガーモードに突入する電圧が極端に高いと思われる。)

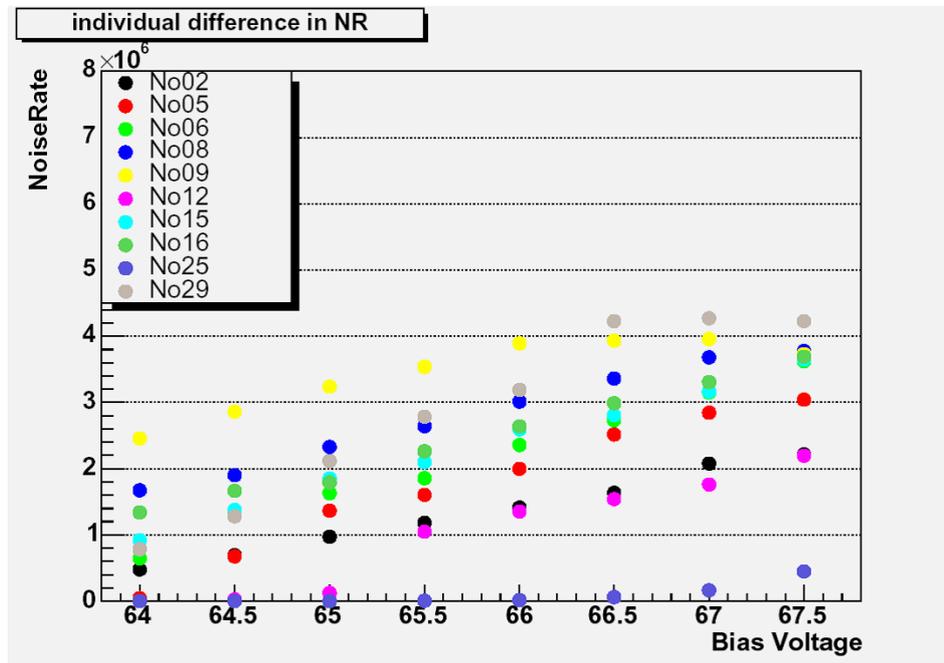


図 5.15: 各 SiPM の室温での NR: ディスクリミネーターの threshold は 20mV(最小値) に設定

次に MPPC の個体差について図 5.16 に載せる。SiPM と比較してノイズレートが低いことが分かる。ただし SiPM とことなりある電圧から急にノイズレートが伸びていることが分かる。また 400pixel とくらべて 100pixel のノイズレートの増え方が急であることがわかる。これにより p.e.peak が見える程度の光に対する光量測定ができるバイアス範囲が 400pixel のほうが広いことが予測される。後ろでゲインについて述べるが実際 400pixel のほうが 100pixel にくらべ同一小光量時における p.e.peak が観測できる範囲が広い。測定したバイアス範囲についてはどちらも LED の光に対して信号 (ノイズと区別できる程度。高すぎるとノイズが出っ放しでどれが信号かわからない) を出す範囲を測定している。

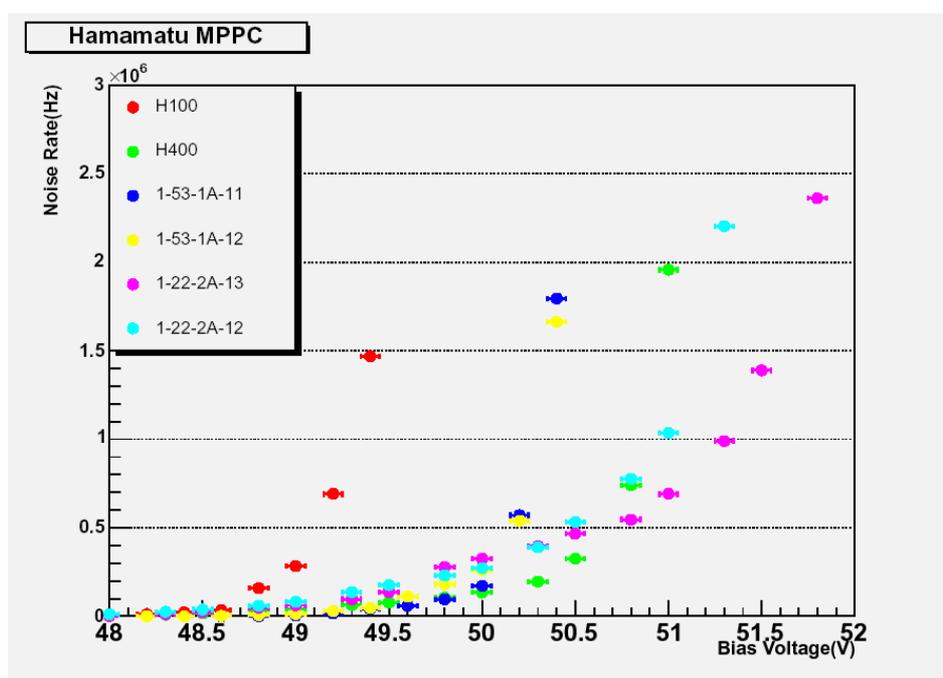


図 5.16: 各 MPPC の室温での NR:400pixel は 100pixel に比べノイズレートが緩やかに増加している

threshold による変化

トリガーといった信号測定以外の用途の場合 threshold をある程度の大きさに設定して用いる訳だがこの用途に使用する際のノイズの影響を考慮するため室温で threshold を変化させてノイズレートを測定した。結果を図 5.17, 5.18 に載せる。ここで SiPM・MPPC 400pixel において 1p.e. としたのは応答波形の項における 2p.e. 目の波形である (1p.e. 目は正常でないと判断)。これは $PH_{3p.e.} = 2 \times PH_{2p.e.}$ (PH=pulse high を指す) となっていたことからそのように判断した。結果について、前述の SiPM の個体差におけるグラフのように minimum threshold については直線的に伸びているが 0.5p.e.、1.5p.e. については指数関数的に増加している。

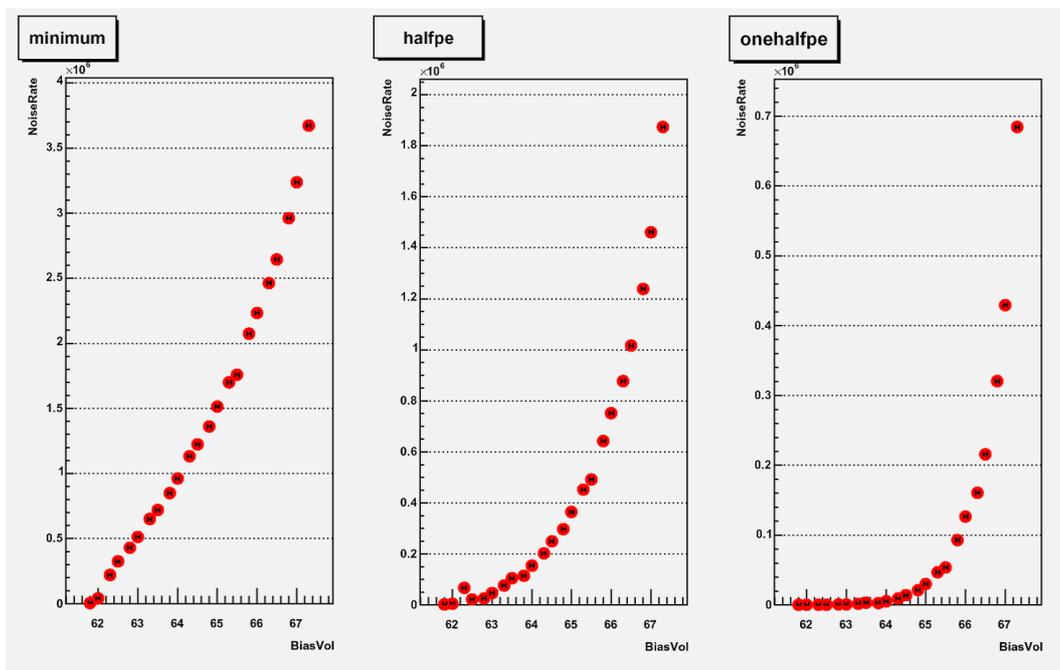
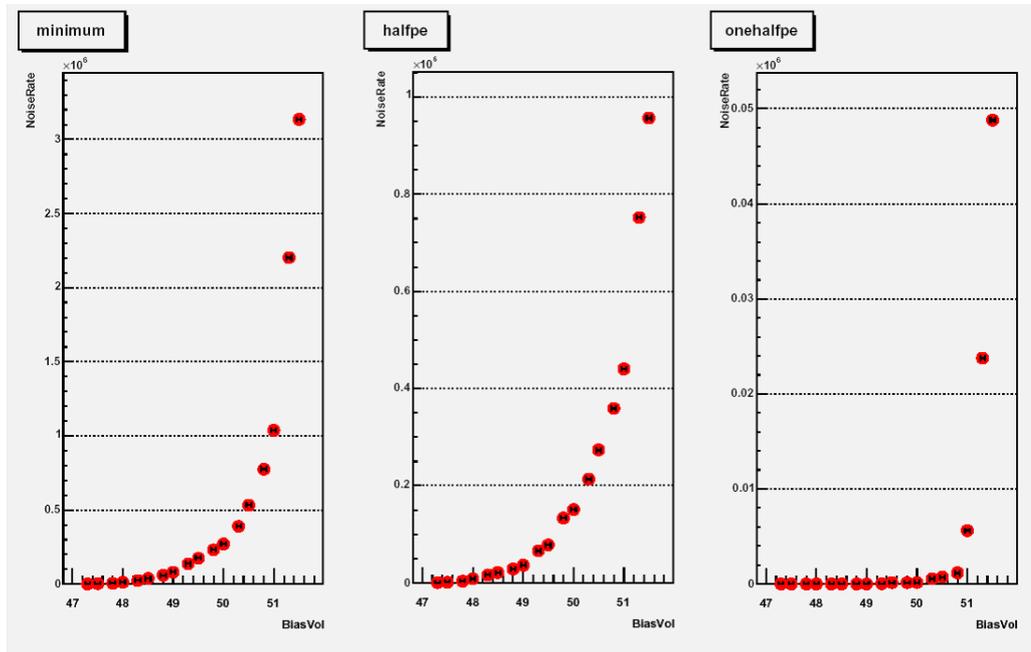
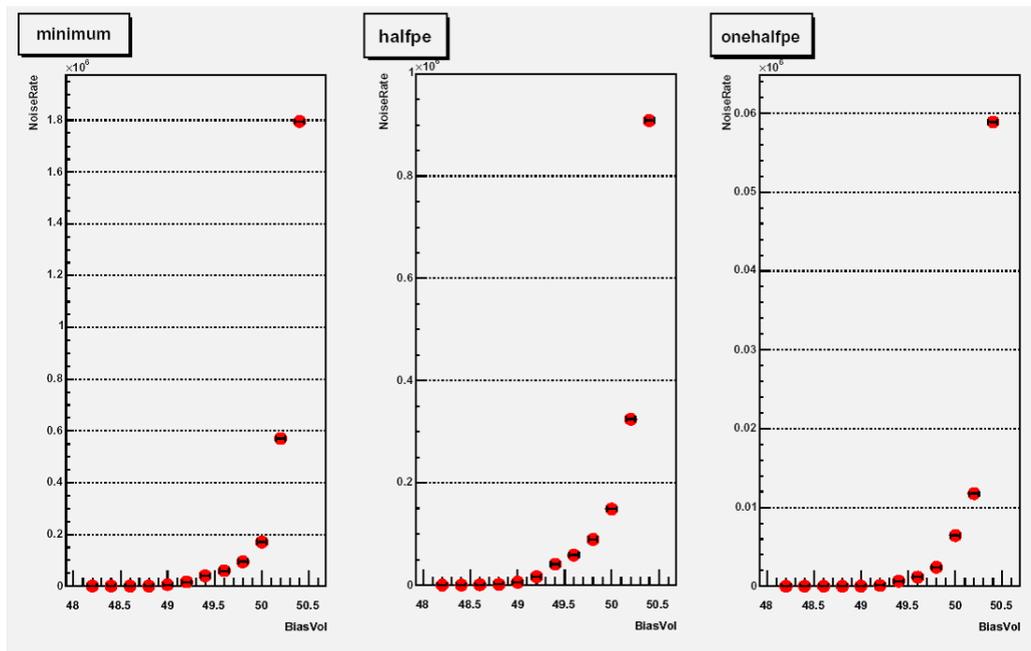


図 5.17: SiPM の Threshold による NR の変化



MPPC 400pixel(1-22-2A-12)



MPPC 100pixel(1-53-1A-11)

図 5.18: MPPC の Threshold による NR の変化

温度による変化

先程は室温のもとで調べてきたが温度変化によってどのように変化するのかを次に調べた。図 5.19,5.20 にその結果を示す。半導体においてノイズの主な要因は熱的なものであり低温ほどノイズレートは少ないはずであるがピクセルサイズが大きくなるにつれ、低温におけるノイズレートが高温のものより大きくなっている。これはガイガーモードの始まる電圧 V_0 が低温ほど低く同一バイアスにおいて $(V - V_0)$ が低温ほど大きくなり、ノイズレートがこのパラメーターに依存しているためこうなったと思われる(ノイズレートは $V - V_0$ が大きくなるほど大きくなる)。 V_0 については次節で調べている。

