



修士論文

半導体光検出器MPPCの性能評価システムの構築

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室
五味 慎一

平成 20 年 1 月 31 日

概要

T2K 実験は 2009 年 4 月にスタートが予定されている次世代長基線ニュートリノ振動実験である。T2K 実験の初期における第一の目的は、電子ニュートリノ出現モードの発見とミューオンニュートリノの消滅モードによる振動パラメーターの正確な測定である。ニュートリノ振動によって存在比が変化する前に、ニュートリノのフラックスとエネルギースペクトルとは前置検出器において測定される。前置検出器のほとんどの部分ではシンチレーターを検出器として用い、波長変換ファイバーを用いて光検出器まで光信号を牽引して読み出しを行なうことが予定されている。前置検出器の一部は磁場内に置かれるため、光センサーは磁気に対する耐性が求められる。また多チャンネルであることから、コンパクトであること、安価であること、性能の面では高い光子検出効率を持つことなどが求められる。Multi Pixel Photon Counter(MPPC) は高エネルギー加速器研究機構、京都大学が浜松ホトニクス社と協力して開発を行ってきた新型の半導体光検出器であり、T2K 実験の前置検出器で光センサーとして使用する。本論文では、その新しい MPPC 素子の研究開発と性能評価システムの構築とについて報告を行なう。

初めに、T2K 実験用に新しく開発された受光領域が $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ の素子の特性を測定し、T2K 実験の前置検出器からの要求を満たしていることを確認した。ピクセル型半導体光検出器においてクロストーク、アフターパルスという現象が観測される。この 2 つは、共に見かけの光量を大きくするという効果を持つために識別が困難であるため、従来はひとくくりにして扱われてきた。今回、それぞれの特性を個別に評価することに成功した。特に、今まであまり注目されていなかったアフターパルスが予想よりも大きく、MPPC の特性の理解に大きく寄与していることが発見された。

T2K 実験で使用するために、波長変換ファイバーと MPPC とを接続するコネクターの開発と試験を行なった。また、コンパクトかつマルチチャンネルに対応した読み出しのために、フェルミ国立加速器研究所で製作された Trip-t チップを使用した MPPC の読み出しエレクトロニクスを開発した。Trip-t チップは 32 個の入力シグナルをシリアル化することで、測定チャンネルの必要数を減らすことができる。T2K 実験に用いられる 15,000 個の MPPC は 2008 年 2 月から納入が開始され、約 6 ヶ月でその性能を評価しなければならない。我々は Trip-t チップを搭載し 32 個の MPPC の同時測定が可能な基板を作成し、MPPC 素子のテストのための性能評価システムを構築した。また MPPC の個体差のばらつきを見積もるために行なった、事前に入手した数百個の MPPC の測定について報告する。

目次

第 1 章	T2K 実験	4
1.1	ニュートリノ振動	4
1.2	T2K 実験	5
1.2.1	ND280 検出器	6
1.2.2	光検出器への要請	8
第 2 章	Multi Pixel Photon Counter (MPPC)	10
2.1	PPD について	10
2.2	APD ピクセルの動作原理	10
2.3	MPPC の動作原理	12
第 3 章	1.3mm × 1.3mm 角 MPPC の基礎特性	16
3.1	1.3mm × 1.3mm 角 MPPC 素子	16
3.2	測定概要	18
3.3	ゲイン	20
3.4	獲得光量	22
3.4.1	測定方法	23
3.4.2	測定結果	24
3.5	ノイズレート	25
3.5.1	セットアップ	25
3.5.2	測定結果	25
3.6	クロストーク・アフターパルス	27
3.6.1	クロストーク	27
3.6.2	アフターパルス	28
3.6.3	クロストーク+アフターパルス	30
3.6.4	考察	30
3.7	パルスリニアリティー	31
3.8	結論	32
第 4 章	アフターパルスに関する研究	34
4.1	1 ピクセル素子を用いた測定	34
4.1.1	測定結果	34
4.1.2	多ピクセル素子におけるアフターパルスが起こる確率の測定の妥当性	36
4.1.3	クロストーク・アフターパルス 比較	36
4.1.4	アフターパルスの時間構造の測定	37
4.1.5	1 ピクセル素子 結論	38
4.2	高抵抗 MPPC 素子のテスト	39

4.2.1	動機、及び目的	39
4.2.2	APD ピクセルの評価	39
4.2.3	通常抵抗・高抵抗、両者のアフターパルス時間構造の測定	41
4.2.4	アフターパルス測定	42
4.2.5	高抵抗 MPPC 素子 結論	43
第 5 章	MPPC 性能評価システムの構築	45
5.1	測定項目	45
5.2	セットアップ	46
5.2.1	セットアップ全体図	46
5.2.2	Trip-t	47
5.2.3	32 チャンネル Trip-t ボード	48
5.2.4	LabView PC	51
5.2.5	VME6U DAQ ボード	51
5.2.6	多量 MPPC 素子 同時測定用光源	53
5.3	測定手順	53
5.4	自動測定システム	55
5.4.1	目的	55
5.4.2	MPPC 電源の遠隔操作	55
5.4.3	LabView PC の遠隔操作システムの構築	56
5.4.4	恒温槽のセッティング	58
5.5	自動化システム テスト結果	59
5.6	100 個の $1.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ 角 MPPC 素子 個体差の測定	60
5.6.1	測定結果	61
5.6.2	解析	63
5.6.3	100 個の MPPC 素子の個体差に関する結論	66
5.7	結論、及び今後の予定	67
第 6 章	結論	68
	謝辞	69
付 録 A	$1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ MPPC 素子 APD ピクセル性能	70
付 録 B	少数ピクセル素子 基礎特性	72
B.1	APD ピクセルの性能に関して	72
B.2	ゲイン	72
B.3	ノイズレート	74
B.4	クロストークレート	75
付 録 C	クロストークに関する研究	76
C.1	ピクセル間クロストークについての考察	76
C.1.1	ピクセル間クロストーク	76
C.2	測定結果	77
C.3	考察	78

	3
付録 D GOMI Connector 設計図	79
付録 E 振子式コネクタ	83
付録 F MPPC 素子の持つ個体差の測定	88
F.1 セットアップ	88
F.2 測定前の準備	89
F.3 測定・解析	89
F.4 備考	92
付録 G 32 チャンネル Trip-t ボード回路図	94
関連図書	100

第1章 T2K 実験

T2K 実験は 2009 年にスタートが予定されている次世代長基線ニュートリノ振動実験である。我々は、T2K 実験の前置検出器において使用する新型の光センサー、Multi Pixel Photon Counter(MPPC)を浜松ホトニクス社と協力して開発してきた。MPPC は光子検出効率に優れ、磁場に対し耐性があり、コンパクトで、安価な新しい半導体光検出器である。本章では、T2K 実験の背景および概略、前置検出器のデザインと光検出器に対する要請をまとめる。

1.1 ニュートリノ振動

ニュートリノは(重力相互作用を除き)弱い相互作用のみを行なう中性レプトンである。1930 年に Pauli によってその存在が予言され、1935 年に Fermi によって理論づけられたが、弱い相互作用でしか相互作用が確認されないためにニュートリノを直接検出するのは非常に困難であった。1956 年になり、Reines と Cowan によってその存在が初めて確認された。

現在の素粒子標準模型において、ニュートリノには 3 世代が存在し、その質量は 0 として扱われてきた。ところが 1998 年、スーパーカミオカンデグループによる大気ニュートリノの観測 [1] から、ニュートリノは有限の質量をもち、世代間で振動しているという事実が示唆された。そして現在、ニュートリノ質量は先の長基線ニュートリノ振動実験である K2K 実験 [2] によってその存在は確立されたものになっている。ニュートリノ振動は、ある種類のニュートリノが時間発展とともに別の種類のニュートリノに変化する現象である。この現象は、ニュートリノが有限の質量を持ち、かつ弱い相互作用の固有状態 $|\nu_l\rangle$ と質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ が異なり、さらに 3 つの質量固有状態が 1 つに縮退していない場合に起こる。このとき、弱い相互作用の固有状態は質量固有状態の混合状態として表される。

$$|\nu_l\rangle = \sum U_{li} |\nu_i\rangle \quad (1.1)$$

行列 U_{li} は、Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo (MNSP) 混合行列と呼ばれ、以下の式 (1.2) のように表される。

$$U_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{-i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

ここで、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ であり、 θ_{ij} は ν_i と ν_j との混合角、 δ は CP 非保存の位相である。時刻 $t = 0$ 、位置 $L = 0$ において弱い相互作用の状態 $|\nu_l\rangle$ で生成されたニュートリノの時間発展について考える。2 世代間の場合、質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ の時間発展は式 (1.3) のように記述される。

$$P(\nu_l \rightarrow \nu_l) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 (\text{eV}^2) L_\nu (\text{km})}{E_\nu (\text{GeV})} \right) \quad (1.3)$$

ここで、 θ は 2 つのフレーバー間での混合角を、 L_ν は飛行する距離を、 E_ν はニュートリノのエネルギーを、 Δm^2 は 2 つの ν_i 状態間の質量の自乗の差をそれぞれ表している。現在までに、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の

ニュートリノ振動に関しては大気ニュートリノを用いた測定、及び加速器ニュートリノを用いた K2K 実験や MINOS 実験 [3] によって確認されている。このニュートリノ振動の振動パラメーターは、 $\Delta m_{23}^2 = (1.9 \sim 3.0) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ 、でありまた $\sin^2 2\theta_{23} > 0.9$ であることが 90% の信頼度で確認されている。 $\nu_e \rightarrow \nu_x$ ($\nu_e \rightarrow \nu_\mu \cdot \nu_e \rightarrow \nu_\tau$) の振動モードに関しても、スーパーカミオカンデによる太陽ニュートリノの観測 [4]、SNO 実験 [5]、KamLAND 実験 [6] などによって確認されている。振動パラメーターは、 $\Delta m_{12}^2 = (7.4 \sim 8.5) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ かつ、 $0.33 < \tan^2 \theta_{12} < 0.50$ であることが 90% の信頼度で確認されている。すなわち、混合角 θ_{23} 及び θ_{12} は既に測定がなされている。しかし θ_{13} は現在のところ測定はなされていない。現在最も良い θ_{13} の値は Chooz 実験 [7] の $\bar{\nu}_e$ 振動の測定から求められた値である。 $\sin^2 2\theta_{13}$ の上限値は 0.1 であることが 90% の信頼度で確認されている。加速器長基線実験の場合、 θ_{13} を測定するためには ν_e の出現モード ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) を確認しなければならない。このことは現在のニュートリノ物理において非常に重要な命題の一つである。

1.2 T2K 実験

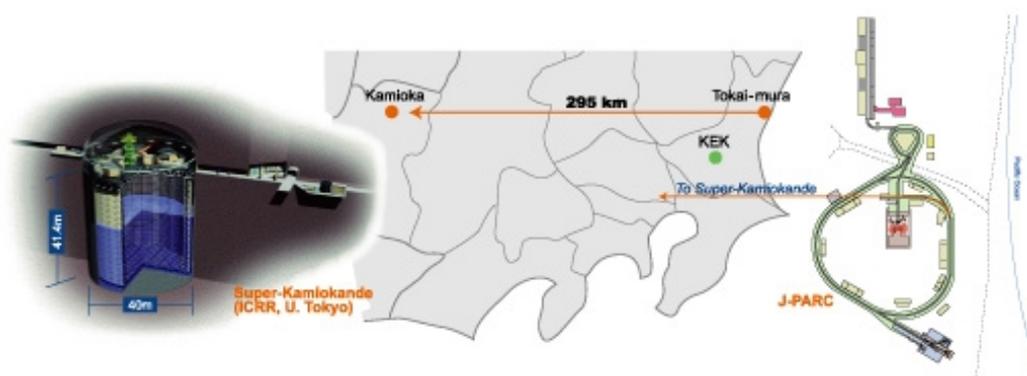


図 1.1: T2K 実験 概略図。

この章では、T2K(Tokai to Kamioka) 実験 [8] の概要と目的および特色について述べ、最後にその中で新型半導体光検出器 MPPC の果たす役割について述べる。