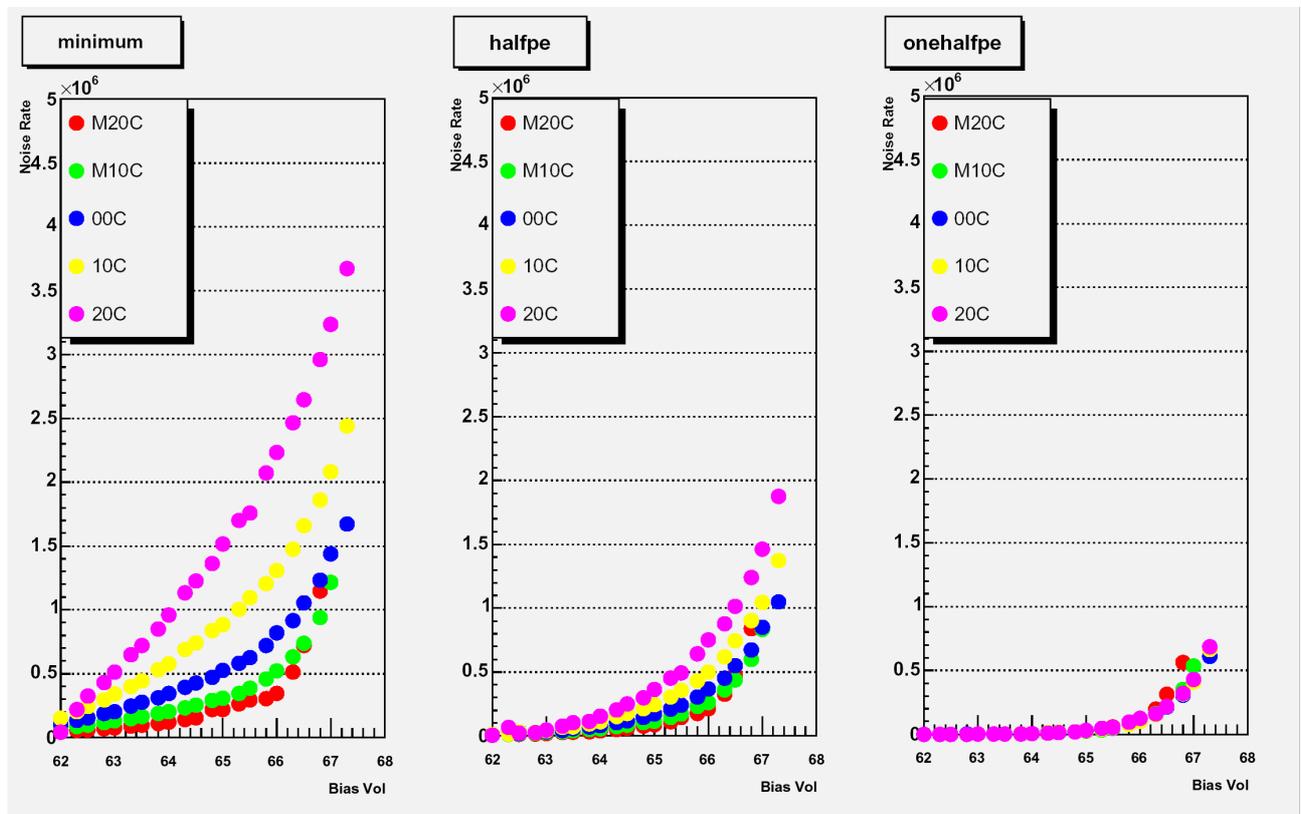
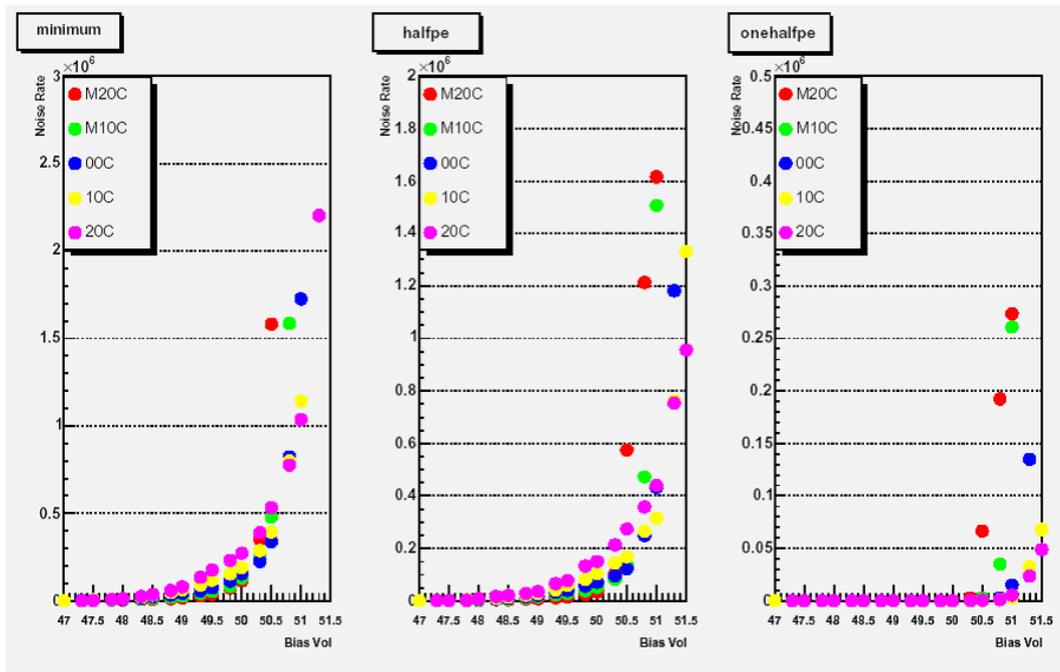
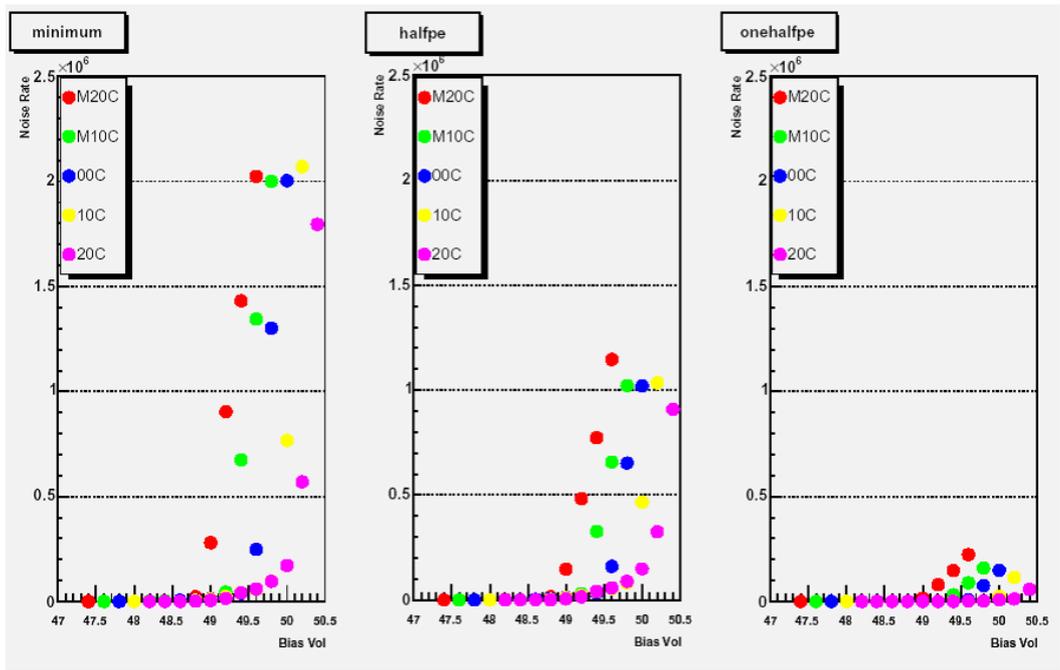


図 5.19: SiPM の温度変化に伴う NR の変化



Hamamatu 400pixel(1-22-2A-12)



Hamamatu 100pixel(1-53-1A-11)

図 5.20: MPPC の温度変化に伴う NR の変化

5.4.4 Gain

ゲインはピクセルの容量とガイガーモードの開始電圧とバイアスの差で定まる。これを 1156pixel および 400pixel そして 100pixel について測定した。測定環境は、

- LED に与える電圧：2.8 ~ 3.2V × 10ns
- ゲート入力：100 ~ 500ns 程度 (ピクセルサイズによって信号のテールが変わる為)

である。尚この項について 100pixel のゲインは放電シグナルの大きさをもとに導出している。

バイアスと Gain

バイアスとゲインについてバイアスを大きくするとゲインは第 4 章で述べたように空乏層 (高電界領域) が広がることから大きくなるはずである。光量分布から見たこの様子を図 5.21 に示す。R1156 についてはアンプを入れており顕著に p.e.peak 間の広がりがわかる。

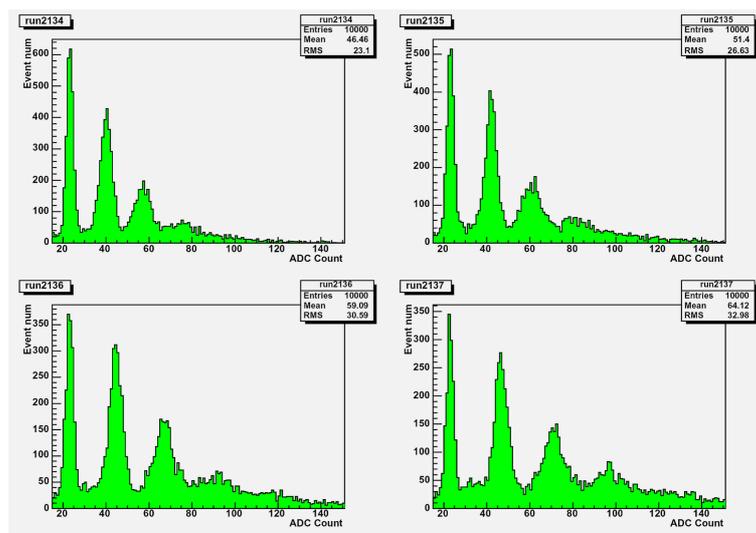


図 5.21: バイアスとゲインの変化の様子:63.0~63.6V でバイアスを変化。バイアスを上げるにしたがってピーク間隔が広がるのがわかる。

温度変化

温度変化によるゲインの変化について見てみる。図 5.22,5.23 にその結果を載せる。結果のグラフにおいてバイアスの変化に対して各温度の傾きはさほど変わらない。これはゲインの変化が $\frac{C_{pixel}}{e}$ のようにピクセルの接合容量によっているためである。ゲインは 100pixel が $1.4 \sim 1.6 \times 10^7$ 、400pixel が $0.07 \sim 0.35 \times 10^6$ 、1156pixel が $0.05 \sim 0.4 \times 10^6$ と 100pixel が圧倒的に高いゲインを持っている。ゲインから求められる接合容

量は $0.3\text{pF}@100\text{pixel}$, $0.02\text{pF}@400\text{pixel}$, $0.01\text{pF}@1156\text{pixel}$ となった。接合容量は不純物濃度、誘電率など物質特有の要素、またピクセルの大きさなどの幾何的要素で決まるのでこれをかえることでもっと大きいゲインを持つ検出器が出来るとおもわれる。(濃度はノイズに影響をあたえる原因のひとつになることも事実である。[17]) また得た結果において $Gain = C_{pix}(V - V_o)/e$ でフィッティングを行い、ガイガーモードの始まる電圧 V_o を求め、グラフに添えている。 V_o はこれより低温ほど低いという結果になり NoiseRate における議論が成立する。図 5.24、5.25、5.26 に V_o を考慮に入れた Noise Rate のグラフを載せるこれを見ると高温ほど Noise Rate が高くなること分かる。

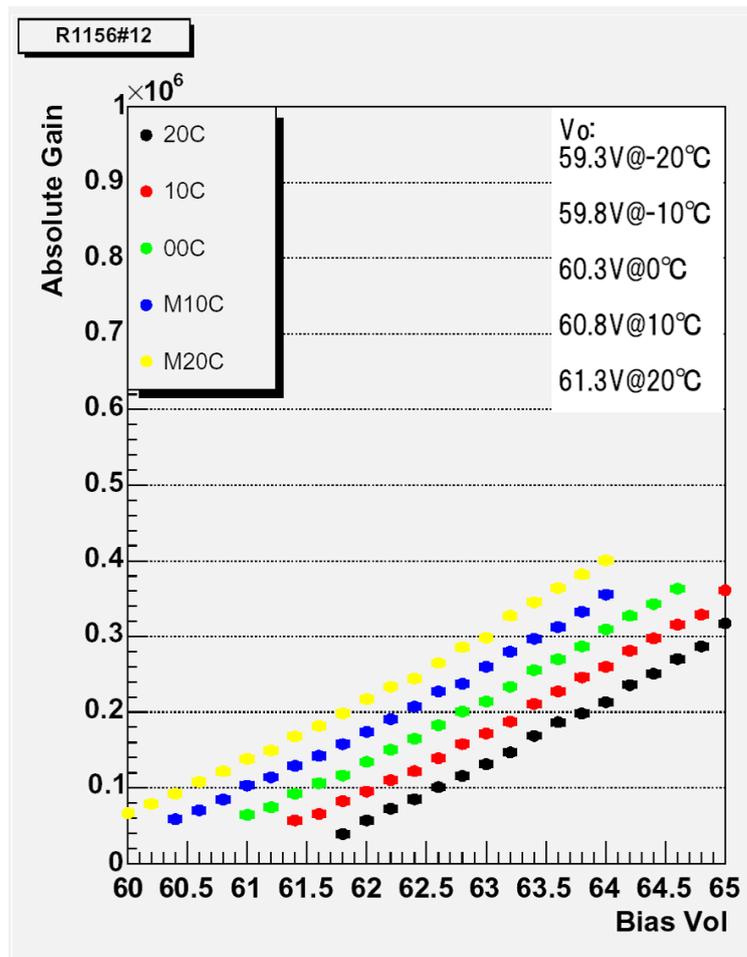


図 5.22: SiPM の温度による Gain の変化：同一バイアスにおいて低温ほど高いゲインとなる

Noise Rate と Gain

これまではバイアスとの関係性をみてきたが、光検出器においては低ノイズ・高ゲインであることが望ましい。そこでノイズレートとゲインの関係性に注目してみる。図 5.27、5.28 にその結果を載せる。結果より高温ほどノイズ