T2K 実験は、現在茨城県東海村に建設中の大強度陽子加速器施設、J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) でほぼ純粋なミュニュートリノビームを生成し、それを約 295km 離れた岐阜県飛騨市神岡町にある大型水チェレンコフ観測装置スーパーカミオカンデで観測する次世代長基線ニュートリノ振動実験である。T2K 実験の主な目的は以下の 3 つである。

- 電子ニュートリノ (ν_e) 出現モードの発見
- ミュニュートリノ (ν_μ) 消失モードによる振動パラメータの精密測定
- 相互作用しないステライルニュートリノ (ν_s) の探索

これらのニュートリノ振動は、ニュートリノ生成標的から 280m 下流に設置する前置検出器 (ND280 検出器) で生成直後のニュートリノのフラックス、エネルギースペクトルを精密に測定し、それをスーパーカミオカンデでの観測結果と比較することで測定する。以下に T2K 実験の特色を挙げる。

- 世界最大のニュートリノビーム強度
J-PARC 50GeV 陽子シンクロトロンからの陽子ビーム (ビーム強度 0.75MW) を用いてミューニュートリノビームを生成する。5年のランで 5×10^{21} POT(Proton on Target) を目指す。
- 世界最大級のニュートリノ観測装置、スーパーカミオカンデ
後置検出器としてスーパーカミオカンデを用いる。スーパーカミオカンデは約 50kt(有効体積 : 22.5 kt) の純水を湛える大型水チェレンコフ検出器で、世界最大級のニュートリノ観測装置である。
- Off-axis ビーム
ビーム軸をスーパーカミオカンデの方向から $2 \sim 2.5^\circ$ ずらすことで、エネルギースペクトル幅の狭いニュートリノビームが得られる。これにより、スペクトルのピークをニュートリノ振動の効果が最大になるエネルギー領域 ($0.5 \sim 0.7\text{GeV}$) に合わせ、かつバックグラウンド事象を引き起こす高いエネルギーのニュートリノの数を抑えることができる。

1.2.1 ND280 検出器

陽子標的から 280m 下流に前置検出器 (ND280 検出器) が設置される。ND280 検出器は、ニュートリノビームラインのビーム軸上に設置される On-axis 検出器と、崩壊トンネルの平均 π 中間子崩壊点とスーパーカミオカンデとの直線上に設置される Off-axis 検出器とからなる。

INGRID 検出器

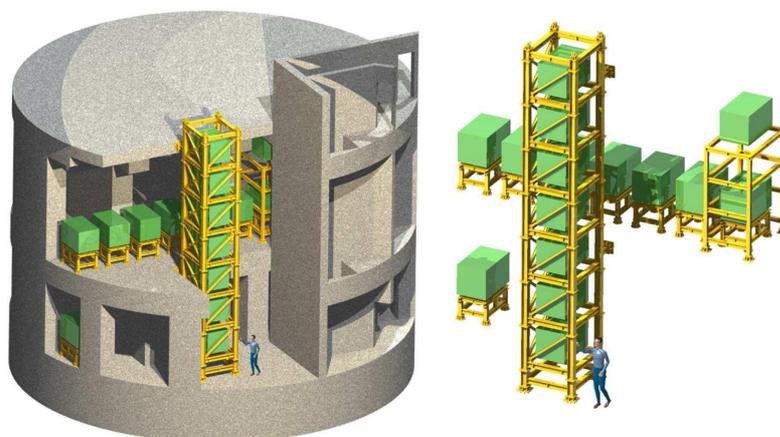


図 1.2: INGRID 検出器。

On-axis 検出器である INGRID 検出器 (Interactive Neutrino GRID Detector)[9] は、ニュートリノビームの方向をニュートリノ自身を用いてモニターするための検出器である。INGRID 検出器は、あらゆるエネルギー域のニュートリノに関して感度を持っている。ニュートリノの反応断面積は非常に小さいが、T2K 実験のニュートリノビームは大強度であるので 1 日ごとのニュートリノビームのモニターが可能である。

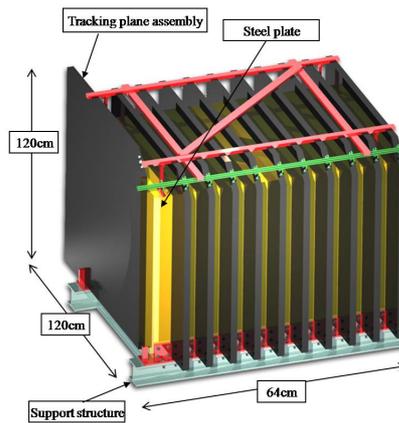


図 1.3: INGRID 検出器 1 ユニット。

INGRID 検出器を、図 (1.2) に示す。INGRID 検出器は 16 のユニットから構成されており、INGRID 検出器の各ユニットは、図 (1.3) で示されるように鉄の板と、縦方向、横方向へ細分化されたシンチレータによって構成されている。ニュートリノのターゲットとして鉄を使用し、鉄とニュートリノとが相互作用して生成されたミュオン粒子をシンチレータによって検出する。シンチレータとしては、アメリカのフェルミ国立加速器研究所で開発された押し出し式シンチレータを使用し、中央部には直径 1mm の波長変換ファイバーを通すための穴が開いている。各シンチレータは反射材によって光学的に分割されており、シンチレーション光は波長変換ファイバーによって牽引され、光検出器へ導かれる。波長変換ファイバーはシンチレータからの青色域の光を吸収し、ファイバー内で緑色域の光を再発光させてその光を光検出器まで導く。このような構造をとることによって、各シンチレータからの光を独立に読み出すことができる。

Off-axis 前置検出器

Off-axis 検出器は、ニュートリノ振動を起こす前のニュートリノビームのエネルギースペクトル、フラックス、フレーバー、相互作用の断面積などを測定するための検出器であり、磁場中に設置される。Off-axis 検出器で観測された結果からニュートリノ振動が無いとした時のスーパーカミオカンデにおけるフラックスやエネルギースペクトルなどを予測し、実際に測定された結果と比較することでニュートリノ振動の解析が行なわれる。この前置検出器は以下のような要素から構成されている。

- 磁石：ND280 検出器ではスイスの CERN 研究所で UA1 実験で使用された磁石を使用する。この磁石により 0.2T の磁場を発生させ、ND280 検出器内でニュートリノと相互作用したことによって発生した荷電粒子の運動量を測定することができる。
- P0D：Pi-Zero Detector。P0D 検出器は UA1 磁石内に置かれ、生成された π^0 粒子の測定を行なう。
- Tracker：軌跡検出器。ニュートリノとの相互作用によって作られたミュオン粒子、及び π 中間子の運動量を測定することを目的としている。Tracker は 2 つの検出器、FGD(Fine Grained Detector)、及び TPC(Time Projection Chamber) からなる。ND280 では 2 つの FGD が用いられる。一方の FGD は細分化されたシンチレータによって構成されており、他方は細分化されたシンチレータと水標的から構成されている。FGD は TPC モジュールの間に設置される。

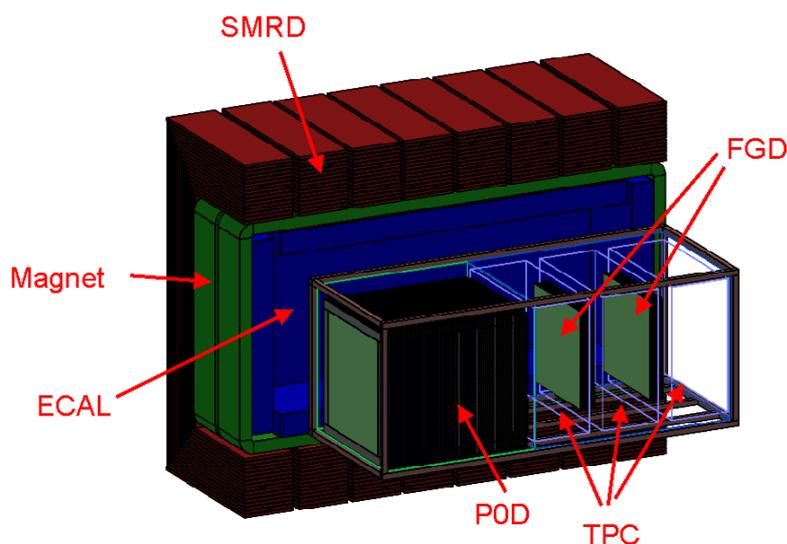


図 1.4: T2K 実験で用いられる、Off-axis 前置検出器。磁石・POD・FGD・TPC・ECAL・SMRD から構成されている。図の左方向からニュートリノビームは入射する。

- ECAL : Electromagnetic CALorimeter。POD 検出器と Tracker を囲う電磁カロリメーター。ECAL は細分化されたシンチレーターと鉛とのサンドイッチ構造の検出器で、その目的は Tracker、及び POD でのニュートリノ相互作用によって生じた γ の測定である。この γ は ν_e 出現事象を探る上で多大なバックグラウンドになる。
- SMRD : Side Muon Range Detector。SMRD 検出器はプラスチックシンチレーターを鉄ヨーク内に置くことで構成されている。SMRD は、サイドに抜けたミュオン粒子の運動量を測定する検出器である。

1.2.2 光検出器への要請

INGRID 検出器、及び Off-axis 検出器の POD・FGD・ECAL・SMRD では、細分化された棒状のシンチレーターで発生した光を、直径が 1mm の波長変換ファイバーを用いて光検出器まで牽引して読み出しを行なう。これらの検出器からの光検出器への要請を以下にまとめる。

1. サイズが小さく、安価であること
2. 磁場内でも安定に動作すること
3. 高い光子検出効率を有すること。少なくとも従来の光検出器である光電子増倍管 (PMT) 以上。

第一の要請は読み出しチャンネルの総数が約 60,000 に及ぶことからくるものである。光検出器のために用意できるスペースも、予算もごく限られている。第二の要請は ND280 検出器自体が磁場内に置かれることからくる。この第二の要請から、従来の光検出器である PMT を使うことはできない。第三の要請はより高い検出効率を獲得できた方が粒子検出効率と識別能力との点で有利であるからである。

また、ここで光検出器に対する各検出器からの要請について、必要数、必要なスペックなどの詳細を表 (1.1) へまとめた。

検出器	FGD	P0D	ECAL	SMRD	INGRID
光検出器必要チャンネル数	9216	12,000	20,000	4,000	10,000
ピクセル数	> 400	> 400	> 400	< 600	~ 100
ゲイン	~ 10^6	~ 10^6	~ 10^6	~ 10^6	~ 10^6
1p.e. ノイズレート	< 1,000kHz				
2p.e. ノイズレート	< 50kHz				
PDE	> 15 %	> 15 %	> 15 %	> 15 %	> 15 %
時間分解能	2 ~ 3nsec				

表 1.1: Off-axis 検出器中の各検出器、及び INGRID 検出器に求められる光検出器のスペックまとめ。各検出器の詳細については、1.2.1 章、及び 1.2.1 章参照。

- ピクセル数についての要望は、ダイナミックレンジ、及び線型性から来るものである。FGD、P0D、ECAL では陽子や高エネルギーの γ 線のエネルギーを測定するために、より広いダイナミックレンジが必要になる。対して INGRID、SMRD ではミュー粒子を見るのが主な目的になる。ミュー粒子は ~ 20p.e. 程の光を生み出すために、先に述べた 3 つの検出器と比較すればダイナミックレンジは多少狭くても良い。
- ゲイン、ノイズレートの要請は後段に構える読み出しのためのエレクトロニクスの要請からくるものである。

これらの要請を満たす光検出器として、半導体光検出器 MPPC を採用し開発を続けてきた。本論文では、2008 年 2 月に始まる MPPC 実機の生産に向けた準備の最終段階として行なった以下の研究について報告する。

- T2K 実験のために新たに開発された受光面積が $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ 角の MPPC 素子の特性評価。(第 3 章)
- 長期的に改善が望まれる特性のひとつである、アフターパルスの研究。(第 4 章)
- T2K 実験で使用する多量の MPPC 素子の性能評価システムの構築。(第 5 章)
- 100 個の素子を用いた個体差の測定結果の報告。(5.6 章)

第2章 Multi Pixel Photon Counter (MPPC)

2.1 PPD について



図 2.1: MPPC 缶パッケージ・セラミックパッケージ

MPPC は、Pixed Photon Detector(PPD) と呼ばれる、近年開発が進んでいる半導体光検出器のひとつである。PPD は、受光面内に多数の APD(Avalanche Photo Diode) ピクセルが並んだ構造をしており、多数のピクセルからのシグナルの総和を出力とすることで光検出器として高い性能を実現している。PPD として様々な種類の素子が開発されているが、T2K 実験においては浜松ホトニクス社製の MPPC を採用した。PPD はフォトンカウンティング能力に優れた光検出器であり、さらにコンパクトである、磁場に影響を受けない、低いバイアス電圧で動作する、高いゲイン・光子検出効率を誇るなどという特性を持っている。現在、その実用化に向けて開発、研究が世界中で進められており、T2K 実験は世界初の大規模実験での使用事例に当たる。

2.2 APD ピクセルの動作原理

まずはじめに MPPC を構成している APD ピクセルについて述べる。APD は半導体光検出器であるので、フォトダイオードについて順に説明してゆく。図 (2.2) で示されるように、ダイオードに逆電圧をかけたとき、n 型半導体内の電子と p 型半導体内のホールとが付加された電位によってそれぞれ逆向きに力を受け、pn 接合部の空乏層の幅が増大する。この空乏層の部分に光子が入射すると、電子を励起し電子-ホール対を生成する。これらのキャリアは付加された電位による弱い電位勾配によってそれぞれ反対方向へドリフトし、光電流が流れる。以上が基本的なフォトダイオードの構造になる。pn 接合部に真性半導体を挿み、p-i-n の構造をとらせることで空乏層の幅を広げたものが PIN フォトダイオードになる。PIN フォトダイオードも逆電圧を付加することで働く光検出器である。APD はアヴァランシェ増倍と呼ばれる現象を利用してシグナルの強度を増加させる仕組みをとったフォトダイ

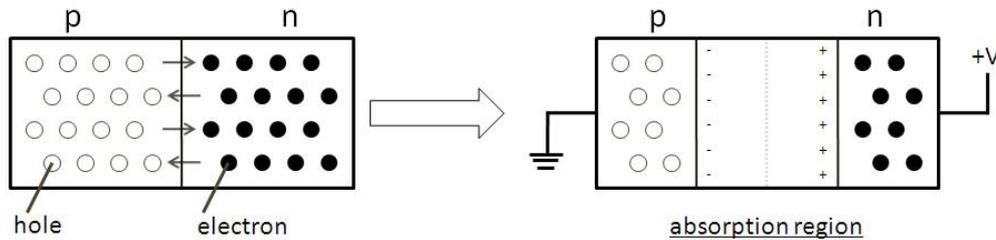


図 2.2: 逆電圧を付加した時のフォトダイオード動作原理

オードである。先ほどの PIN フォトダイオードの n 型半導体側にさらに n 型の極性の強い半導体を付加させる構造をとることで、そこに逆電圧をかけることによって生じた高電場領域において電子雪崩を生じさせシグナルを増幅する仕組みをとっている。

APD の動作モードには大きく分けて、ノーマルモード、ガイガーモードという 2 つのモードが存在する。

1. ノーマルモード

- ブレイクダウン電圧 (V_{bd}) 以下の電圧で動作
- ゲイン ≤ 100
- APD へ入射した光子数に比例した電荷量の出力

2. ガイガーモード

- ブレイクダウン電圧 (V_{bd}) 以上の電圧で動作
- ゲイン $\sim 10^6$
- APD へ入射した光子数に無関係の、電圧値に依存した決まった電荷量の出力

MPPC ではブレイクダウン電圧よりも数 V 高い電圧を付加させることで、全ての APD ピクセルをガイガーモードで動作させ、 $\sim 10^6$ という高ゲインを達成している。ひとつの APD ピクセルから出力される電荷量 Q は APD ピクセルに入射した光子の数には依らず、以下の式 (2.1) の様に表される。

$$Q = C(V - V_{bd}) \quad (2.1)$$

ここで V は付加されたバイアス電圧を、 C は APD ピクセルのキャパシタンスを示している。 C としての一般的な値は数十から数百 fF であり、 $(V - V_{bd})$ としての一般的な値は $1 \sim 1.5V$ である。そのため Q としての一般的な値は数十から数百 fC になる。MPPC のゲインは、元々一個の光電子だったものがアヴァランシェによって幾つに増幅されたかで示されるものであるので、この値を素電荷で割った時の値になり、約 10^6 程度になる。

図 (2.3) へ、APD の一般的な構造を示す。入射した光子は図 (2.3) 中の “absorption region” で電子-ホール対を作る。電子は “absorption region” 内にかかっている弱い電場によって p^+n^+ 接合が形成する “multiplication region” までドリフトする。“multiplication region” の高電場領域で、電子はガイガー放電のトリガーになり入射した光子数に因らない電荷量が APD から出力される。この増幅された電流はポリシリコンの抵抗体を通じてアルミ電極によってシグナルとして読み出される。等価回路は図 (2.4) で示すようになり、シグナルを流す一連のプロセスは図 (2.5) の様になる。このポリシリコンの抵抗体はクエンチング抵抗と呼ばれ各ピクセルに附属している。APD ピクセルでガイガー放電

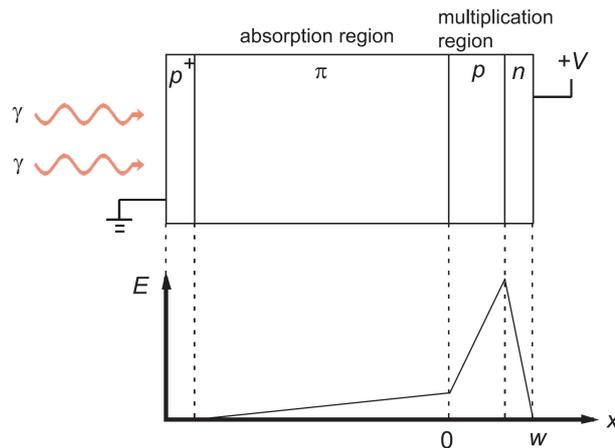


図 2.3: APD 動作原理

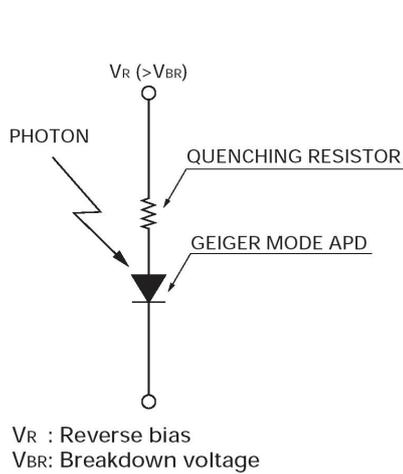


図 2.4: MPPC 1APD ピクセルの等価回路

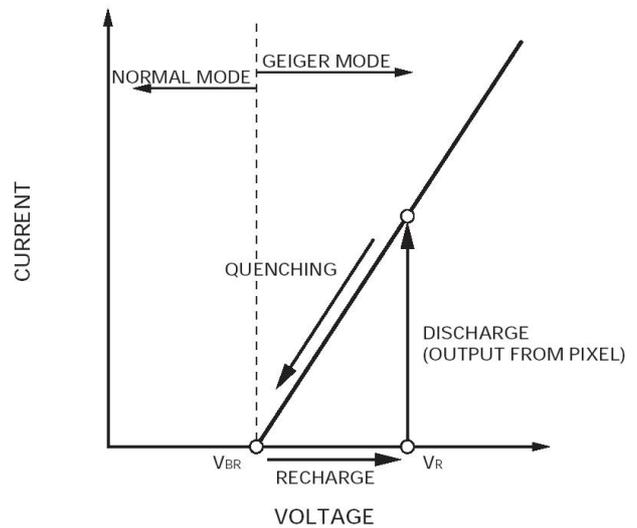


図 2.5: ガイガーモードに在る APD の動作

が一度生じると、APD にかかっていた逆電圧が一時的に減少する (図 (2.5) 中での、”DISCHARGE” → ”QUENCHING”)。出力された電荷がクエンチング抵抗を流れる際に電圧降下を担い、APD ピクセルにかかる電圧が降下するためである。この電圧降下のために APD ピクセルはガイガーモードから脱し、アヴァランシェは終了する。抵抗体を通して電荷が流れ出ていく時間は、APD ピクセルのキャパシタンスを C 、抵抗体の抵抗値を R とすると、 $C \times R$ に比例する。この時間はオシロスコープで波形を見た際の、シグナルの時間スケールに対応している。

2.3 MPPC の動作原理

次に、MPPC の動作原理について述べる。MPPC は、 $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m} \cdot 50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m} \cdot 100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ の正方形の APD ピクセルが $1.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ 、もしくは $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ の受光部に敷き詰められ

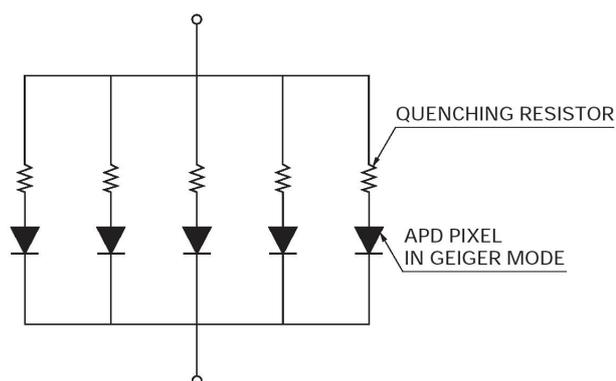


図 2.6: MPPC 動作原理

た構造をしている。全ての APD の読み出し線、及び電圧供給の線は共通になっている。そのために図 (2.6) で示すように全ての APD ピクセルには同じ電圧値が付加され、全ての APD ピクセルからのシグナルの総和が 1 つの MPPC からの出力として得られる構造になる。MPPC では各 APD ピクセルからの応答が良く揃っているために、総和として出力されるシグナル Q_{total} は、式 (2.2) で示されるとおり光子を受光したピクセル数 N_{fired} に Q をかけた値になる。

$$Q_{total} = N_{fired} \times Q \quad (2.2)$$

受光したピクセル数は、光が微弱である時入射する光量に比例する。そのために MPPC は非常に高い光子カウンティング能力を備えている。

MPPC は新型の半導体光検出器であり、従来の光検出器である PMT に代わる新しい光検出器として大きく注目されている [10]。主な性能を、PMT と MPPC とで比較する。

1. ゲイン：MPPC はガイガー放電を用いることによって、PMT とほぼ同等の 10^6 程度という高いゲインを有する。
2. バイアス電圧：PMT が 1000V 程度の高電圧が必要なのに対し、MPPC では 100V 以下という低い電圧で動作する。
3. 磁場への耐性：PMT では磁場中の使用が制限されるのに対し、MPPC は磁場中でも性能が変わらず動作させることが可能である。
4. 光子検出効率：T2K 実験で使用する波長変換ファイバーの光は、 $\sim 450nm$ の波長を持つ。この波長域において、通常の PMT の QE(Quantum Efficiency) が $\sim 15\%$ であるのに対し、APD の QE は約 70% 程である。一方で MPPC ではピクセル間に不感領域を持ち、実際の開口率は、50 ~ 70% になる。また電子-ホール対がガイガー放電を起こす確率も 100% ではなく、これらを総合すると MPPC の光子検出効率 (PDE) は 30 ~ 45% 程になる。これは従来の PMT の 2~3 倍もの値である。図 (2.7) に MPPC の光子検出効率の波長依存性を挙げる。MPPC は緑から青の可視光領域の光に関して高い検出効率を有している。ただし、この図 (2.7) で示した値は、後述のクロストークやアフターパルスの影響を含んでおり、大きめに見積もられている。