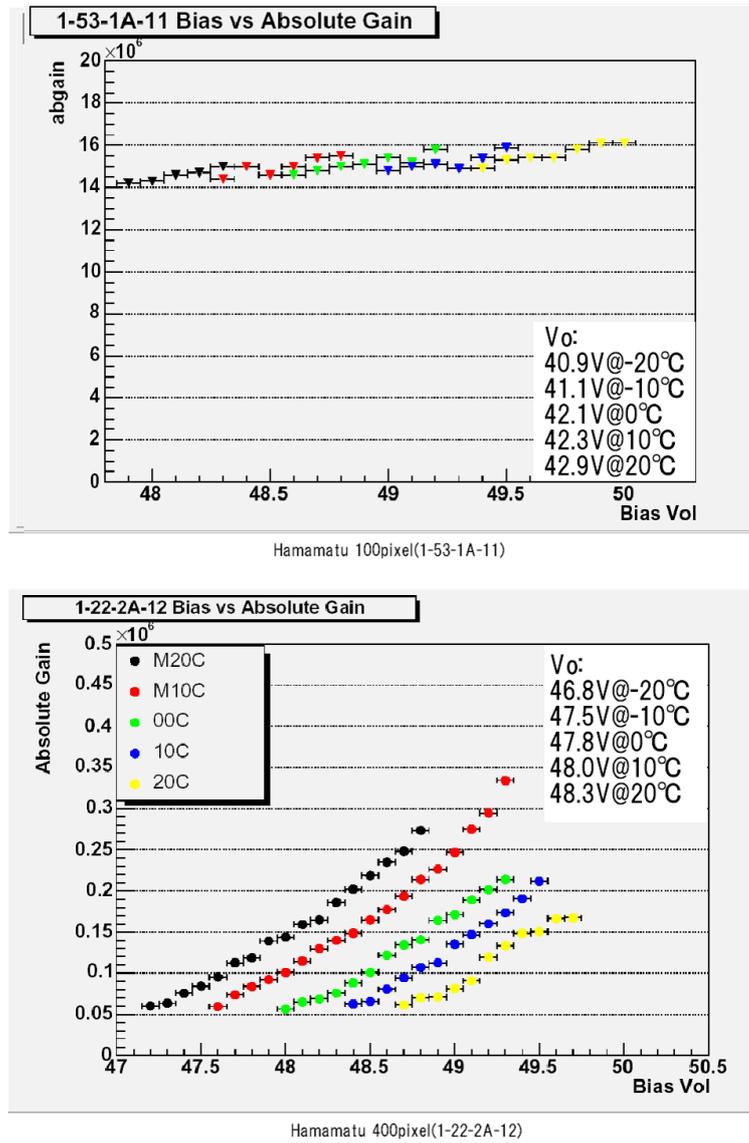


図 5.23: MPPC の温度による Gain の変化：同一バイアスにおいて低温ほど高いゲインとなる

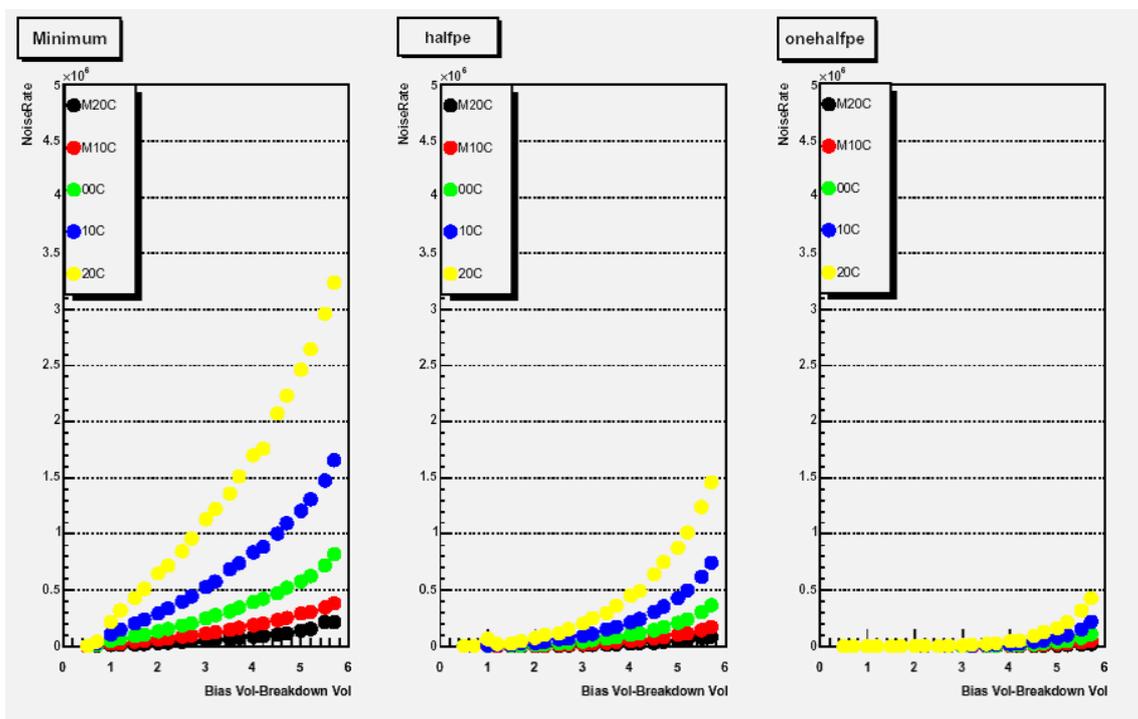


図 5.24: SiPM の V_0 を考慮に入れたノイズレート:横軸は $V - V_0$ としている

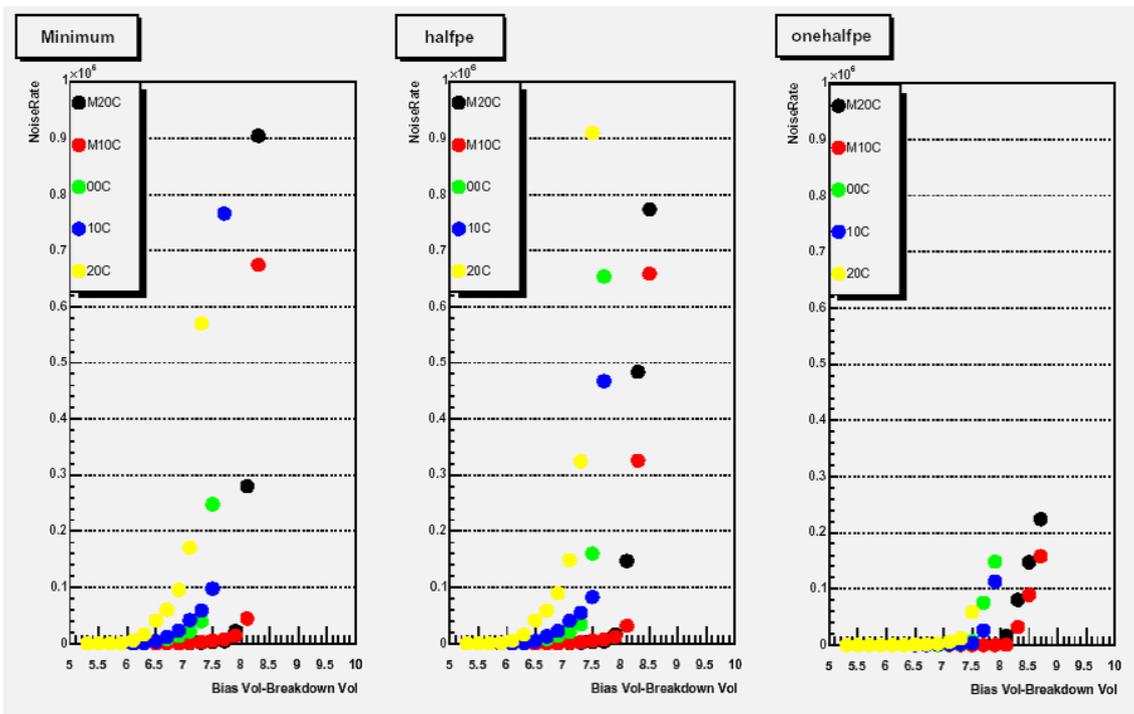


図 5.25: MPPC 100pixel の V_0 を考慮に入れたノイズレート

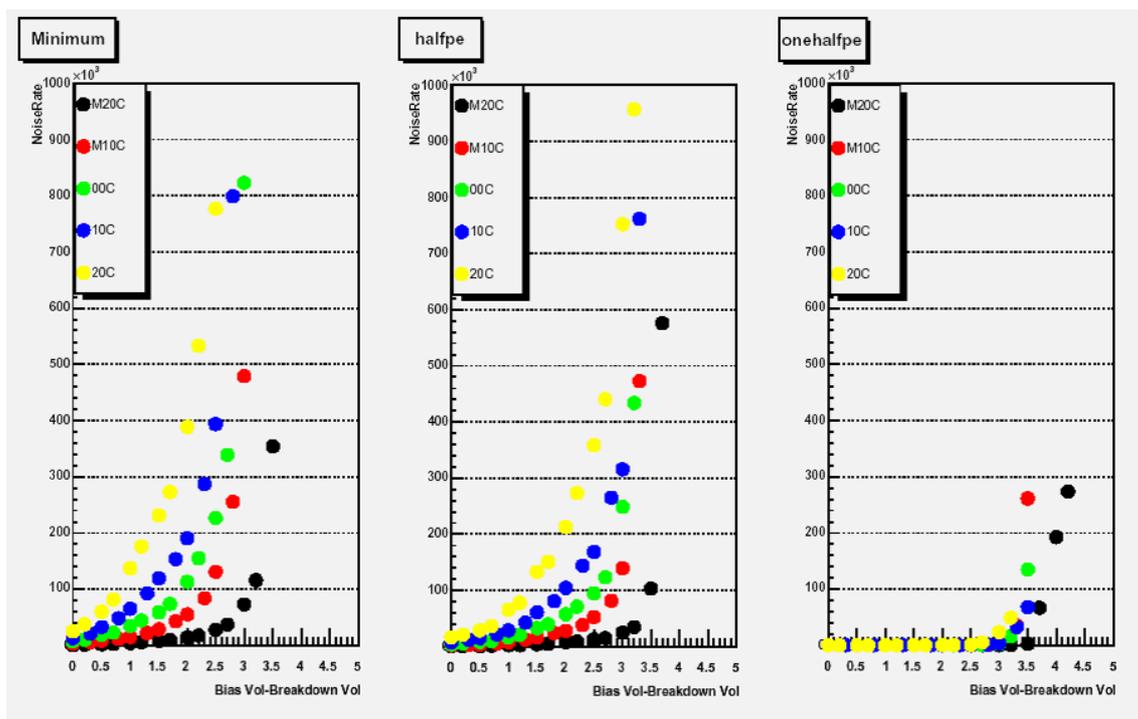


図 5.26: MPPC 400pixel の V_0 を考慮に入れたノイズレート

レートの上昇によるゲインの上昇が小さいことが分かる。今後の各シリアルに対してこのようなグラフを作ることによって低ノイズ、高ゲインの検出器にどれが最も近いかを知ることが出来る。

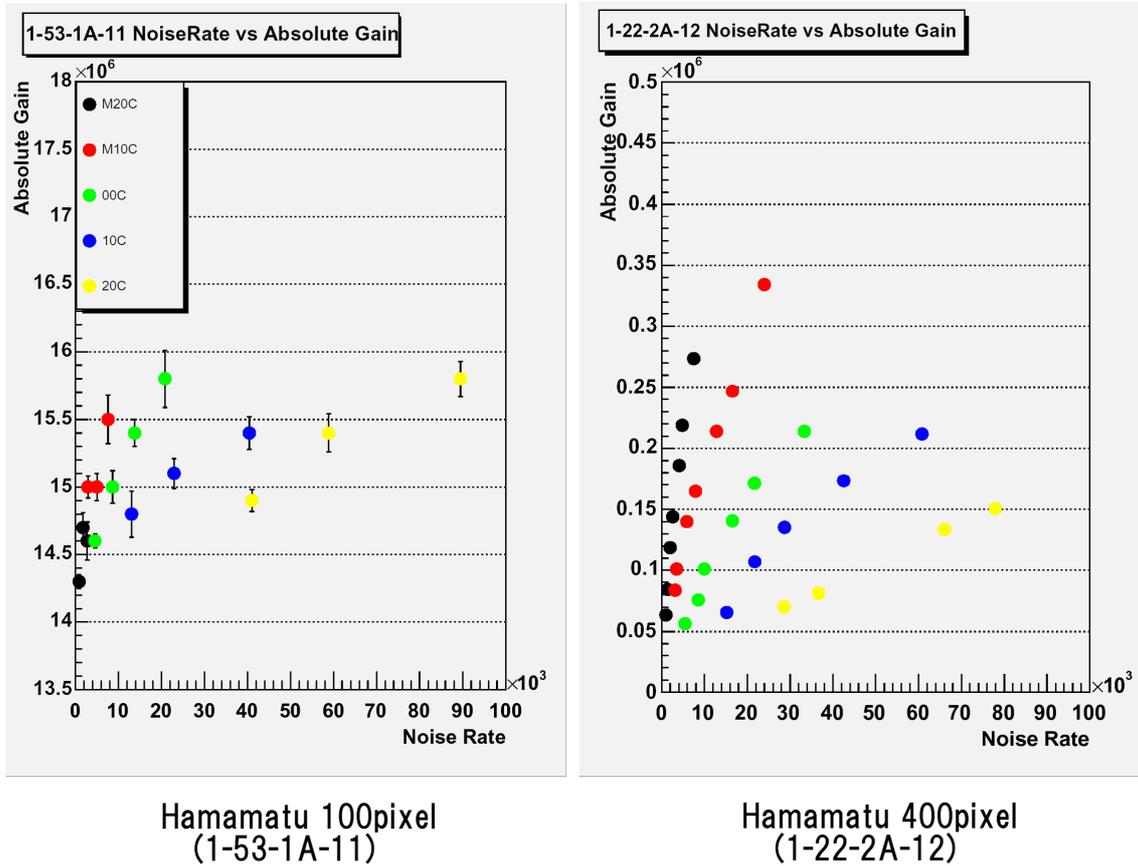


図 5.27: MPPC のノイズレートと Gain の関係:低温ほどノイズレートの増加に伴うゲインの増加が大きくなる

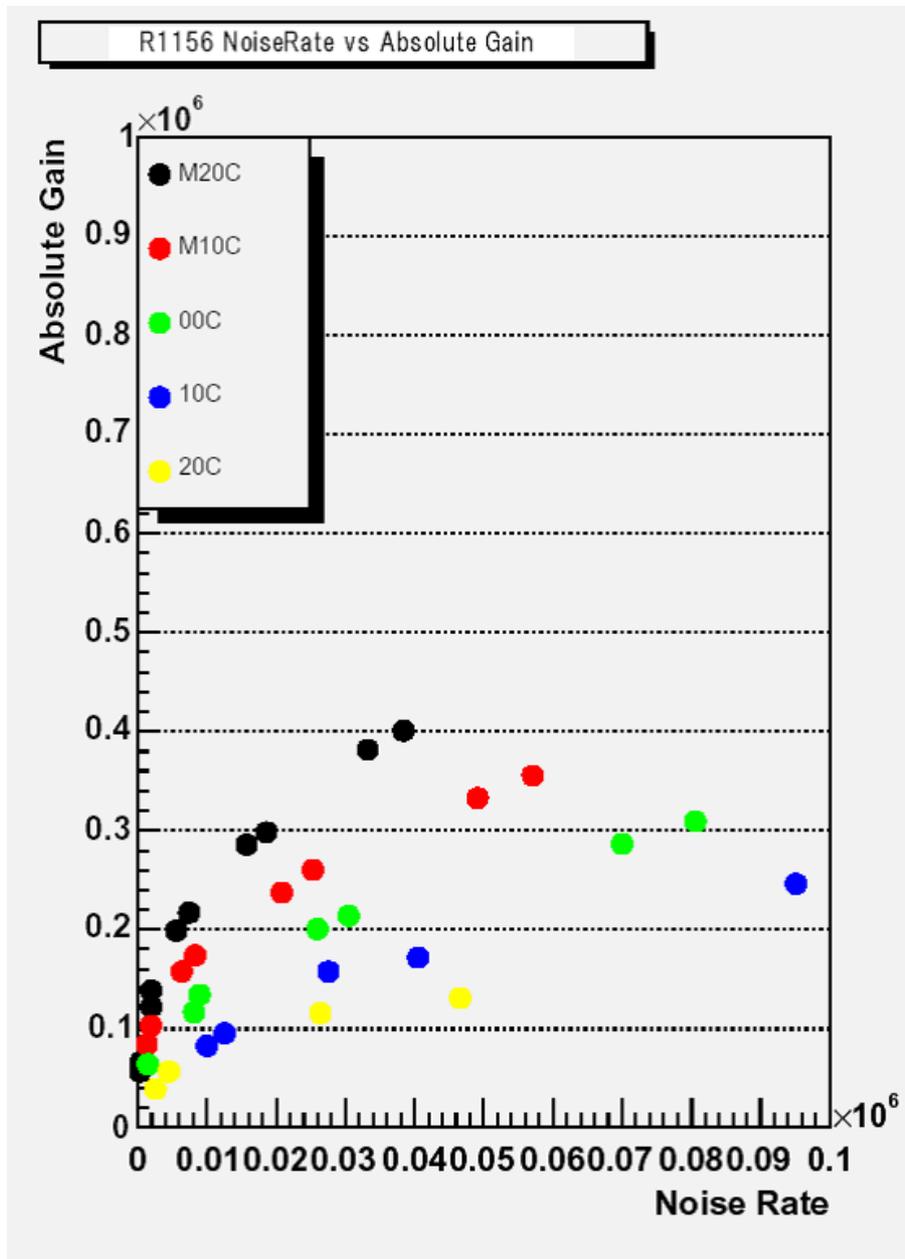


図 5.28: SiPM のノイズレートと Gain の関係:低温ほどノイズレートの増加に伴うゲインの増加が大きくなる

5.4.5 Linearity と Efficiency

検出器の性能を示すパラメータである Linearity、Efficiency についてみる。

バイアスと Efficiency および Linearity

エフィシェンシについては式 4.7 に記すように LGM シグナルの発生する確率が関係しておりもしこれがバイアスに関係するものであればバイアスを変化させた場合 Efficiency が変化するはずである。これを調べる為に実験環境の節で述べた環境のもと測定を行った。その結果を図 5.29, 5.30 に載せる。このグラフのフィッティングは式 4.8 で行っているが、400pixel や 1156pixel のものにおいて N_{max} が本来なら 400 や 1156 に成らなければならないが結果はもっと大きくなってしまふ。これは光量が大きい域ではクロストークや放電の影響が大きくなってしまい本来よりも多くの光量を検出してしまふ為であると予想される。少光領域では式 4.8 は $N_{pix} = \epsilon N_{photon}$ と近似でき N_{max} に依存しない為このフィッティングの結果をそのまま用いている。