MPPC の応答を、オシロスコープで見た波形を図 (2.8) に示す。光電子数ごとに綺麗にピークが分割していることがわかる。次に、CAMAC ADC を用いて MPPC からの信号を測定すると、図 (2.9) に示すような ADC 分布が得られる。光子を検知したピクセル数ごとに綺麗に分かれた光電子

Index	MPPC	PMT
ゲイン	$10^5 \sim 10^6$	$10^6 \sim 10^7$
バイアス電圧	60 ~ 70V	1000 ~ 2000V
有感領域	$(1 \sim 1.3\text{mm})^2$	$\sim 10\text{cm}^2$
磁場への耐性	在り	無し
光子検出効率	30 ~ 45%	$\sim 15\%$

表 2.1: MPPC、及び PMT のスペック比較一覧

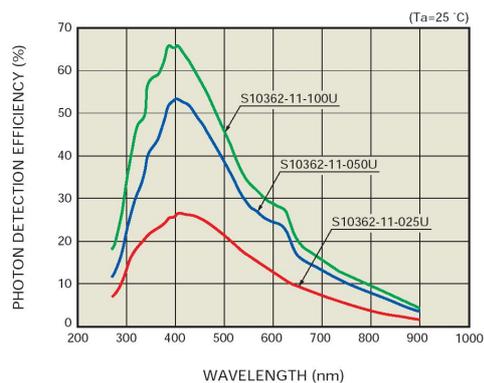


図 2.7: MPPC 光子検出効率の波長依存性 [20]

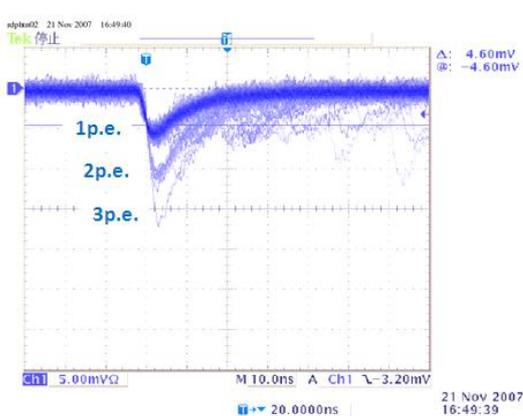


図 2.8: MPPC オシロスコープ波形

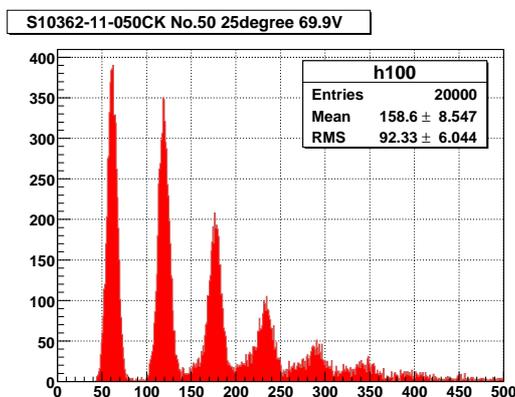


図 2.9: MPPC ADC 分布

ピークを見ることが出来る。以上から MPPC が検出した光子数に対して優れた分解能を有すること、つまりフォトンカウンティング能力に優れた光検出器であることが示された。光電子ピークがきれいに分かれて観測され、またピークごとの間隔が非常によく一致しているという事実は MPPC の各 APD ピクセルの増幅率が良く揃っていることを示している。

これまで我々は、浜松ホトニクス社や KEK 測定器開発室と共同で MPPC の開発を行ってきた。我々が基本的な性能評価の手法を開発した結果、鍵となるパラメータを理解し改善することができるようになり [13]、MPPC の性能は開発開始から数年で一般に販売できるまでに向上した。2007 年初頭

から浜松ホトニクスは $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の素子の販売を開始したが、T2K 実験のような大規模実験での使用実績は世界でもまだ例がないため、我々は T2K 実験での MPPC の大規模使用の実現に向けての研究を続けてきた。その結果を以下の章で報告する。

第3章 1.3mm × 1.3mm 角 MPPC の基礎特性

3.1 1.3mm × 1.3mm 角 MPPC 素子

T2K 実験での前置検出器では、細分化された棒状のシンチレーターで発生した光を、直径が 1mm の波長変換ファイバーを用いて MPPC まで牽引して読み出しを行なう。

現在 MPPC には、ピクセルピッチが $100\mu\text{m} \cdot 50\mu\text{m} \cdot 25\mu\text{m}$ の 3 種類の素子が存在している。一般にピクセル数が多いほどダイナミックレンジや線型性の面で優れる一方、ピクセルピッチが大きいほど開口率が大きくなり PDE が高くなる。総面積が一定ならばこの 2 つは両立しえないため、用途によって最適化する必要がある。これまでの研究の結果、PDE の差とノイズレート、アフターパルスなどの議論から $50\mu\text{m}$ ピッチ MPPC 素子と $100\mu\text{m}$ ピッチ MPPC 素子との間に特性面での優劣の差はあまり無いとし、 $50\mu\text{m}$ ピッチ MPPC 素子の方が生産実績が豊富であり、特性が制御しやすい点などを考慮した結果、T2K 実験において $50\mu\text{m}$ ピッチ MPPC 素子の使用を決定した。

また、現在市販されている $1.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ 角の MPPC 素子よりも受光領域が大きい $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ の素子を使用することを検討した。この $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ 角 MPPC 素子について、利点と欠点を述べる。

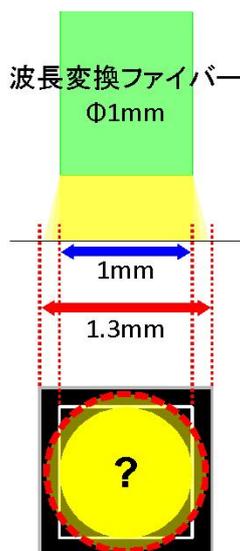


図 3.1: 獲得効率の向上

波長変換ファイバーによって移送されてきた光の全てを検知することはできない。そのため受光領域を拡大すれば、検出できる光量が向上すると考えられる。

2 つ目の利点として再現性の向上が考えられる。GOMI Connector を使用して獲得できる光量は、MPPC 受光領域と波長変換ファイバー中心との横方向のアライメントの精度に関係する。ここで受光面積が十分大きければ、アライメントにずれが生じてもカバーすることができ、獲得できる光量の再現性を高めることができる。

以上の 2 点が $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ MPPC 素子を使用することによる主な利点である。次にマイナスの

1 つ目の利点として、獲得できる光量の増大が挙げられる。概念図を図 (3.1) に示す。MPPC は現在のところ缶パッケージとセラミックパッケージの 2 種類のパッケージがあるが、我々はアライメント精度の優れているセラミックパッケージを採用した。セラミックパッケージの設計図を図 (3.2) に示す。表面を保護するために、MPPC 受光面はパッケージ表面から約 $500\mu\text{m}$ の位置に置かれ、表面はエポキシ樹脂で覆われている。また、波長変換ファイバーと MPPC セラミックパッケージとの接続には、GOMI Connector (General Optical MPPC Injection Connector) と呼ばれるプラスチックコネクタを用いる。GOMI Connector の概念図を図 (3.3) に示す。この GOMI Connector は前置検出器のうち、INGRID と FGD とで使用するために我々が開発したものであり、ファイバー端面を MPPC セラミックパッケージへ押し付ける構造を取っている (詳細は、付録 D)。しかし、図 (3.2) で示すようにファイバー端面と MPPC との間には間隔が開いてしまうために光が広がってしまい、

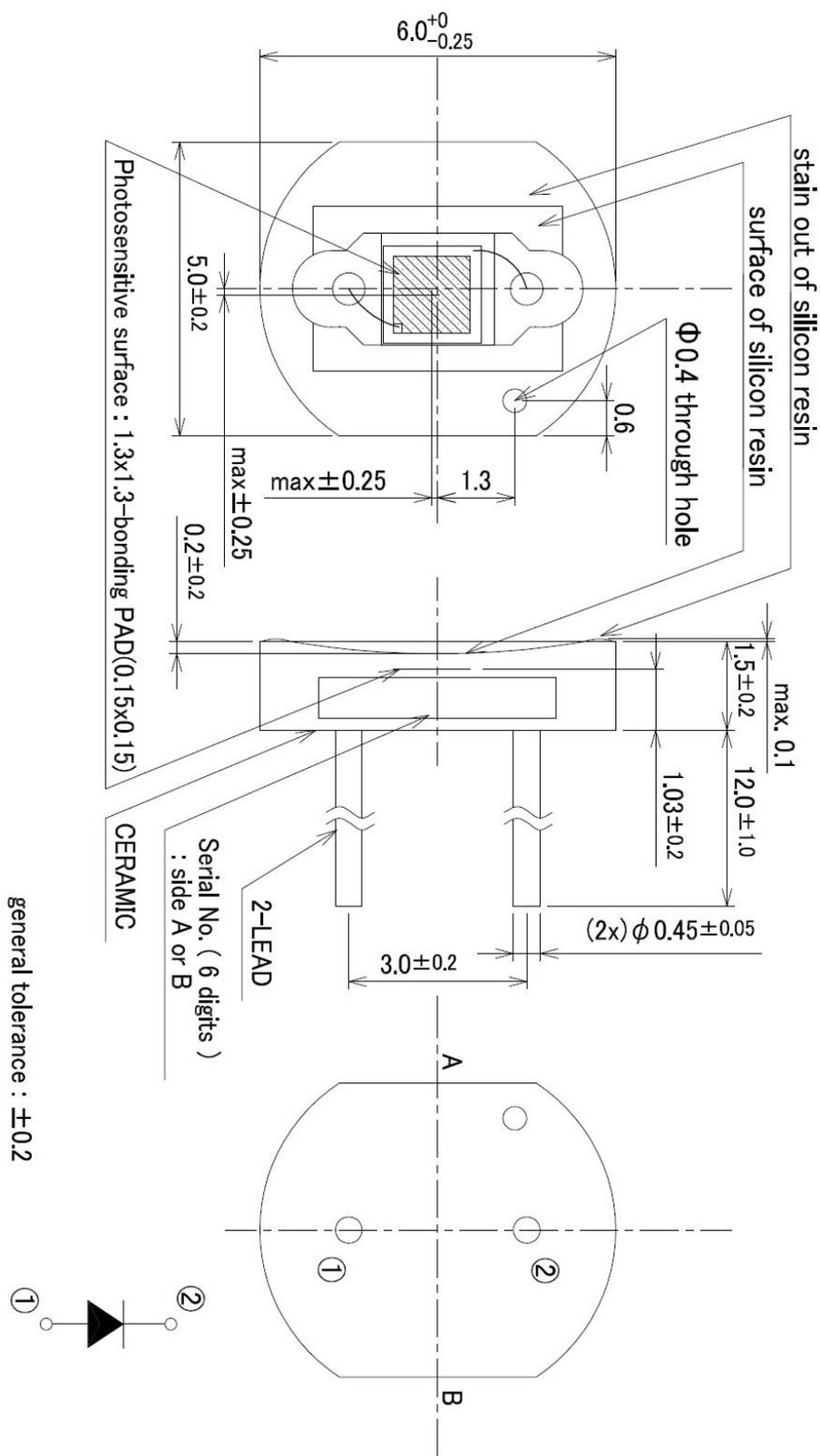


図 3.2: MPPC セラミックパッケージ設計図

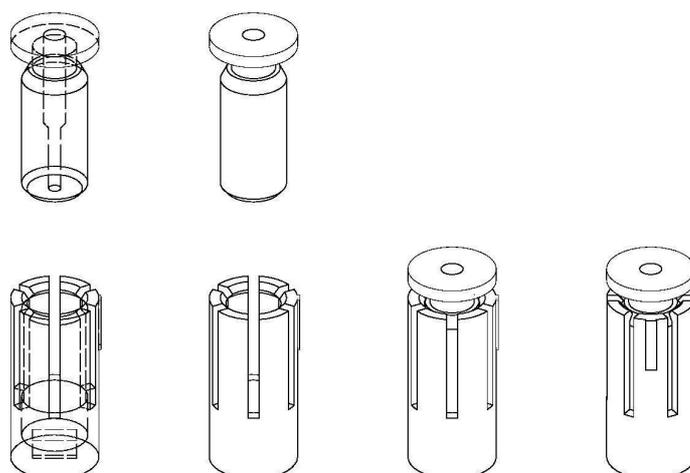


図 3.3: GOMI Connector 概念図

部分について考える。一番の問題は面積が拡大したことによるノイズレートの上昇である。単純化すると、面積比での増加分、 $1.3 \times 1.3 = 1.69$ 倍だけ増えると予想される。MPPC のノイズレートは他の PPD と比較して低く、もしこれだけ増加したとしても我々の要求を満たすことができる。しかしこれまでの経験からノイズレートは製造時の制御が難しく、実際に製造されたものに関して測定してみなければ本当に予想通りの素子かはわからない。本章では、この $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ の MPPC 素子について評価を行っていく。

3.2 測定概要

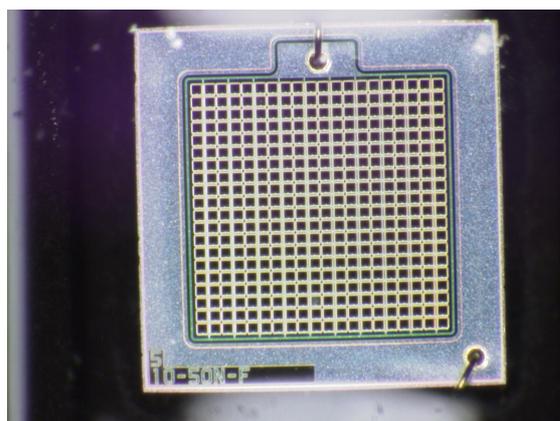


図 3.4: 1.0mm 角 MPPC 素子 (150 倍)

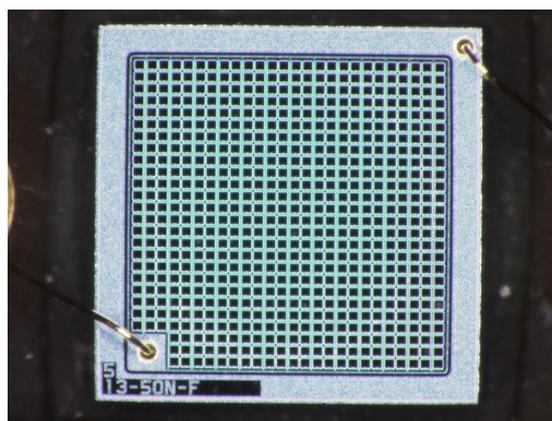


図 3.5: 1.3mm 角 MPPC 素子 (150 倍)

今回の測定で使用した MPPC 素子の受光領域を顕微鏡を用いて撮影した。図 (3.4) が $1.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ の MPPC 素子の、図 (3.5) が $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ の MPPC 素子の顕微鏡写真になる。写真を見れば、両者に用いられている APD ピクセルは共に $50\mu\text{m}$ ピッチで、同じ大きさのものであることがわかる。

写真で示されているとおり、電圧を付加する側のピンから伸びたワイヤを設置するスペースを造るため、1.3mm × 1.3mm MPPC 素子では $400 \times (1.3)^2 - 9 = 667$ ピクセルになっている。

型番	ピッチ長	ピクセル数	受光領域	HPK 測定電圧	入手時期
S10362-13-050CK	50 μ m	667pixel	1.3mm × 1.3mm	69.43V	2007.Sep
S10362-11-050CK	50 μ m	400pixel	1.0mm × 1.0mm	69.67V	2007.May

表 3.1: 測定した 50 μ m ピッチ、1.3mm × 1.3mm 角 MPPC 素子、及び 1.0mm × 1.0mm 角 MPPC 素子の基本情報

素子の基本的な情報を、表 (3.1) に示す。50 μ m ピッチ、受光領域が 1.3mm × 1.3mm の素子は、T2K 実験に用いる素子と同じスペックを持つ素子である。またアフターパルスを起こす確率に関しては受光領域が 1.0mm × 1.0mm のものを使用した。アフターパルスは、その性能が APD ピクセルによるものであり、APD ピクセルの個数、すなわち受光領域の大きさには依存しない。

以下に測定した MPPC の基礎特性を挙げる。それぞれの測定結果、及び測定方法に関しては各章において報告を行なう。

- ゲイン … 3.3 章
- 獲得できた光量 … 3.4 章
- ノイズレート … 3.5 章
- クロストーク … 3.6.1 章
- アフターパルス … 3.6.2 章
- クロストーク+アフターパルス … 3.6.3 章
- パルスリニアリティー … 3.7 章

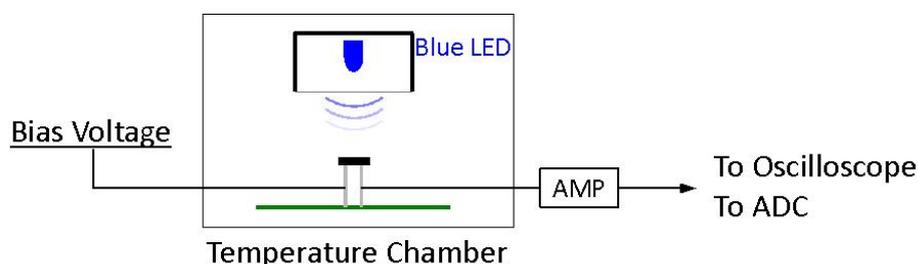


図 3.6: 測定のセットアップ図

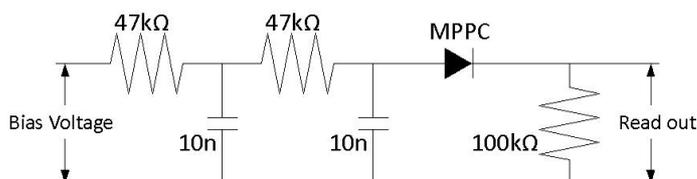


図 3.7: 測定に用いた MPPC 読み出し用の基板 回路図

図 (3.6) に測定に用いた標準的なセットアップを、図 (3.7) に MPPC からのシグナルの読み出しに用いた基板の回路図を示す。また、以下に使用した器具類の説明を挙げる。

- CAMAC ADC
チャージ積分型 12 ビット CAMAC。1ADC カウントは 0.25pC に相当する。
- AMP
PMT アンプを 2 段使用。ゲインはそれぞれ $\times 10$ である。
- MPPC 電源
横河電機製電源 GS610。最大出力電圧は 110V であり、最大許容電流は 3.2A である。0.0001V 単位での電圧の操作が可能。
- 青色 LED
NICHIA 社製 NSPB500S。出力波長域は、450 ~ 480nm (FWHM)。図 (3.8) 参照。
- 恒温槽
ETAC HIFLEX FL211C。 $-20^{\circ}\text{C} \sim +100^{\circ}\text{C}$ の温度領域が可能であり、 0.1°C 単位で制御することが可能。

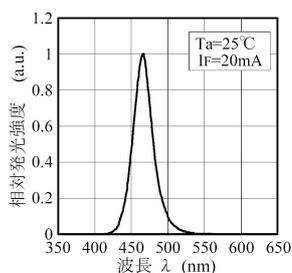


図 3.8: 青色 LED 発光スペクトル図

3.3 ゲイン

MPPC のゲインは、APD ピクセルの内部で発生した電子-ホール対がガイガー放電によって幾つにまで増幅されたかで定義される。定式化すると、

$$\text{Gain} = \frac{1 \text{ ピクセルが出す電荷量 } (Q)}{\text{素電荷 } (e)} \quad (3.1)$$

のようになる。微弱光を MPPC へ照射させた時の ADC 分布を用い、0p.e. を示すペダスタルのピークと 1p.e. シグナルピークとの ADC カウントの差から電荷量 Q を測定しゲインを求めた。測定は $25^{\circ}\text{C} \cdot 20^{\circ}\text{C} \cdot 15^{\circ}\text{C}$ の 3 つの温度条件にて行なった。ゲインの測定結果を図 (3.9) に示す。測定結果より MPPC は $10^5 \sim 10^6$ のゲインを有することがわかる。

第 2 章で述べた MPPC の動作原理から、MPPC のゲインは APD ピクセルのキャパシタンス C を用いて、

$$\text{Gain} = \frac{Q}{e} = \frac{C}{e} (V_{bias} - V_{bd}) \quad (3.2)$$

の様に表される。式 (3.2) から温度が一定の時、ゲインはバイアス電圧に対して線形に変化する。測定結果も確かにそのとおりの挙動を示している。1APD ピクセルのキャパシタンス C は測定結果から傾きを求めてやることによって出すことができる。

同時に、ゲイン-電圧直線をゲインが0になる点まで外挿することでMPPCの各温度でのブレイクダウン電圧も測定することができる。ブレイクダウン電圧は先述のとおり、ガイガーモードとノーマルモードとの境界を示す値である [15]。APD ピクセルのキャパシタンスとブレイクダウン電圧とを表 (3.2) へまとめた。

ここで新たに ΔV という値を、バイアス電圧とブレイクダウン電圧との差として、

$$\Delta V = V_{bias} - V_{bd} \tag{3.3}$$

のように定義する。この値を用いるとMPPCのゲインは、

$$\text{Gain} = \frac{C}{e} (V_{bias} - V_{bd}) = \frac{C}{e} \Delta V \tag{3.4}$$

という形に表すことができる。ゲインの測定結果について、横軸に ΔV をとったものを図 (3.10) に示す。

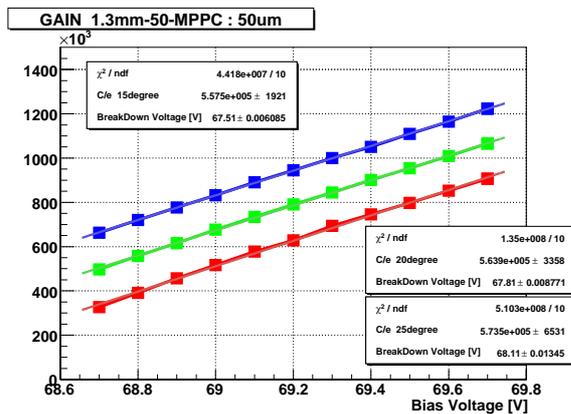


図 3.9: ゲイン

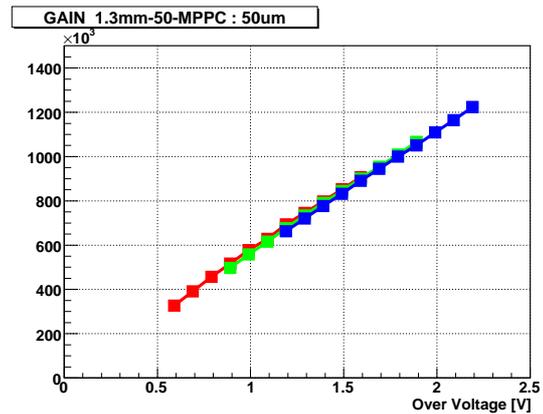


図 3.10: ゲイン (横軸= ΔV)