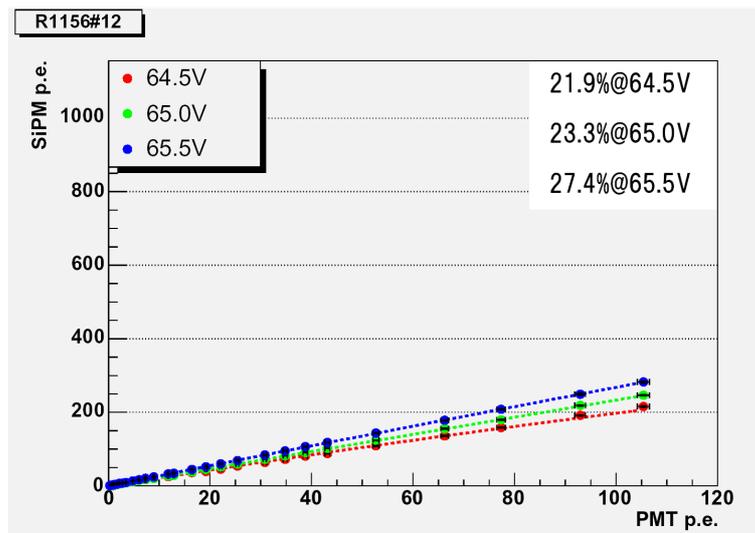


図 5.29: SiPM の Linearity と Efficiency の様子

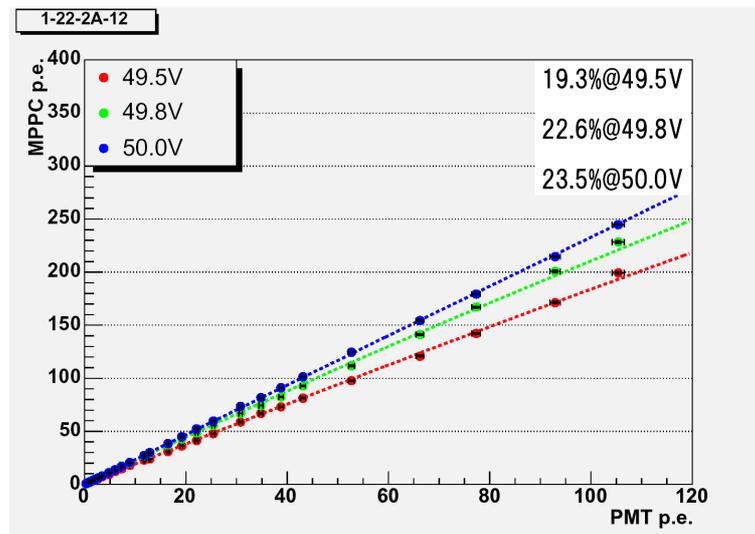


図 5.30: MPPC 400pixel の Linearity と Efficiency の様子

5.4.6 2006 年 1 月現在における MPPC の開発の進捗

MPPC は 2006 年 1 月までに二度改良されており、もっとも最近のものでは 2006 年 1 月に納入された 400pixel 及び 1600pixel のものがある。これらについて室温 (20) におけるゲインおよびノイズレートを測定したのでここで述べておく。新型 MPPC のスペックについて表 5.31 に示す。今回は 400pixel については 311-32A-002-6、1600pixel については 311-31A-002-1 を使用した。

ピクセルの写真について写真 5.32 に示す。有効受光面積は 400pixel については 64% と以前の 400pixel の 42.25% と比べて大きくなっている。1600pixel については 31.4% と低い。

| Serial Number | Quenching Register (k Ω) | Vb(V) | Vr(V) | Id(nA) | Type | pixel |
|----------------|----------------------------------|-------|-------|--------|------|------------------------|
| 311-31A-002-1 | 204 | 74 | 68.4 | 1.2 | UK | 1600 in 1 \times 1mm |
| 311-31A-002-2 | 204 | 74 | 68.5 | 1.8 | UK | 1600 in 1 \times 1mm |
| 311-31A-002-3 | 204 | 74 | 68.5 | 2 | UK | 1600 in 1 \times 1mm |
| 311-32A-002-6 | 163 | 73 | 68.2 | 15 | UK | 400 in 1 \times 1mm |
| 311-32A-002-9 | 163 | 73 | 68.1 | 13 | UK | 400 in 1 \times 1mm |
| 311-32A-002-10 | 163 | 73 | 68.1 | 19 | UK | 400 in 1 \times 1mm |

図 5.31: 2006 年 1 月に届いた MPPC のスペック：逆電流は以前のものと比べると小さくなっている

応答波形

室温におけるノイズの様子を写真 5.33、5.34 に示す。400pixel については以前より問題となっていた 2 種類のゲインの波形がなくなっており p.e. が綺麗に分解されている様子が分かる。しかし 1600pixel についてはバイアスが 71V 程度になると 2 種類のゲインの p.e. ノイズが見られる。実際のデータ測定に際してはこのバイアスにおい

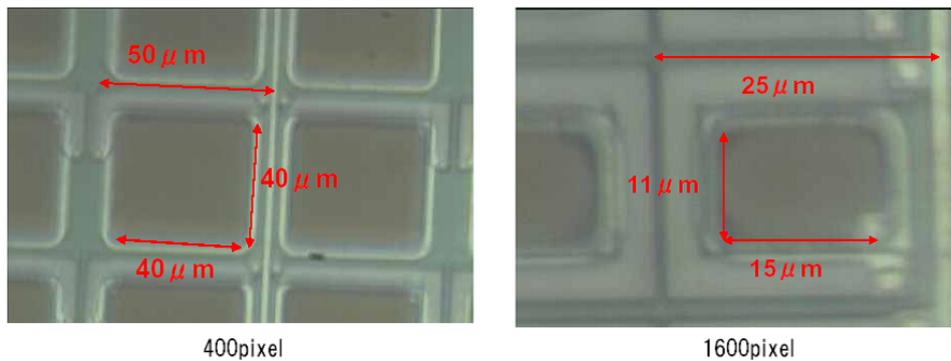


図 5.32: 2006 年 1 月に届いた MPPC のピクセルの写真 (新潟大学提供) : 400pixel は 64%,1600pixel は 31%の有効受光面積である

てはノイズが多い為測定はしていないが、バイアスが高くなることで 2 種類のゲインが発生する何らかのメカニズムが起こるとこのことから考えられる。また 1600pix についてはシグナルのほかに方形波が混入している (写真における横に伸びた線がそれにあたる) が観測されるがこれはノイズが連続して放出された為シグナルが連結したのではないかと思われる。

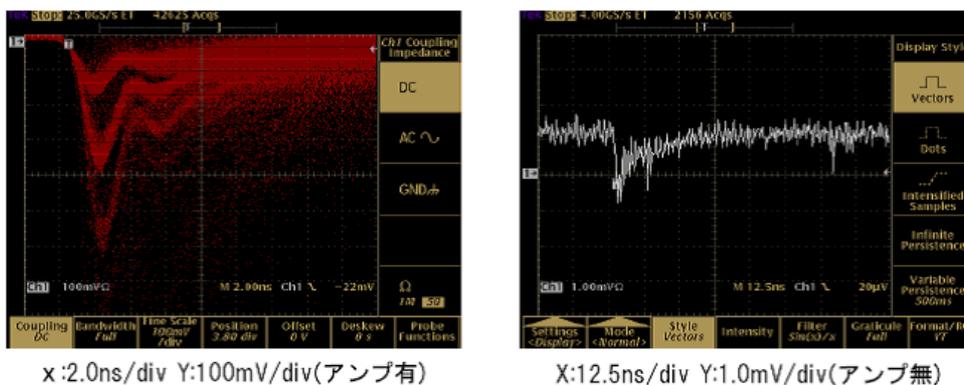


図 5.33: 2006 年 1 月に届いた 400pixel MPPC のノイズシグナル (@69.4V) : 以前のような 2Gain は見られない

p.e. 観測

p.e. がどの程度観測できるか LED で光を照射してその光量分布を見た。条件については、

- 温度 : 室温 (20)
- バイアス : 69.2V(1600pixel) 68.0V(400pixel)
- ゲート入力 : 40ns(1600pixel) 50ns(400pixel)

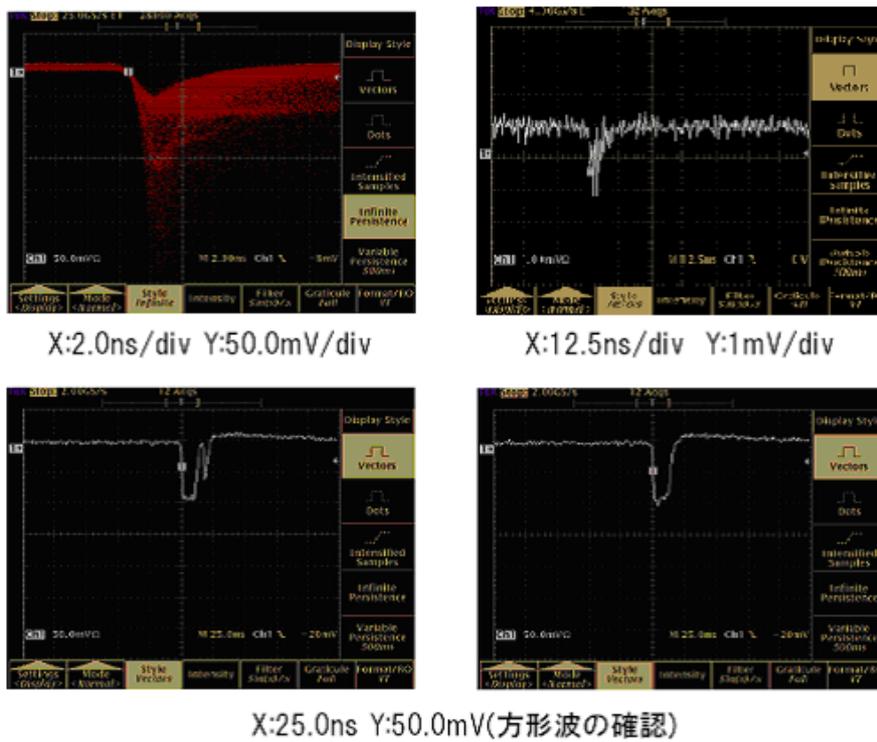


図 5.34: 2006 年 1 月に届いた 1600pixel MPPC のノイズシグナル (@70.0V) : 下の 2 つは観測された方形波

- LED 印加電圧：3.25V × 10ns(1600pixel) 3.20V × 10ns(400pixel)

で行っている。図 5.35 にその結果を示す。分布を見ても分かるように p.e. が観測できる程度である。p.e. の見え方はゲート入力のタイミングや長さによるが大きくは変化しない。

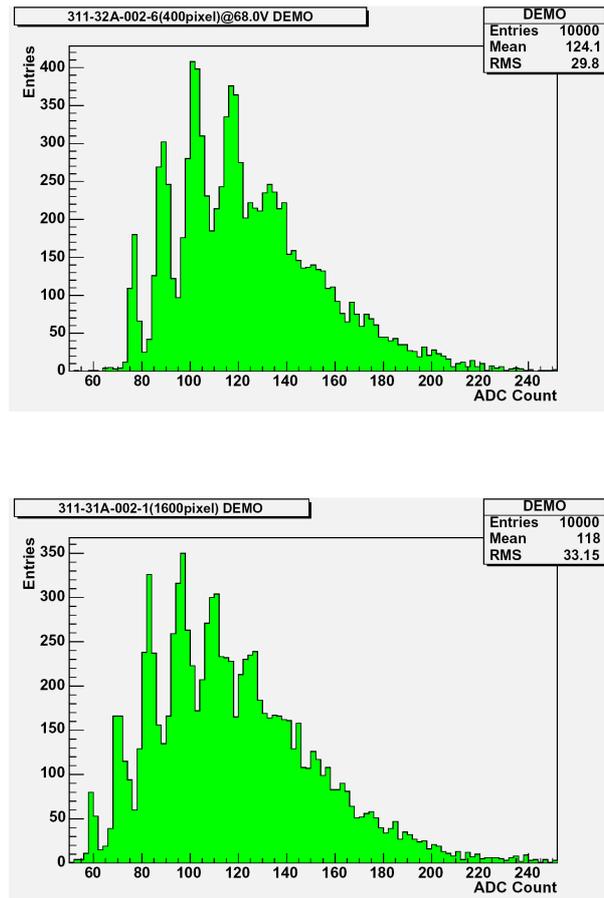


図 5.35: 新型 MPPC の p.e.peak 検出の様子：400pixel,1600pixel 共に 5~6p.e. 程度まで検出できる

Noise Rate

室温の下でのノイズレートを測定した。結果を図 5.36 に示す。前節で示した結果と比べると 400pixel についてはレートが高い。ただし前節の測定において 400pixel は低いゲインのノイズが threshold を超えていない可能性が高く単純な比較は出来ない。また今回測定したバイアス範囲は放電領域を含んでいることが浜松ホトニクスから報告されており、これより放電領域に突入することでノイズレートが急激に増加することが分かる。以前の MPPC/SiPM についても同様のことが言えると考えられ、Gain の測定が出来たバイアス領域がノイズレートの急激に伸びる前であったことも説明がつく。1600pixel については Russian SiPM と比べるとノイズレートはやや大きくバイアスに対して増加する割合も大きい。

(Russian SiPM では 5 V の変動に対して $\sim 4 \times 10^6$ の変化があるが MPPC 1600pixel については 2.5V の変動に対して $\sim 4 \times 10^6$ の変動が見られる。)

Gain

次に室温 (20) の下での Gain を測定した。測定としては LED の微小光量についての光量分布における p.e.peak から計算して出している。結果を図 5.37 に示す。ゲインの大きさとしては 400pixel については旧 400pixel 程度であるがノイズレートが以前のものよりも大きくなっている為低ノイズ・高ゲインというわけではないようである。1600pixel については SiPM と比べるとやや低いゲインであるがノイズレートに伴う変化としては SiPM と比べ低ノイズレートである。また結果にしたがって各ピクセルの容量およびガイガーモードの開始電圧を求めてみると、室温下では、表 5.1 に示すような値が求まる。ピクセル面積が単純計算では 1/4 になっており、容量も 1/4 になっていることが分かる。また p.e. が観測できるバイアス範囲については 1600pixel のほうが広いという結果になっており電圧の高精度制御を要求しないという意味ではピクセルサイズの小さいものの方が扱いやすいといえる。

| ピクセル数 (ピッチ) | ゲイン | ガイガーモード開始電圧 | ピクセルの容量 |
|-----------------------|--------------------------------------------------|-------------|---------|
| 400pixel(50 μ m) | $0.16 \sim 0.44 \times 10^6$ (68.2 \sim 69.2V) | 67.7V | 0.04pF |
| 1600pixel(25 μ m) | $0.05 \sim 0.17 \times 10^6$ (68.6 \sim 70.4V) | 67.2V | 0.01pF |