50 μ m	1.3×1.3-50-MPPC	No.1
温度 [°C]	キャパシタンス [fF]	V_{BD}
15	89.32 ± 0.31	67.51 ± 0.01
20	90.35 ± 0.54	67.81 ± 0.01
25	91.89 ± 1.05	68.11 ± 0.01

表 3.2: 50 μ mMPPC 素子、1.3mm × 1.3mm 角 MPPC 素子 ゲイン測定結果

測定結果より、MPPC のゲインは ΔV のみによる関数であるということがわかる。温度によってキャパシタンスの値 C は変化せず、ブレイクダウン電圧 V_{bd} のみが変わっている。横軸をバイアス電圧にとったときに見える温度による変化は、ブレイクダウン電圧が変化することによって相対的に ΔV が変化してしまい、それによって見えてくる効果であるということがわかる。ブレイクダウン電圧の

温度依存性を図 (3.11) に示す。ブレイクダウンはイオン化係数が一定値に達する電場が生成された時に起こる。低温である時ほど、半導体中でのキャリアの移動速度が速いためブレイクダウン電圧は低下する。測定結果から、ブレイクダウン電圧は温度に線型に依存し温度が 1°C 下がると約 0.06V だけ減少するということがわかった。この変化率は過去の 1.0mm × 1.0mm 各 MPPC 素子と同じ値である。

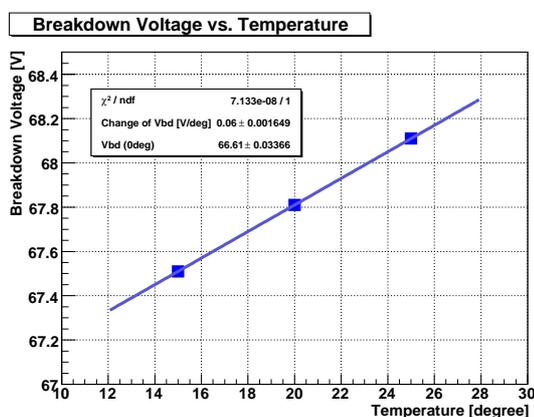


図 3.11: ブレイクダウン電圧の温度依存性

3.4 獲得光量

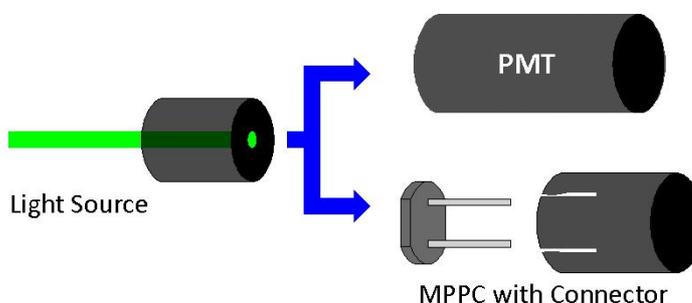


図 3.12: MPPC での獲得できる光量の、PMT に対する値の測定について

1.3mm × 1.3mm 角 MPPC に関して、獲得できる光量の PMT に対する値の測定を行なう。まず、PDE の定義を行なう。PDE は、Photon Detection Efficiency の略であり、受光面に 1 個の光子が入射した際にそれを検出できる確率を表している。MPPC において PDE は、以下の式 (3.5) のように 3 つの要素から表すことができる。

$$PDE = QE \times \varepsilon_{geom} \times \varepsilon_{Geiger} \tag{3.5}$$

それぞれの要素について説明する。

- QE
量子効率。MPPC においては APD ピクセルに 1 光子が入射したときに電子-ホール対が生成される確率を示す。入射する光子の波長に依存する値である。
- ε_{geom}
受光面に対する APD ピクセルの有感領域の占める面積の割合。開口率と同義。各ピクセルを絶縁する部分は、光に対して不感領域になる。一般的には 1APD ピクセルのサイズが小さくなるほど不感領域の占める割合は増加し、 ε_{geom} は小さくなる。
- ε_{Geiger}
生成された電子-ホール対がガイガー放電を起こす確率。バイアス電圧に依存する値である。

今回の測定では、GOMI Connector を用いて MPPC で獲得できる光量の PMT に対する相対的な値を求めた。コネクタを使用するため、MPPC で獲得できる光量は式 (3.6) のように表される。

$$\text{p.e.} = (\text{Number of photons}) \times \text{PDE} \times \varepsilon_{Connector} \quad (3.6)$$

- $\varepsilon_{Connector}$
GOMI Connector による光の損失の効果を表す。

3.4.1 測定方法

実験のセットアップとして図 (3.12) にその概念図を示す。ゲイン測定時と同じ基板を使用し、青色 LED から光を波長変換ファイバーと GOMI Connector とを用いて、PMT、MPPC の 2 つで測定し各々で得られた光電子数 (p.e.) を算出する。PMT の結果をリファレンスに用いることで補正を行なう。表 (3.3) にリファレンスに使用した PMT の特性を示す。

モデル	Hamatsu R1878
大きさ	19mm (3/4inch)
光電面種類	マルチアルカリ
量子効率 (QE)	~ 15% ($\lambda = 450\text{nm}$)

表 3.3: 測定に使用した PMT の特性

MPPC にはクロストーク、アフターパルスという現象が存在しているために見かけの光量が大きくなっている。今回の測定では、クロストーク、アフターパルスの影響を受けないように、MPPC の光電子数はペDESTAL 事象の割合からポアソン分布 (式 (3.7)) を仮定することで算出する。

$$P(k) = \frac{e^{-\mu} \mu^k}{k!} = \frac{0\text{p.e. events}}{\text{total events}} \quad (3.7)$$

ペDESTAL のイベント数からポアソン分布を用いて、各光電子数のイベント数を予測し足し合わせることで式 (3.8) のように光量を定義した。

$$\text{p.e.} = \sum_{n=1}^{\infty} n \times P(n) = \mu = -\ln(P(0)) \quad (3.8)$$

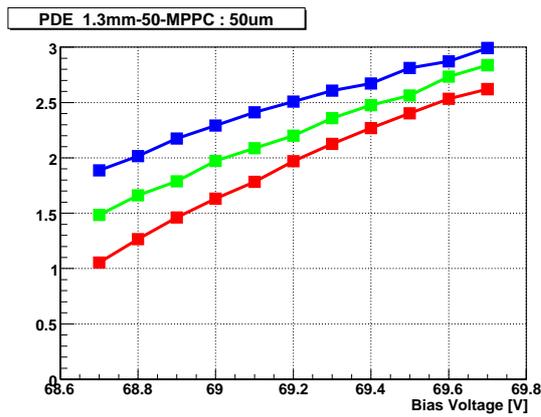


図 3.13: 獲得光量

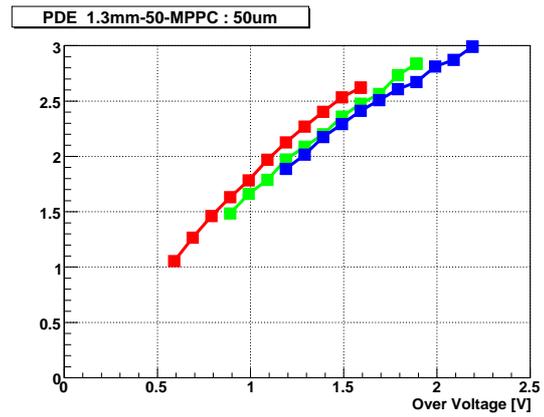


図 3.14: 獲得光量 (横軸=ΔV)

3.4.2 測定結果

MPPC の獲得光量について、50 μ m ピッチ MPPC 素子の測定結果を図 (3.13) に示す。また、横軸を ΔV にとったときの測定結果を、図 (3.14) に示す。獲得できた光量の測定結果について、1.0mm × 1.0mm 角 MPPC 素子での結果と比較する。1.0mm × 1.0mm MPPC 素子の特性に関しては、付録 A を参照。

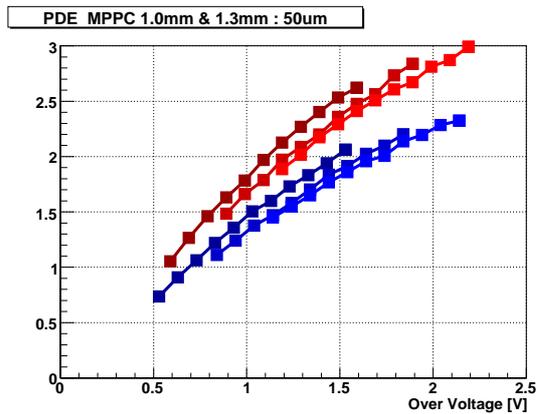


図 3.15: 獲得光量 測定結果比較。赤 : 1.3mm MPPC (温度 3 点) ・ 青 : 1.0mm MPPC (温度 3 点)。

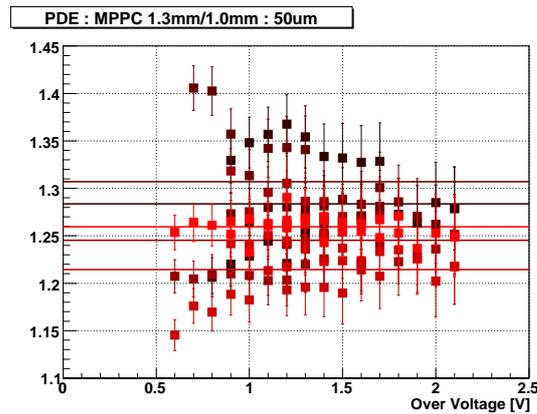


図 3.16: 獲得光量 測定結果比較。(1.3mm MPPC)/(1.0mm MPPC)。5 個分の素子の結果を重ねている。赤線はそれぞれの平均値。

図 (3.15) に横軸を ΔV にとり両者を比較したグラフを示す。赤いグラフ、すなわち 1.3mm × 1.3mm の MPPC 素子の結果は明らかに青いグラフ、1.0mm × 1.0mm の MPPC 素子の結果よりも大きな値を示している。受光領域の面積を拡大することによって獲得できる光量が増えたことがわかった。

図 (3.16) に、獲得できた光量に関して両者の比を取った時の結果を示す。ここでは個体ごとに有意な差があるかを確認するために、5 個の素子について測定を行なっている。図 (3.16) から、面積を拡大することによってファイバーからの光を獲得できる効率は約 25% 向上していることがわかる。

3.5 ノイズレート

3.5.1 セットアップ

MPPC の欠点の一つに、熱電子によるノイズのため室温ではノイズレートが高いということが挙げられる。本項では MPPC の持つ熱電子ノイズの測定について考察し、実際に測定した結果を述べる。

MPPC では光子によって生成された電子-ホール対の他に、熱による電子の励起、トンネル効果などによってもガイガー放電がトリガーされる。いずれの場合も出力は同じで信号の形からは識別はできない。図 (3.17) に光を当てていない状態での MPPC からの出力に見られるノイズの波形を示す。

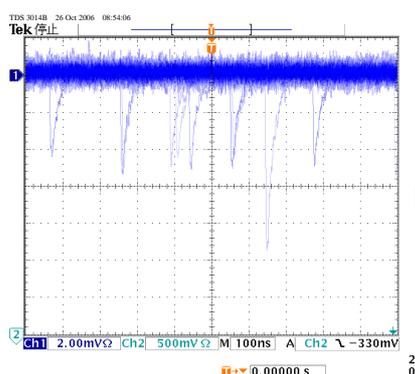


図 3.17: MPPC に見られるノイズの波形。光を当てていない状態での信号波形。ランダムにとった幾つかの波形の重ねあわせである。ランダムなタイミングで 1p.e. ノイズ、2p.e. ノイズが見られる。

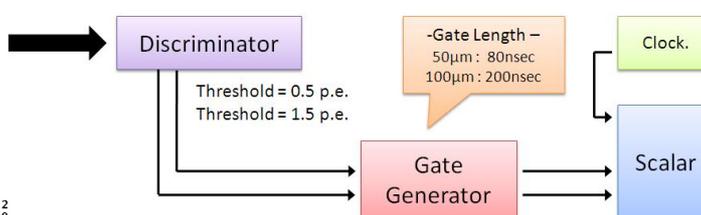


図 3.18: ノイズレート測定のためのセットアップ。

光を当てていない状態での MPPC 出力に対し、0.5p.e. と 1.5p.e. とに閾値を設定しそれを越えてくるシグナルのカウンtrateをスケーラーを用いて測定を行なった。0.5p.e.、1.5p.e. の閾値はオシロスコープによる波形の観測から決定した。また、ここでは 80 ナノ秒の論理信号を用いて測定を行なった。

3.5.2 測定結果

閾値を 0.5p.e. にとった時の結果を 1p.e. ノイズレート、1.5p.e. にとった時の結果を 2p.e. ノイズレートと呼ぶ。1p.e. ノイズレート、及び 2p.e. ノイズレートについて横軸をバイアス電圧、及び ΔV にとった時の測定結果を、それぞれ図 (3.19)、図 (3.20) に示す。ノイズレートは付加されたバイアス電圧に依存する特性であり、バイアス電圧が高ければ高いほどノイズレートも大きくなる。これはガイガー放電を起こす確率がバイアス電圧に依存するパラメーターであり、熱電子を高い電圧ではより拾い上げてしまうこと、またアフターパルスが起こる確率が高いバイアスであるほど大きくなることなどに起因している。アフターパルスに関しては、3.6.2 章で詳しく報告を行なう。ノイズレートは ΔV のみに依存する特性ではなく温度にも依存する特性であるということが図 (3.20) からわかる。同じ ΔV の

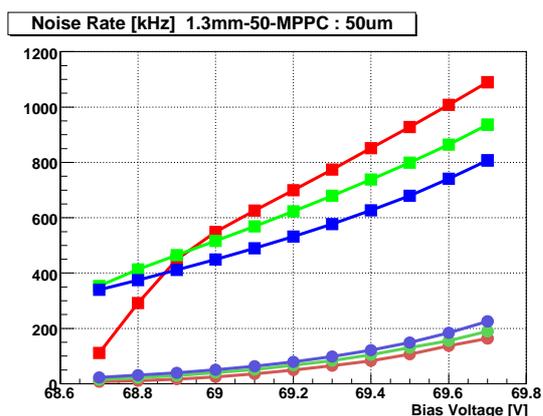


図 3.19: ノイズレート。濃色 … 0.5p.e. 閾値・淡色 … 1.5p.e. 閾値

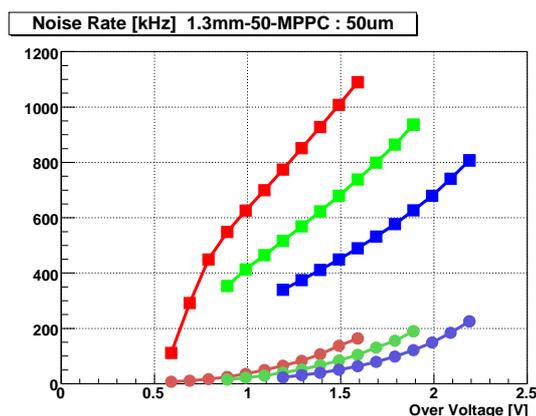


図 3.20: ノイズレート (横軸=ΔV)。濃色 … 0.5p.e. 閾値・淡色 … 1.5p.e. 閾値

点で比較を行なえば、温度が高くなればなるほどにノイズレートは大きくなっている。MPPCで見られる 1p.e. ノイズは熱電子を起源に持つということがわかった。

閾値を 0.5p.e. から 1.5p.e. へ上げるとノイズレートは平均して一桁ほど小さくなる。たまたま同時に 1p.e. が 2 つ以上発生し、その結果シグナルが重なり合うことは 1000kHz のノイズレート、1p.e. シグナルの波高が 0.5p.e. 以上の部分を 10 ナノ秒と仮定した時で 1% 程度であるため、ここで見られている 2p.e. 以上のシグナルは、大部分がクロストークと呼ばれる現象によって生じたものだということがわかる。クロストークに関しては 3.6.1 章で報告を行なう。

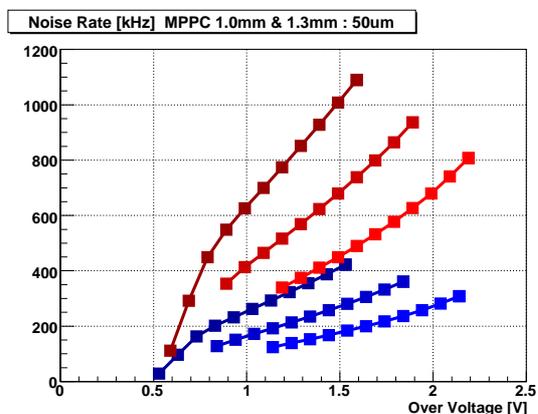


図 3.21: 1p.e. ノイズレート測定結果比較。赤:1.3mmMPPC(温度 3 点)・青:1.0mmMPPC(温度 3 点)。温度が高い方がノイズレートは高い。

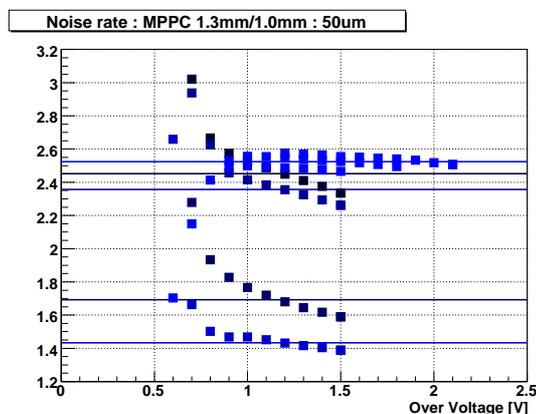


図 3.22: 1p.e. ノイズレート測定結果比較。(1.3mmMPPC)/(1.0mmMPPC)。5 個分の素子の結果を重ねている。青線はそれぞれの平均値。

ノイズレートに関しても 1.0mm × 1.0mm 角 MPPC 素子との比較を行なう。図 (3.21) に横軸を ΔV にとり両者を比較したグラフを示す。赤のプロットが 1.3mm × 1.3mm 角 MPPC 素子のもの、青のプロットが 1.0mm × 1.0mm 角 MPPC 素子のものである。また、それぞれノイズが大きい方から、

25°C・20°C・15°Cの時の測定結果である。ノイズレートも面積の拡大に伴い増加していることがわかる。

図(3.22)に、ノイズレートに関して両者の比を取った時の結果を示す。同様にここでも5個のMPPCの結果を示している。グラフから、面積拡大によるノイズレートの増加が確認できた。またこの図から、ノイズレートには個体差が存在することがわかる。これは、後述する多量のMPPCについての測定(5.6章、及び付録F参照)でも確認できる。そのためノイズレートは一概にこの増加率で括ることはできない。しかし、T2K実験での使用条件、温度域を約20°C、 ΔV としては1.5V以下程度の領域では表(1.1)で示された各検出器からの要請に十分応えることができると予想される。

3.6 クロストーク・アフターパルス

3.6.1 クロストーク

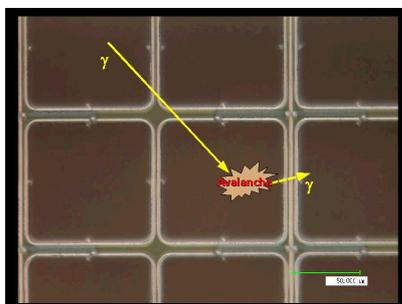


図 3.23: MPPC ピクセル間のクロストークの模式図

MPPCでは、隣り合うピクセル間にシグナルがクロストークを起こす現象が観測される。クロストークは以下のような描像で説明される。あるAPDピクセルが熱電子や光電子をトリガーとしてガイガー放電を起こしたとする。その放電の最中に、二次的な光子が放出される。この二次光子は、隣のピクセルにおいてガイガー放電のトリガーになってしまうことがある。ガイガー放電はピコ秒のオーダーで終了するものであるため、2つのシグナルはほとんど同時に放出されることになる。つまり図(3.17)で示されるように、パルスハイトが通常の2倍の高さを持つシグナルとして放出されたように見えてくる。このような事象をクロストーク、それが起こる確率をクロストークレートと定義している。クロストークが起こると、本来光子を検知しなかったはずのピクセルがシグナルを放出することになる[16]。すなわち、クロストークは本来1つの光電子でしかなかったものを、2、もしくはそれ以上の光電子のように見せてしまう。クロストークは見かけの光量を増加させ、パルスリニアリティーやダイナミックレンジなどに悪影響を及ぼすため、できるだけ抑えることが望ましい。

クロストークが起こる確率を求めるには、1p.e.と2p.e.、両者の閾値の違いを用いる。ノイズレートの測定結果を用いることで、クロストークレートを式(3.9)のように定義する。

$$\text{Cross-talk rate} = \frac{2\text{p.e. Noise rate}}{1\text{p.e. Noise rate}} \quad (3.9)$$

図(3.24)、及び図(3.25)へ測定結果を示す。横軸を ΔV にとってグラフをプロットしてみれば、25°C・20°C・15°Cで測定したときの結果は重なることが判った。クロストークレートは温度には因らない、 ΔV のみの関数であるということがわかる。

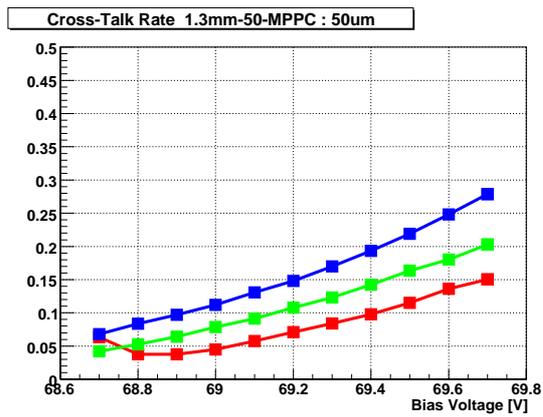


図 3.24: クロストークレート

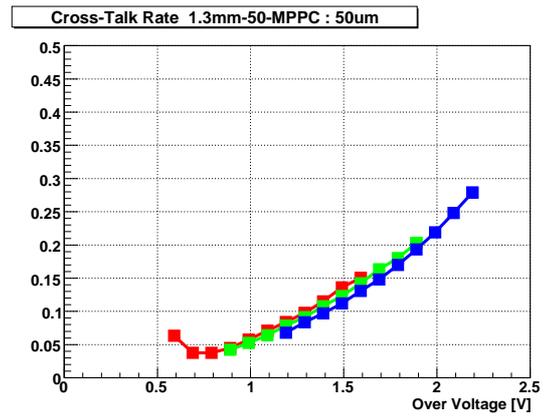


図 3.25: クロストークレート (横軸=ΔV)

3.6.2 アフターパルス

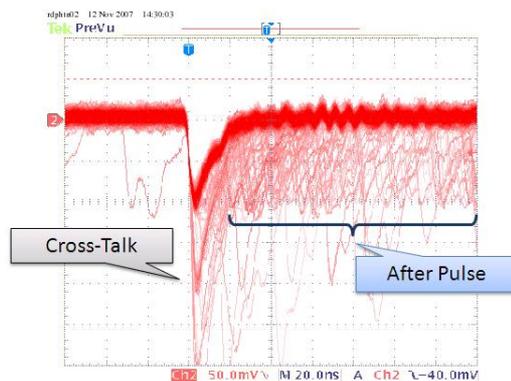


図 3.26: 1p.e. ノイズをトリガーに取った時のオシロスコープによる波形。クロストークはガイガー放電がピコ秒のオーダーで終了するので、ほぼ同時にシグナルが起こり、2つのシグナルは重なって見える。対して、アフターパルスは数十ナノ秒程度の長い時定数を有するため、はじめのパルスからやや遅れて観測される。