表 5.1: 新型 MPPC の室温下におけるゲインより求まるパラメーター

以上のようにまだ基本的な測定のみしか行っていないが以前の欠点を埋め合わせているという意味では新型の MPPC は以前のものと比べよくなったということが出来る。また 1600pixel のサンプルを提供していただいたことで日本において Russian SiPM と同程度のガイガー光検出器が入手できる可能性が高くなったことも大きな進展と考えられる。

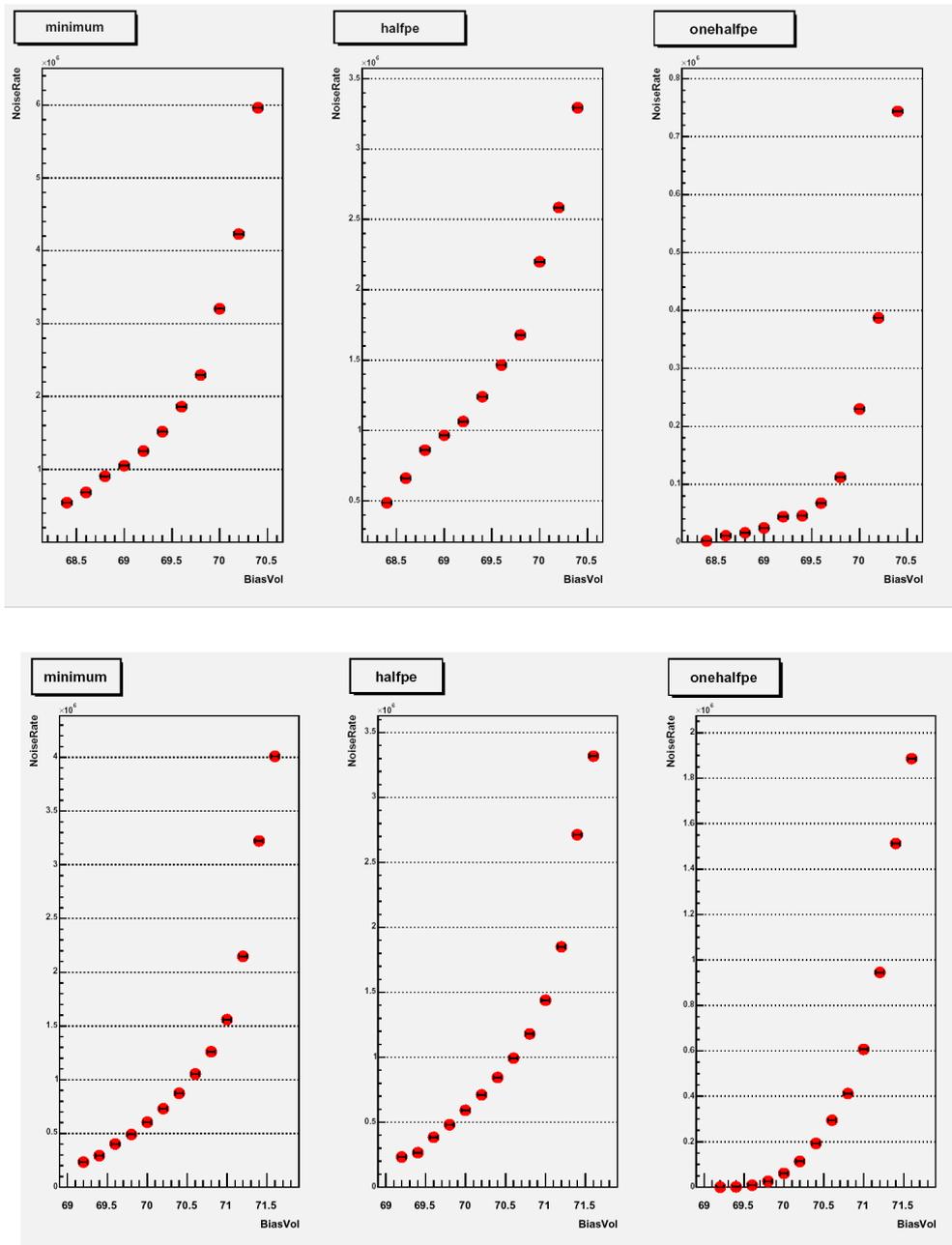


図 5.36: 新型 MPPC の室温下におけるノイズレート (上 400pixel 下 1600pixel) : 縦軸の単位は 10^6

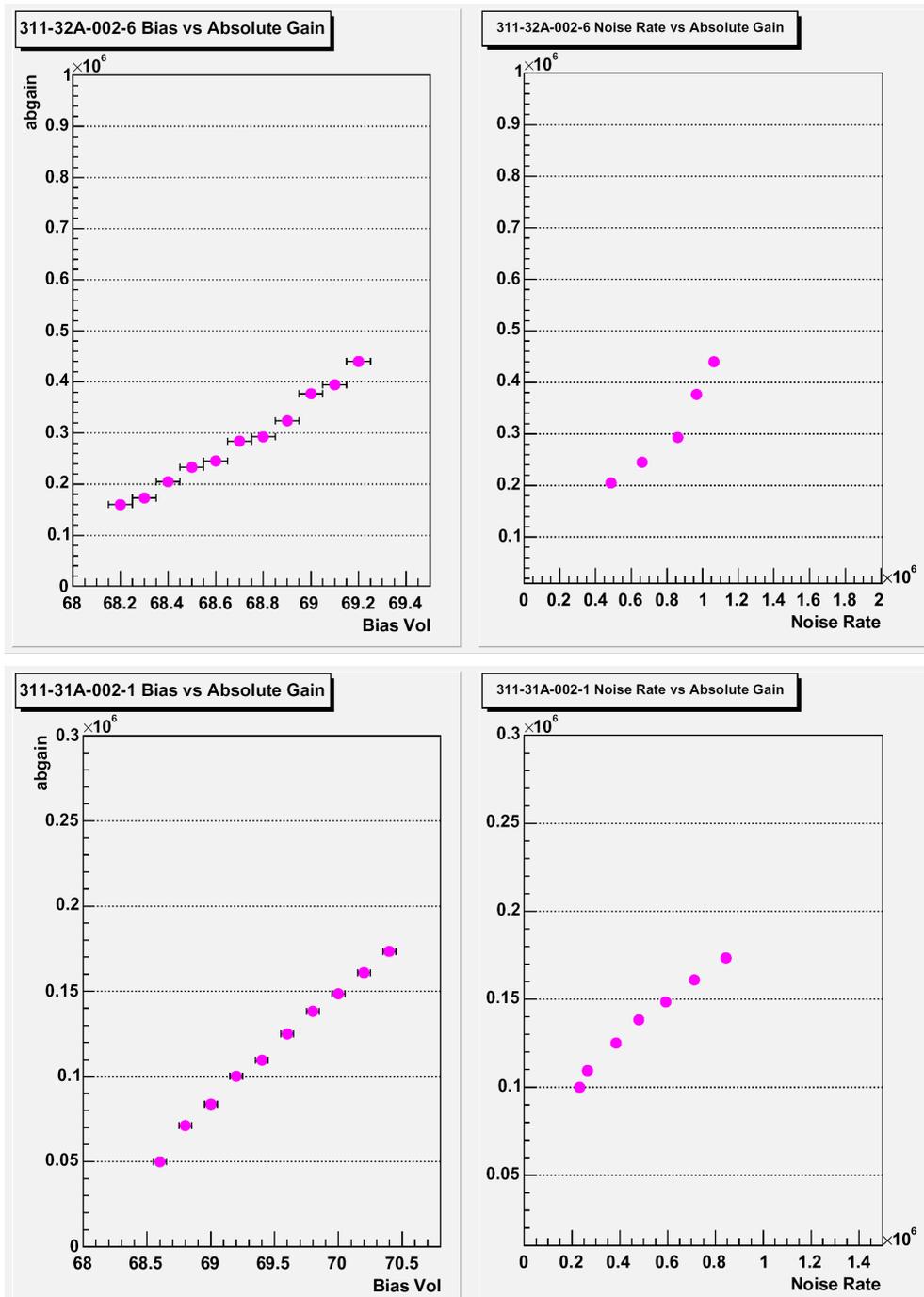


図 5.37: 新型 MPPC の室温下における Gain : 縦軸の単位は 10^6 (上は 400pixel 下は 1600pixel のもの)

Chapter6 まとめと今後の課題

本章ではこれまでの研究のまとめと今後の課題について述べる。

6.1 測定結果のまとめ

評価については以下のように結論付けることが出来る。

- オシロスコープで観測される応答についてはその差が均一でないという問題が残っているが p.e. がしっかりと観測することが出来、これによって QDC 及び Peak Hold ADC による p.e. 観測が可能になるはずである。また立ち上がりは数 ns と早いものの立下りについてはピクセルのサイズによって接合容量が変わり数 ns から 100ns 程度まで幅広く変わる。
- Noise Rate と Gain については 1MHz という値に到達する前に十分な Gain を得ることが出来る。但し得ることの出来るゲインはピクセルの物理的構造によって決まってしまうので低ノイズ、高ゲインを要求するならばその構造をしっかりと把握しておく必要がある。また SiPM と MPPC を見た場合 MPPC のほうが低ノイズレートで高いゲインが得られている。
- Noise Rate は低温であるほど大きいはずだがピクセルが大きくなるとこの通りに行かなくなる。これは Limited Geiger Mode(LGM) の開始電圧が温度によって変わり Noise Rate の大きさはこの開始電圧との差に依存している為である。LGM の開始電圧はゲインのグラフより低温ほど低い。
- Gain について低温度ほど低いバイアスで高い Gain を得ることが出来る。その Gain については今回評価したものについて以下のようなになった。100pixel については放電の問題が明らかになったため表には掲載しない。ただし今後放電の少ない 100pixel MPPC が作成された場合 400pixel などと照らし合わせて幾何的に計算された接合容量とほぼ矛盾ない結果になることが予想される。

| ピクセル数 | ゲイン | V_o | ピクセル容量 |
|--------------------|----------------------------|--------------|--------|
| 400pixel(MPPC) | $0.6 \sim 3.5 \times 10^5$ | 46.8 ~ 48.3V | 0.02pF |
| 新型 400pixel(MPPC) | $1.6 \sim 4.2 \times 10^5$ | 67.7V | 0.04pF |
| 新型 1600pixel(MPPC) | $0.5 \sim 1.7 \times 10^5$ | 67.2V | 0.01pF |
| 1156pixel(SiPM) | $0.4 \sim 4.0 \times 10^5$ | 59.3 ~ 61.3V | 0.01pF |

表 6.1: SiPM・MPPC のゲインのまとめ

小さいピクセルであるものほどゲインは小さくなるが今回は MPPC 400pixel と SiPM 1156pixel が同程度のゲインしか持たないという結果になった。(増幅距離がわからないのでそちらのパラメータが効いている可能性もある)

- 同一光に対する信号のバイアスによる変化は単にゲインの変化による増幅でなくバイアスの増加による Efficiency の増加も小さいながら関与している。(クロストークのようなノイズの影響ももちろんある)
- (付録 C 参照) MPPC のカロリメータに及ぼす影響について素子あたりのピクセル数が少ない場合サチュレーションの影響によりカロリメータは高エネルギーを測定することが出来ない。MIP による photon 数を 5 とした場合 6400pixel はないと高エネルギー (250GeV) γ のエネルギーを測定できなくなる。photon 数が 10 の場合はそれ以上ないと厳しい。
- Efficiency および Linearity について今回測定した条件下では以下のような Efficiency が導き出された。但しこの結果についてはクロストークなどの影響を考慮していない為。実際は Efficiency はこれらの値よりも低くまたサチュレーションについてもノイズ除去や短パルス光の入射などの工夫を施さないと綺麗に観測は出来ないと予想される。この結果に関しても 100pixel の結果は放電の問題が明らかになったため掲載しない。

| ピクセル数 | Efficiency |
|-----------------|---------------|
| 400pixel(MPPC) | 19.3% @ 49.5V |
| | 22.6% @ 49.8V |
| | 23.5% @ 50.0V |
| 1156pixel(SiPM) | 21.9% @ 64.5V |
| | 23.3% @ 65.0V |
| | 27.4% @ 65.5V |

表 6.2: SiPM・MPPC の Efficiency のまとめ

6.2 今後の課題

[評価上の問題] 今回の評価に関して以下のような問題を抱えている。

- 電源電圧の高精度化:
現在使用しているバイアス用の直流電源 KENWOOD PA250-0.25A は 0.1V 単位の調整しか出来ない、100pixel の MPPC を見ての通り 0.1V で Noise Rate や Efficiency が大きく変わってしまうのでより高精度にバイアス電圧を調整できる電源が必要である。
- アンプの問題:
現在使用しているアンプは小信号に対するリニアリティが確認されておらず、またオーバーシュートもあるためゲインの換算についても不定の部分がある。これについてはきちんとこの信号範囲に対するリニアリ

ティをもつアンプを用いることが望ましい。現在 KEK にてこういった検出器に対する読み出し用 ASIC が開発されている。(読み出し用 ASIC については後述する)

- **ダイナミックレンジ：**
今回の研究では用意できる測定機器で測定したが上のアンプと同様に QDC もしくは PHADC もこの信号に適した分解能やダイナミックレンジをもつものを用意すべきだった。これについても KEK における ASIC 開発に依頼することで解決できるはずである。(Gain と pixel 数が分かっているのでおおよそのレンジは分かるはずである)
- **測定環境における並列化・自動化：**
現在は余計な問題が起こらないよう出来る限り測定環境をシンプル化しているが、これに対しても目標とする MPPC が完成した際には大量に検査できるよう測定環境を並列化・自動化しなければならない。これについては後継されるかたにそのデザインを期待するものとする。
- **短パルス光：**
現在は LED にパルスジェネレーターから出来る限り短い時間幅のパルス電圧を印加することで光源を作成しているが将来的にはより短くどのピクセルも一度しか信号を出すことの出来ないくらいの光源を用いることで精密なサチュレーションの影響などが観測できると思われる。
- **耐磁性の測定の問題：**
そもそもこのデバイスが候補として上がった理由に磁場に対する性能の安定性がある。現在神戸には強い定常磁場を発生させるものがなく、今回の研究については測定できなかった。しかし今後この測定は必要になることは歴然である。この測定については KEK 測定器開発室が立ち上がってから可能になる予定である。

以上のことが今回の研究より考えなければならないとされる問題である。

[MPPC 開発上の問題] MPPC は現在開発中のデバイスであるが、開発に関して以下のような課題が挙げられる。

- **内部構造および増幅過程の把握：**
現在 MPPC の詳細な内部構造は企業秘密とされておりその構造はわかっていない、しかしこういった構造におけるパラメータがどのように MPPC の性能に関わってくるかを理解することは評価および検査する側にも求められることであるといえる。
- **パッケージング：**
MPPC/SiPM はともにファイバーを接着するといったようなこちらの用途向けに設計はされていない、しかしゆくゆくはカロリメータを作っていくうえでこういった外部構造に対するデザインを考えていかなければならない。
- **ピクセルサイズの微小化とそれに伴うピクセル数の増加：**
まとめにも掲載したとおりシミュレーションから 6400pixel が少なくとも必要になってくるわけだが、構造上の要求よりこれを実現する為には 1mm ~ 1.5mm 四方という極限られた空間に対して数千という多くのピクセルを設けなければならない。この問題については浜松ホトニクスとの打ち合わせを重ねることで 2006 年 2 月現在 2500pixel のものが作れる予定となっている。今後このテストモデルが完成した場合こちらで評価を行い、アプリケーションに積極的に登用していくことで実用性の向上が見込める。

- 放電の問題

MPPC および SiPM は LGP の一種であることから本来放電を信号として出力するはずであるが、今回測定対象とした MPPC 及び SiPM については放電と LGM の 2 種類のシグナルが出力されていることが分かった。これにより奇妙な光量分布になり正確な光量が検出できないという問題が生じる。本研究の期間においてはまだまだ試作品の質はいいものとはいえないが今後 2006 年 1 月における新 MPPC のように放電を抑えたモデルが多数出来ることでこちらの評価も正しく行えるようになるであろう。

これら 4 点が現時点における問題である。今後浜松ホトニクスと連携して解決していく必要がある。このように開発・評価ともに問題を抱えているが、今後 KEK 測定器開発室 [20] と連携していき解決できると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、適切な助言および指導を下された川越清以先生に深く感謝致します。

また信州大・筑波大・新潟大のスタッフおよび研究生の皆様にも研究において多くの助言を頂きました。ありがとうございます。特に永曾 有亮氏、林 晋氏、伊庭 紗綾香さんには本研究の資料提供等、多大なサポートを頂きました改めてここでお礼申し上げます。

技術的な指導および研究生としての考え方を教えてくださった杉本 拓也氏・竹内 一真氏・中村 龍平氏・岸本 晋氏には強く感謝しております。四方に出会い、これまでの狭かった視野を大きく広げることが出来ました。学んだ事を今後の人生に大きく生かしていこうと思っております。

素子の提供及び技術的なサポートをしてくださった浜松ホトニクスの皆様には感謝すると共に今後の素子の開発向上を願っております。

充実した研究生生活を送ることができたのは研究室の皆様のおかげです、皆様にはことあるごとに助けていただき大変ご迷惑をおかけしました。

最後に学生生活をバックアップしてくださった両親に多謝。

平成 18 年 2 月 14 日 田村 勇樹

付録A 新潟大学における研究

現在 ILC-CAL では神戸大学と並行して新潟大学でも MPPC/SiPM に関する研究が行われている。新潟大学は YAG¹ レーザーを所有しておりそのレーザースポットのサイズから MPPC のピクセル毎の性能差を観測することが出来る。(但し現在のところ 100pixel のみが可能である) 本章では MPPC/SiPM のグループでの進捗を知っておく為にも新潟大学における研究成果を述べると共にピクセル毎の振る舞いの結果と素子全体での振る舞いの結果とのつながりを考えてみる。尚以下のデータは全て新潟大学 伊庭紗綾香さんのもの [18] であり、100pixel の放電をシグナルとして調査したものである。

これらの研究については KEK 測定器開発室が立ち上げられれば神戸大でも測定を行うことが出来るようになる予定である。

A.1 実験環境

新潟大学における実験環境およびパラメーターを図 A.1、表 A.1 に載せる。

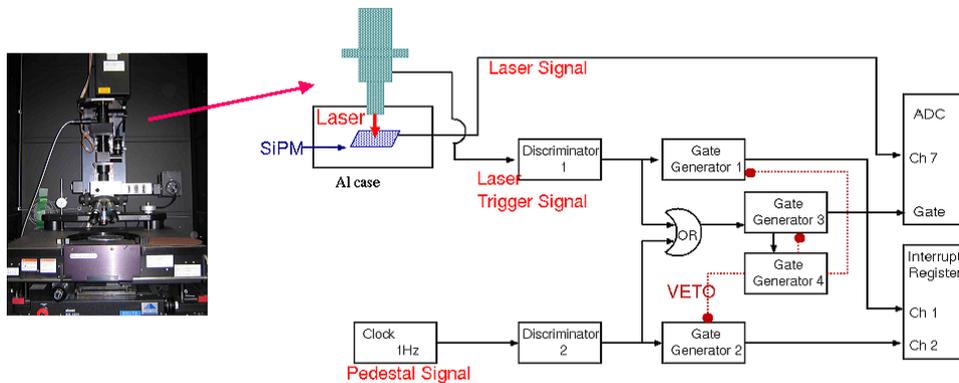


図 A.1: 新潟大学における実験環境:YAG レーザーをフィルター越しに MPPC/SiPM に入射させている

¹イットリビウム・アルミニウム・ガーネットの略 固体レーザーに用いられる

| | |
|---------|---------------------------------------------------------------|
| 出力波長・出力 | 10mJ/cm ² @ 532nm 20mJ/cm ² @ 1064nm |
| スポットサイズ | 2μm ± 2μm |
| 出力時間 | ±10ns |
| トリガー | レーザーシステムと同期 |
| 減光フィルター | 10 ⁻⁸ |

表 A.1: 新潟大学における実験環境のパラメーター

A.2 観測波形と光量分布

次にレーザーを照射して得た信号波形と光量分布を図 A.2 に載せる。信号波形においてはレーザーのノイズのせいかメインのシグナルの直後にアフターパルスが見られる。信号幅が 1μs と広いがこれはレーザー光が強く、微小でない為である。

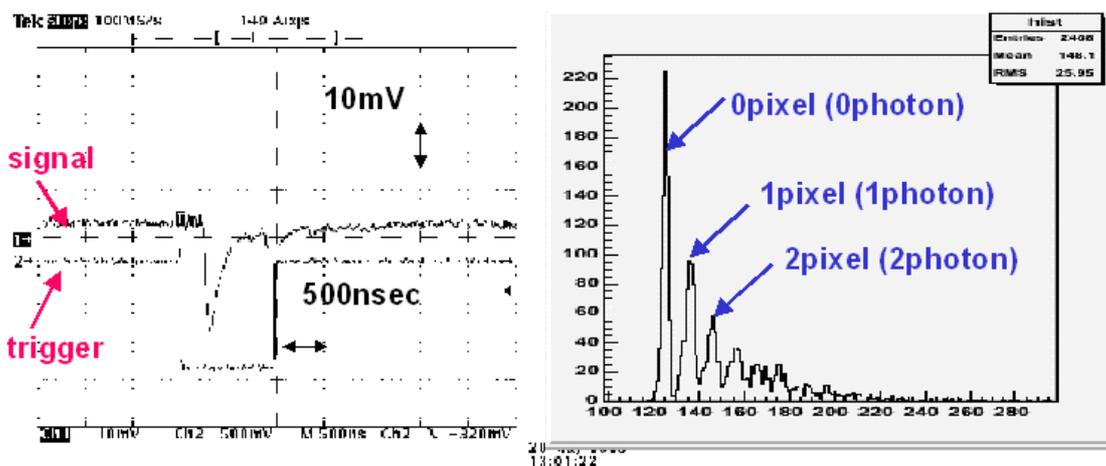


図 A.2: レーザーによる信号波形と光量分布：1064nm のレーザーを照射している

A.3 性能測定

新潟大学では YAG レーザーのスポットサイズの狭さを利用して以下のような測定がされている。

- 全体の一様性 (uniformity)
- ピクセル毎の efficiency

- ピクセル毎の Breakdown Voltage

但し新潟大学において Breakdown Voltage はピクセルがレーザーに対しほぼ 100% シグナルを放出するようになる電圧と定義している。これらの測定について新潟大学が発表しているグラフと考察は次の通りである。

全体の一様性 (**uniformity**) 全体の一様性は各ピクセルの光子に対する信号の波高の分布で定義する。図 A.3 にその結果を載せる。図は全 10×10 列における X 軸の 5・6 列目、Y 軸の 5・6 列目の波高の分布であるが、波高については $8 \sim 11$ count 程度で納まっており結果として素子全体におけるこの分布が全体の信号における p.e. peak の σ に相当する。

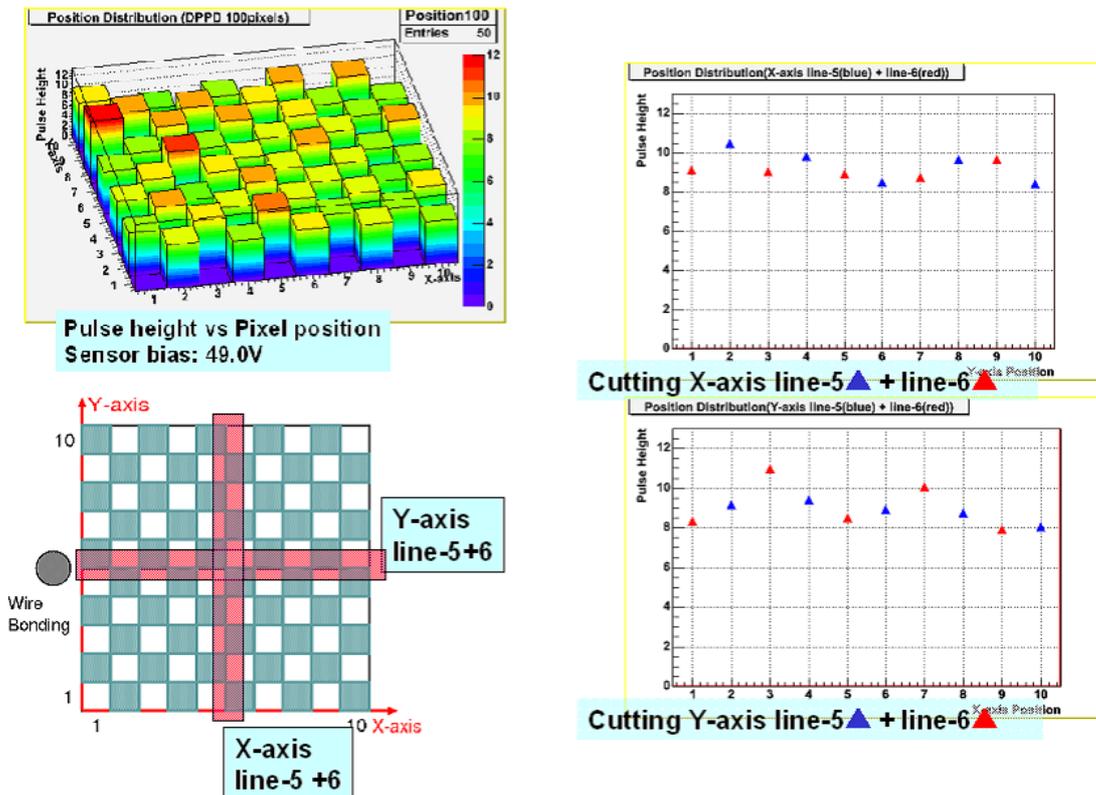


図 A.3: MPPC(H100) における一様性の様子:左上が 50pixel 分の波高の一様性右が X 軸 5・6 列目、Y 軸 5・6 列目の一様性の様子

ピクセル毎の **efficiency** ピクセル毎の efficiency については次のように定義する。

$$efficiency = \frac{1p.e.signalevent}{totalevent} \quad (A.1)$$

各ピクセルに対して微弱レーザー光をいれて efficiency を調べた結果が図 A.4 である。図より素子周辺部における efficiency が低く全体の efficiency を下げってしまうことが分かる。他のシリアルについては分からないが、もしこれがこれまでの MPPC すべてに見られる特徴であるとすれば大きな問題となる。

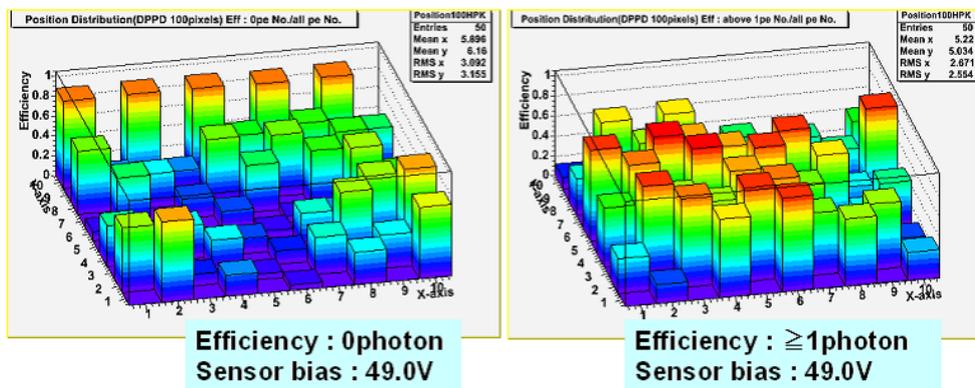


図 A.4: MPPC(H100) における各 pixel の efficiency

ピクセル毎の **Breakdown Voltage** 神戸では Breakdown Voltage が素子においてある一定の値であると考えていたが新潟大では各ピクセルに電圧を変えつつレーザーをあててその efficiency の変化を測定している。結果を図 A.5 に示す。図では 3 点について測定しているが 0.1V 程度 Breakdown Voltage に差がある。もし 100pixel 全てを測定したとしてこれに差があれば当然全体としてバイアスと efficiency の間に関係があることになる。またこの結果において右上のグラフについては efficiency が 30% 程度しかなくこの結果についても全体の efficiency に大きな影響を与えることになる。

この測定結果より、

- Breakdown Voltage の pixel 毎の違い ⇒ 反応ピクセル数の efficiency に対する効果のバイアス依存
- pixel 毎の Breakdown Voltage を超えた際の efficiency の違い ⇒ 反応確率の efficiency に対する効果のバイアス依存

の 2 つが今のところ素子の efficiency に対する内部的な要因である。このばらつきは今後浜松の製造精度が上がることでなくなることが予想される。

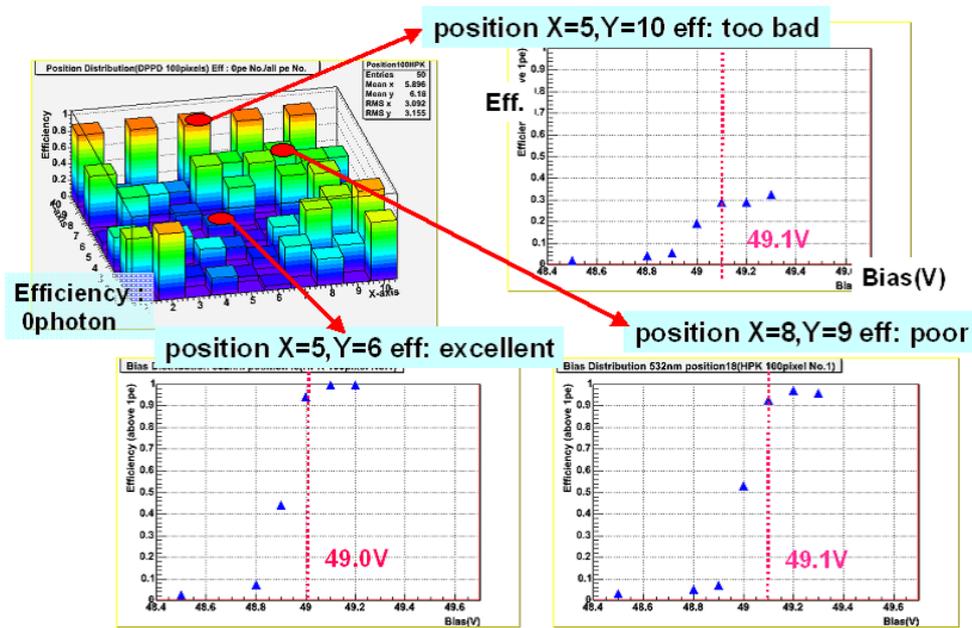


図 A.5: MPPC(H100) における Pixel 毎の Breakdown Voltage の様子

A.4 考察

新潟大学ではピクセル毎の性能を見たわけだが、これと本研究の結果との間にどのような関連が見られるだろうか？これを表 A.2 にまとめる。ここで特にピクセル毎の結果と素子全体の結果を結びつける上で重要なのは efficiency であろう。新潟大学の結果から efficiency が pixel ごとに異なり、また Breakdown voltage が pixel ごとに異なるという 2 つの影響が素子全体の一定バイアス下の efficiency の低下を招いている。この対応をより詳細に捕らえるにはピクセル全てのデータとの照らし合わせを行うなど実験そのものをより精密に行っていかなければならないだろう。

| | ピクセル毎の測定の結果 | 素子全体の測定の結果 |
|-------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| p.e. 分解能 | ピクセル毎の pulse height のばらつきが関係 → バイアスによってどう変わるかを見る必要 | バイアスが高くなると p.e. 分解能は悪化する |
| efficiency | ピクセル毎に異なっている | 個々のピクセルにおける $(1 - \exp(-\epsilon_{pix} N_{ph}/N_{max}))$ の総和と成っていることが考えられる |
| Breakdown Voltage | ピクセル毎に異なっている (図の結果では 0.1V 程度) | ピクセル毎の差異と関連づかない。 |

表 A.2: ピクセル毎の結果と素子全体の結果の対応

付録B カロリメータシミュレーションにおける MPPCの効果 (神戸大学 林 晋氏 提供)

MPPCの光量に対する反応は式(4.8)で表される。これをシミュレーションに取り入れて光量に対するサチュレーションの効果を考える。以下の条件でシミュレーションが行われた。

- シミュレーター : Geant 4.6.2
- 入射粒子 : γ (1GeV ~ 250GeV)
- ECAL : タングステン (W) 3mm + シンチレーター (Sci) 2mm の 30 層
- HCAL : 鉛 (Pb) 10mm + シンチレーター (Sci) 5mm の 50 層
- 個々のシンチレータは $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times \text{厚み}$ のキューブ型で一層につき $200 \times 200 = 40000$ 個
- MIP に対する photon 発生数 : 5 ~ 10
- MPPC ピクセル数 : 400pix, 1600pix, 6400pix

結果を図 B.1, B.2 に示す。まず図 B.1 より γ のエネルギーが上がると光量が増加し本来発生する光子数 (図 左上) を少ピクセル数の MPPC は捕らえられなくなる。これがサチュレーションである。100GeV において 400pixel は従来の光量の 60% 程度しか検出できていないことが分かる。次に図 B.2 よりピクセル数が少ない場合サチュレーションの効果により $\sigma = \sigma_{res}/\sqrt{E}$ に従わなくなり、カロリメータが上手く振舞わなくなることがわかる。これより EM Shower における大量の光子の発生に対応できるように MPPC は多数のピクセルを持つことが要求される。現在のところ 6400pixel は必要になるとされているが MIP=10photon の場合はこれでもまだ少し足りないことが MIP=10 の分解能のグラフより分かり、これ以上のピクセル数が必要とされるが構造上の観点と照らし合わせるとより小さいピクセルが必要となり製造上均一なものを作れるかどうか問題となる。

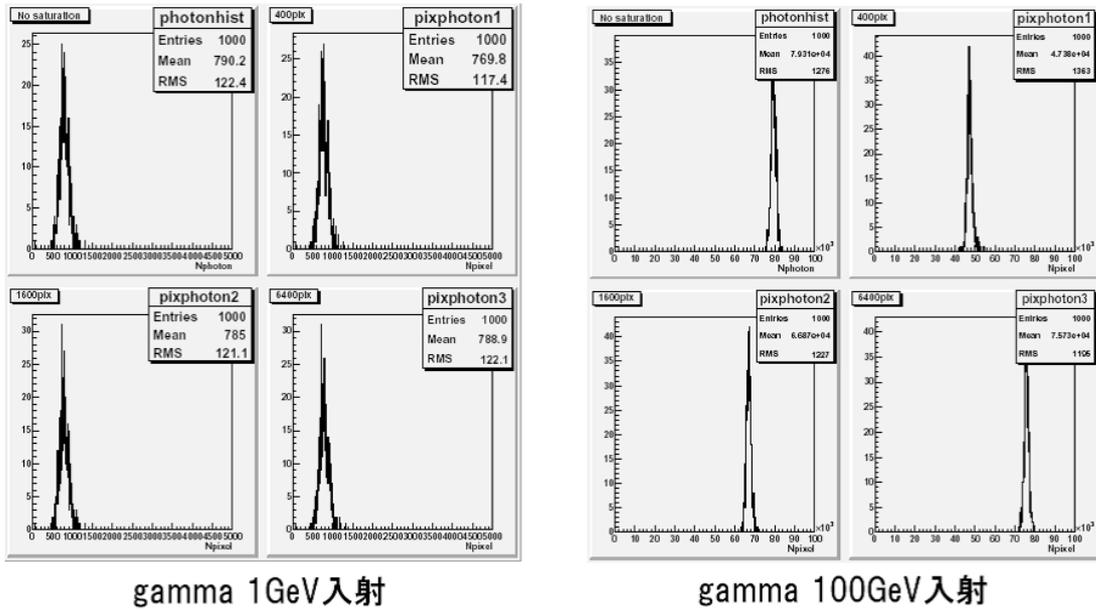


図 B.1: MPPC のカロリメータに対するサチュレーションの効果: MIP=5photon としたもの

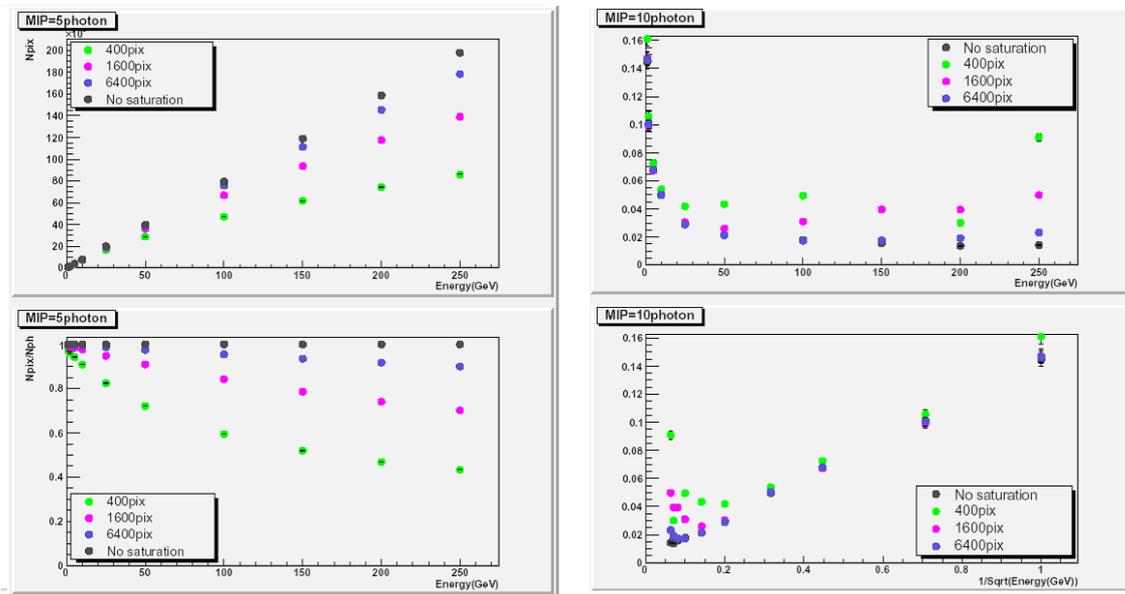


図 B.2: MPPC のカロリメータ分解能に対する効果 : 左は MIP=5photon、右は MIP=10photon とした場合である

付録C KEK 測定器開発室において開発されている ASIC のテスト

現在、KEK 測定器開発室ではガス増幅を利用した検出器の為にフロントエンドエレクトロニクス及び実用化要求の多い高精度時間測定器、Current Integrator が開発されている [20]。これらの回路は T2K 実験や ILC 実験で使われるであろう MPPC の読み出しにも十分活用することが出来、ASIC 化されることは今後の MPPC の研究において非常に有益となる。ここでは KEK にて ASIC 化に向けての Current Integrator(以下 CI) 部のリニアリティに関するテストを行ってきたことについて述べておく。

C.1 テスト環境

行ったテストは入力電圧と出力電圧の Linearity についての測定である。以下に実験環境及び CI の回路図を載せる。Pulse Generator よりテストパルスを入力し、その大きさをアテネーターで調節することで入力を変化させその変化をオシロスコープで測定している。リセット、プリセット電圧などのタイミングは Lab View で調整している。実験機器については以下のものを使用した。

- オシロスコープ : Tektronix TDS5054
- プロブ : TDS5054 付属 P5050
- 差動プロブ : Tektronix P6247
- アテネーター : Hewlett Packard 355C/355D
- パルス関係 : Hewlett Packard 8082A + National Instruments LabVIEW 7.0 + PXI-6551

テストにおいて CI チップに流すバイアス電流をシミュレーションにおける最適値の 20% 上、 $\pm 0\%$ 、20% 下に設定することでバイアス電流がリニアリティに影響を与えるかどうかについてもテストした。このバイアス電流値は差動カスコード入力段に流れる電流でこの電流が大きくなることで MOS デバイスのゲインは大きくなる。(この電流値は信号の立ち上がり時間にも影響を与えている。)

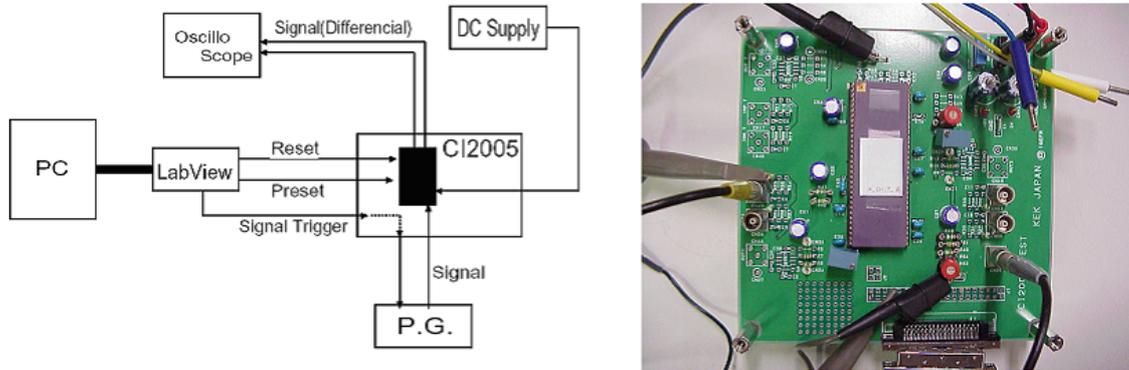


図 C.1: Current Integrator のテスト環境

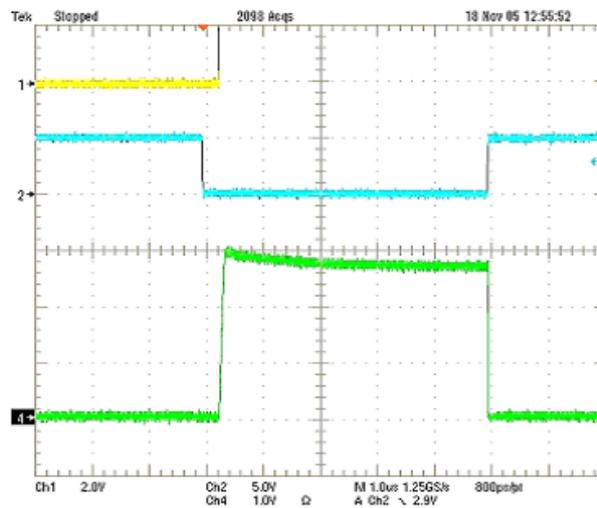


図 C.2: Current Integrator の出力波形 : ch1 は入力 ch2 は RESET/PRESET ch4 が差動出力である

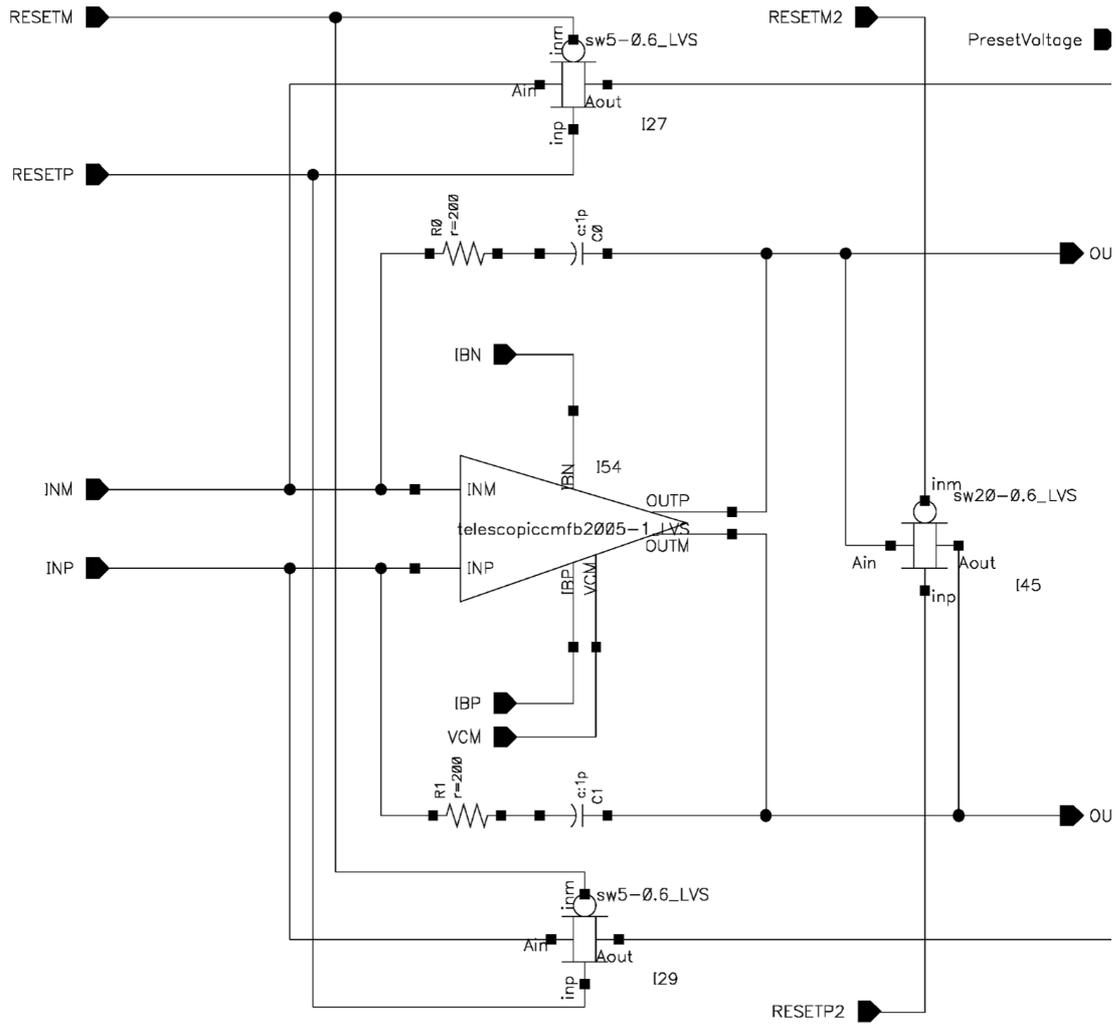


図 C.3: Current Integrator の回路図

C.2 テスト結果

まず波形について図 C.2 に示す。差動入出力形式であることから 2 つの入力に対しての差分の出力が観測される。今の場合入力の片側を接地し、もう一方にパルス入力を与えている。出力についてアンプ前段のコンデンサが 1pF であることから、 $1\text{pC input} = 1\text{V output}$ という換算関係にあり、微小な信号に対しても測定が可能になる。次に Linearity に関する結果を図 C.4 に示す。それぞれ増幅初段に流す電流の最適値の 20% 上 (左下)、20% 下 (左上)、 $\pm 0\%$ (右上) のものである。各図下の Residual については直線からのズレを表したものである。2.73 ~ 3.07V までは linearity がある程度保たれているように見える。

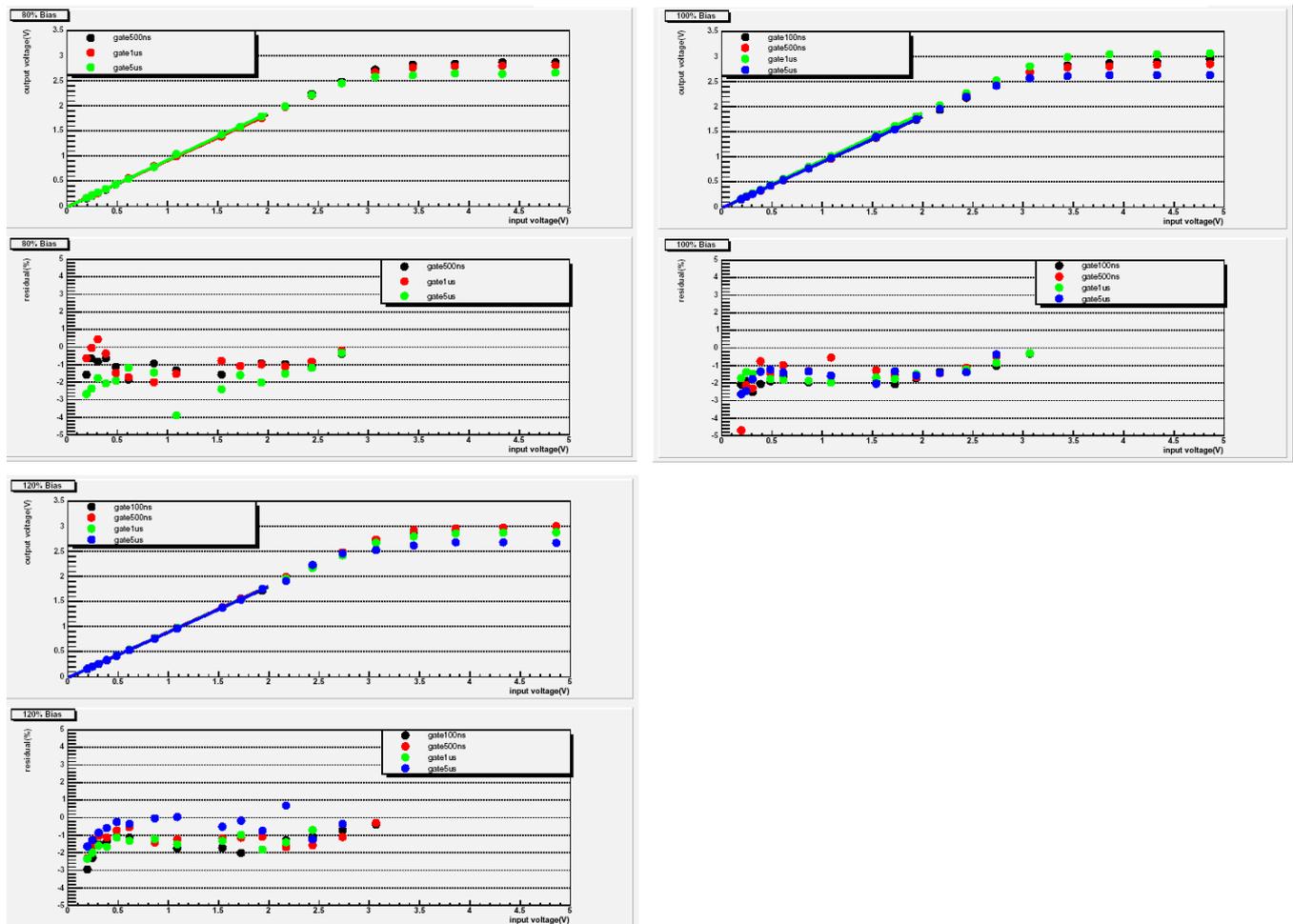


図 C.4: Current Integrator における Linearity:各グラフの下部は Residual をプロットしたものである

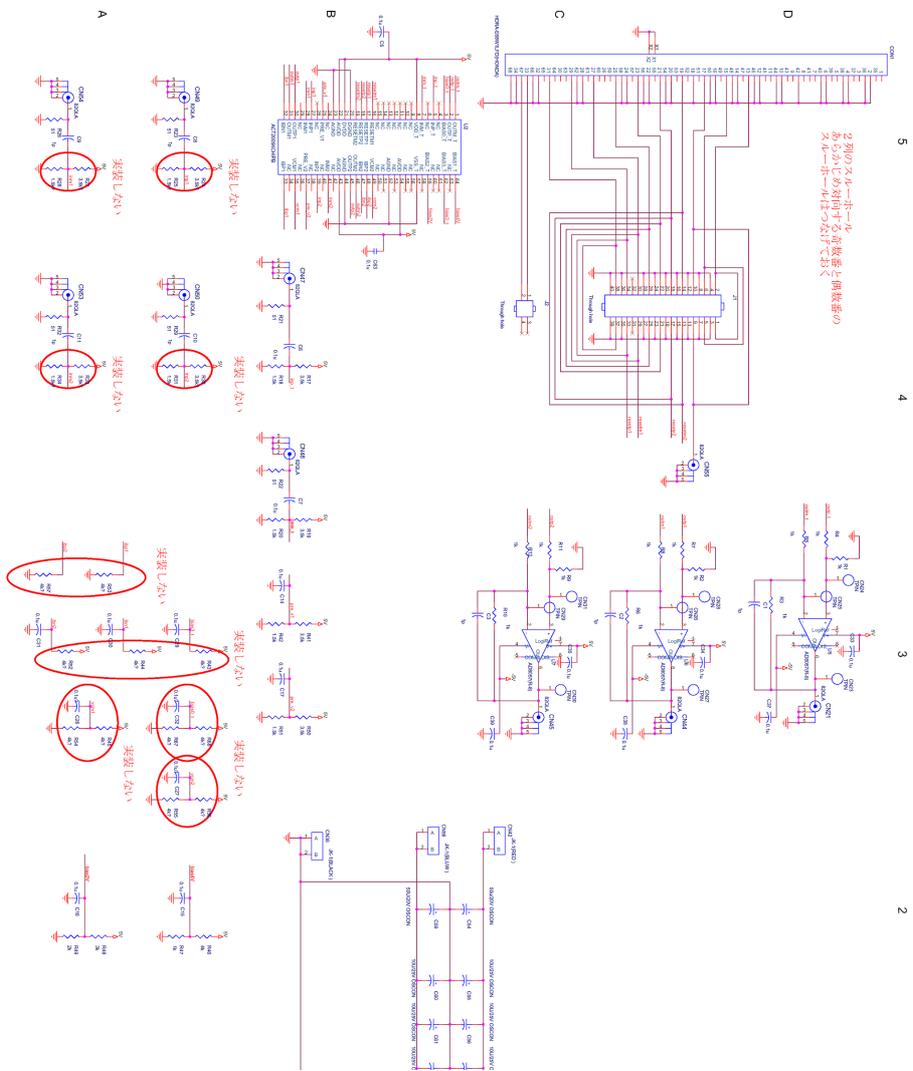
C.3 参考ボード図及び電圧値について

最後に参考としてボード全体の回路図と CI に与える電圧値をまとめたものを表 C.5 に載せておく。

| | 80% Bias Current | Comments | 100% Bias Current | Comments |
|----------------|------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|
| VDD | 5.0V | | 5.0V | |
| IVDD | 7~8mA | | 8mA | |
| IVDD@no chip | 5mA | | 5mA | |
| RESETM1 | 0.005V | Preset SW | 0.005V | |
| RESETP1 | 5.0V | | 5.0V | |
| RESETM2 | 0.005V | Reset SW | 0.005V | |
| RESETP2 | 5.0V | | 5.0V | |
| about type1 | | | | |
| PRE_V1 | 1.485V | Preset Voltage | 1.485V | Preset Voltage |
| INP1 | 0.0V | Input Plus | 0.0V | Input Plus |
| INM1 | 0.0V | Input Minus | 0.0V | Input Minus |
| OUTP1 | 2.980V | OutPut Plus | 3.146V | OutPut Plus |
| OUTM1 | 2.983V | OutPut Minus | 3.150V | OutPut Minus |
| IBN1 | 3.30V | R44=46.4k Ω (71.1uA) | 3.5V | R44=33k Ω (105uA) |
| IBP1 | 2.952V | R53=13.73k Ω (214uA) | 2.85V | R53=10.62k Ω (268uA) |
| VCM1 | 1.913V | | 1.914V | |
| about type2 | | | | |
| PRE_V2 | 1.482V | Preset Voltage | 1.482V | Preset Voltage |
| INP2 | 0.0V | Input Plus | 0.0V | Input Plus |
| INM2 | 0.0V | Input Minus | 0.0V | Input Minus |
| OUTP2 | 2.848V | OutPut Plus | 2.25V | OutPut Plus |
| OUTM2 | 2.916V | OutPut Minus | 2.249V | OutPut Minus |
| IBN2 | 3.29V | R52=47.0k Ω (70.0uA) | 3.48V | R52=33.0k Ω (105.5uA) |
| IBP2 | 2.952V | R57=13.70k Ω (215uA) | 2.882V | R57=10.67k Ω (215uA) |
| VCM2 | 1.974V | | 1.975V | |
| Voltage Supply | | | | |
| DGND | 0.0V | | 0.0V | |
| DVDD | 5.0V | | 5.0V | |
| AGND | 0.0V | | 0.0V | |
| AVDD | 5.0V | | 5.0V | |
| AGND | 0.0V | | 0.0V | |
| AVDD | 5.0V | | 5.0V | |
| AGND | 0.0V | | 0.0V | |
| AVDD | 5.0V | | 5.0V | |

図 C.5: Current Integrator に与える電圧値表

| 120% Bias Current | Comments | Pin Assign |
|-------------------|-----------------------------|------------|
| 5.0V | | |
| 9mA | | |
| 5mA | | |
| 0.0049V | | Pin#16 |
| 5.0V | | Pin#17 |
| 0.0049V | | Pin#19 |
| 5.0V | | Pin#18 |
| 1.484V | Preset Voltage | Pin#25 |
| 0.0V | Input Plus | Pin#27 |
| 0.0V | Input Minus | Pin#28 |
| 2.847V | OutPut Plus | Pin#30 |
| 2.851V | OutPut Minus | Pin#31 |
| 3.72V | R44=22.66k Ω (164uA) | Pin#32 |
| 2.741V | R53=8.54k Ω (321uA) | Pin#33 |
| 1.913V | | Pin#35 |
| 1.481V | Preset Voltage | Pin#37 |
| 0.0V | Input Plus | Pin#39 |
| 0.0V | Input Minus | Pin#41 |
| 2.761V | OutPut Plus | Pin#45 |
| 2.863V | OutPut Minus | Pin#46 |
| 3.69V | R52=23.54k Ω (157uA) | Pin#47 |
| 2.749V | R57=13.70k Ω (215uA) | Pin#48 |
| 1.973V | | Pin#49 |
| 0.0V | | Pin#20 |
| 5.0V | | Pin#21 |
| 0.0V | | Pin#23 |
| 5.0V | | Pin#22 |
| 0.0V | | Pin#44 |
| 5.0V | | Pin#43 |
| 0.0V | | Pin#52 |
| 5.0V | | Pin#54 |



関連図書

- [1] TESLA Technical Design Report
- [2] Andy White ACFA2004 Presentation
- [3] 竹下 徹 LCWS2004 信州大学
- [4] 永野 あい ”リニアコライダー実験用ストリップファイバー型カロリメータのビームテストによる性能研究”
2005 筑波大学
- [5] 小野 裕明 ”リニアコライダーに用いる小型タイル・ファイバー電磁カロリメータの研究” 2004 新潟大学
- [6] Jose Repond http://www.hep.anl.gov/repond/DHCAL_US.html Presentation
- [7] http://www.lip.pt/events/2005/hep2005/talks/hep2005_talk_StefanRoth.pdf
- [8] Tamaki Yoshioka http://www-conf.slac.stanford.edu/snowmass05/proceedings/proc/pres/ALCPG1102_TALK.PDF
snowmass05 Presentation
- [9] Stephen R.Magrill ”Comparison of Simulated Analog Versus Digital Energy Measurement in a Finely-Segmented Calorimeter” 4.Feb.2003
- [10] Andy White http://www.hep.anl.gov/repond/DHCAL_GEM_CALICE_DESY_Dec_2004.ppt
- [11] Jose Repond http://www.hep.anl.gov/repond/RPC_CERN_Jun_2004.ppt
- [12] GLD-CAL DOD <http://ns1.hep.scitec.kobe-u.ac.jp/kawagoe/gldcal/index.php?PageForDOD>
- [13] 浜松ホトニクス株式会社 ”光電子増倍管 第2版”
- [14] 中村龍平著 ”次世代線型加速器実験の為に電磁カロリメータの開発研究” 2005 神戸大学
- [15] 筒井一生著 よく分かる電子デバイス オーム社
- [16] G.Bondarenko 他 NIM A442(2000) 187-192 参照含む
- [17] P.Buzhan 他 ICFA Instrumental Bulletin Fall 2001
- [18] 伊庭 紗綾香 ILCCAL-Meeting Presentation 新潟大学
- [19] 浜松ホトニクス株式会社 資料
- [20] KEK 測定器開発室 ホームページ <http://rd.kek.jp/>