MPPC ではアフターパルスという現象も観測される。アフターパルスも見かけの光量を増加させ、パルスリニアリティやダイナミックレンジなどに悪影響を及ぼすため、出来るだけ小さく抑えることが望ましい。MPPC のアフターパルスは以下のような描像で説明される。あるピクセルでガイガー放電が起こる。すると、その放電中に増幅された電子のうちの一部が、半導体内に存在する格子欠陥にトラップされる。このトラップされた電子は、ある時間だけ経った後に再放出され、再びガイガー放電のトリガーになることがある。この、先のシグナルよりもやや遅れて同じピクセルからシグナルが放出される現象をアフターパルスと定義する。ある1つの APD ピクセルでのガイガー放電から派生するものであり、本来1つの光電子でしかなかったものを、2、もしくはそれ以上の光電子のように見せてしまうという点でクロストークと似ているが、生じるプロセスは全く違う。図(3.26)で示すように、ほぼ同時に起こることで 2p.e. 以上の波高のパルスとして見えてくるクロストークとは異なり、

アフターパルスは同じピクセルからの信号であるため、はじめのパルスから遅れて見えてくる。

アフターパルスが起こる確率の測定について考えてみる。ADC 分布を用いた測定では、アフターパルスはクロストークと見えてくる効果が同じであるため、両者を分離することは困難である。また、単に ADC 分布から求められた値からクロストークの分だけを差し引いてもアフターパルスを求めることは出来ない。例えば、アフターパルスとクロストークと、両方を起こした事象を考えてみる。このような事象はアフターパルスを起こした事象としてもカウントされるべきであるが、もし上記の様に考えた場合ではアフターパルスを起こす確率を少なく見積もってしまう。

ここでは、アフターパルスが起こる確率を、以下のように測定した。論理信号の時間幅を長いものと短いもの、2通り選択しスケアラでのノイズレートの測定を行なった。論理信号の時間幅を短くした場合は、アフターパルスによって同じピクセルから再放出されたシグナルをトリガーにかけることが出来る。一方で論理信号の時間幅を長くした場合は、アフターパルスはトリガーにかからない。この二つのノイズレートの測定結果を比較する。短い論理信号の時間幅を用いて測定された結果は、アフターパルスの影響を含む分だけ通常のノイズレートの測定結果よりも大きい値を示す。

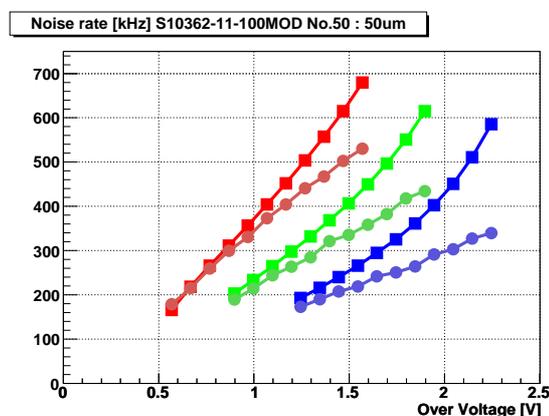


図 3.27: 50 μm ノイズレート スケアラ 2 種類。 ... 20 ナノ秒 · ... 80 ナノ秒

図 (3.27) において、四角の点は論理信号時間幅を 20 ナノ秒に設定したときのもの、丸の点は論理信号時間幅を 80 ナノ秒に設定したときのものである。この差がアフターパルスによるものであると考えることで、アフターパルスが起こる確率を式 (3.10) のように定義する。

$$\text{After pulse rate} = 1 - \frac{\text{1p.e. Noise Long Gate}}{\text{1p.e. Noise Short Gate}} \quad (3.10)$$

図 (3.28)、及び図 (3.29) へ測定結果を示す。ここでは MPPC 素子として、受光領域が 1.0mm × 1.0mm のものを使用している。測定結果より、横軸を ΔV にとってグラフをプロットしてみれば、25°C · 20°C · 15°C で測定したときの結果は重なることが判った。アフターパルスが起こる確率は温度には因らない、 ΔV のみの関数であるということがわかる。しかし、この定義では用いた短い論理信号の時間幅よりも短いアフターパルスを取り損なう可能性がある。また、閾値の設定が低すぎた時、アフターパルスをはじめのパルスと分離することができなくなる可能性もある。以上の問題点から、MPPC でのアフターパルスを起こす確率の測定は非常に難しい。アフターパルスの測定のための特殊なサンプルを用いた測定結果に関して、4.1 章で報告を行なう。

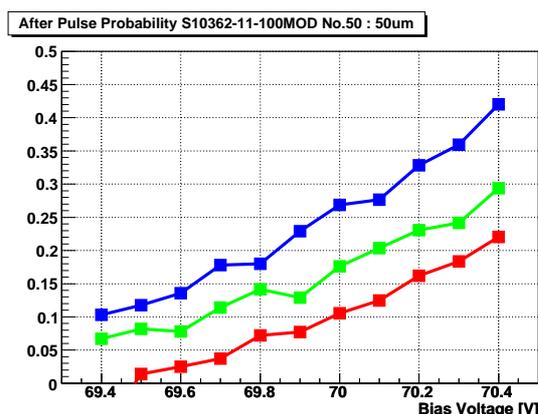


図 3.28: アフターパルス

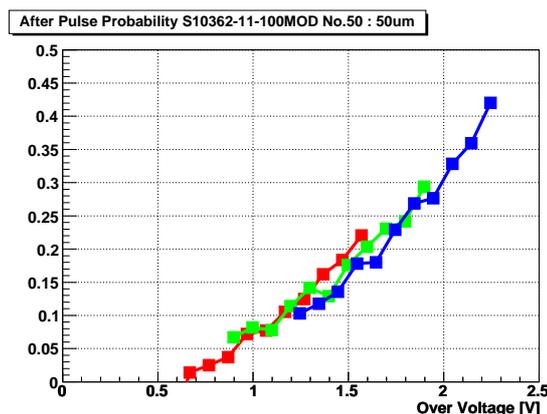


図 3.29: アフターパルス (横軸=ΔV)

3.6.3 クロストーク+アフターパルス

ADC 分布で見たとき、共に 1p.e. シグナルを 2p.e. 以上のシグナルへ変化させてしまう効果として表れるクロストークとアフターパルスとを区別することは出来ない。ADC 分布を用いて測定することが出来るのは、あくまで両者の合計の値である。しかし、得られた ADC 分布を解析する際に必要であるのは両者の和であるこの値である。

ADC 分布を用いてクロストーク+アフターパルスを測定する。クロストーク、アフターパルス、共にある一つの APD ピクセルでガイガー放電が発生したことを起源とするため、いずれのピクセルでもガイガー放電が起らなかった事象、0p.e. のイベント数は両者の影響を全く受けない。0p.e. のイベント数についてポアソン分布を仮定することから、クロストーク・アフターパルスが存在しない時の 1p.e. のイベント数を算出することが出来る。この値と、実際に ADC 分布から求められた 1p.e. のイベント数との比較から、クロストーク+アフターパルスが起こる確率を式 (3.11) のように定義することが出来る。

$$\text{Cross-talk + After pulse rate} = 1 - \frac{\text{Number of 1p.e. (measured)}}{\text{Number of 1p.e. (estimated)}} \quad (3.11)$$

図 (3.30)、及び図 (3.31) がクロストーク+アフターパルスを起こす確率の測定結果である。測定結果より、横軸を ΔV にとってグラフをプロットしてみれば、25°C・20°C・15°C で測定したときの結果は重なることが判った。クロストーク+アフターパルスが起こる確率も温度には因らない、ΔV のみの関数である。

3.6.4 考察

クロストーク、アフターパルスに関して測定を行なった。しかし、アフターパルスの測定には設定に困難が伴い、値を少なく見積もっている可能性がある。この 2 つの特性のどちらがより大きいのかの議論は、4.1 章で行なう。

両者の対策に関して、クロストークを減らすためには、二次光子が隣のピクセルに飛来するのを妨げれば良い。これには例えばピクセル間に敷居を立てる、などの対策が考えられる。しかし、そのため開口率が減り幾何的な光子検出効率 (式 (3.5) 中の ϵ_{geom}) が落ちるようなことは避けたい。アフ

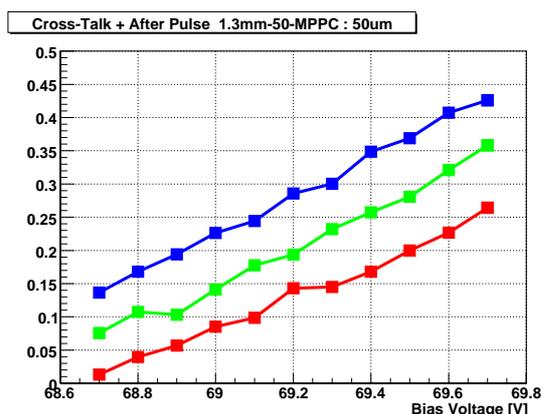


図 3.30: クロストーク+アフターパルスを起こす確率

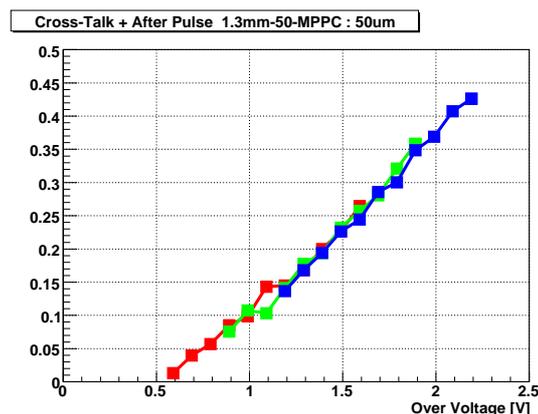


図 3.31: クロストーク+アフターパルスを起こす確率 (横軸=ΔV)

ターパルスを減らすためには、再放出された電子がトリガーにかからなければ良い。これには例えばリカバリータイムを長くするという対処法が考えられる。各 APD ピクセルに付随しているクエンチング抵抗の値を高くすることによってリカバリータイムを長くし、再放出された光子をトリガーにかからないようにできる。これによって、結果的に見えてくるアフターパルスを起こす確率を減らすことが可能である。この議論については、4.2 章で報告を行なう。しかし、一方でリカバリータイムが長くなれば不感時間が増えてしまい、またシグナルがなまってしまう。用途によって最適化が必要である。

3.7 パルスリニアリティー

MPPC は PPD であるために、ピクセルの全数以上のシグナルを出すことが原理上不可能である。入射してくる光子の数が大きくなるにつれ、光子を検出したピクセルの数が入射した光子数に比例しなくなってくる。ピクセル数が大きい素子ほどダイナミックレンジが広く、また線型性もより強い光に対して成立すると考えられる。

さらに MPPC ではクロストークの影響によりダイナミックレンジが狭まる可能性が在る。また入射光の時間構造が長い場合、MPPC の回復時間が短いために回復し終えたピクセルが再び光を検知し、実効的なダイナミックレンジが広がる可能性がある。

MPPC のリニアリティーを、PMT を用いて MPPC へ入る光量をモニターすることで測定した。この時、リニアリティー曲線は ADC 分布を用いて求められたクロストーク+アフターパルスを起こす確率を考慮し、ダイナミックレンジの拡大を無視すると以下の式 (3.12) のような形になる。

$$N_{fired} = N_0 \times \left(1 - \exp \left(-\frac{x(1+c)}{N_0} \right) \right) \quad (3.12)$$

- N_{fired} : シグナルを放出したピクセル数
- N_0 : 総ピクセル数 (400 ピクセル、667 ピクセル等)
- x : 入射した光電子数
- c : クロストーク+アフターパルスを起こす確率

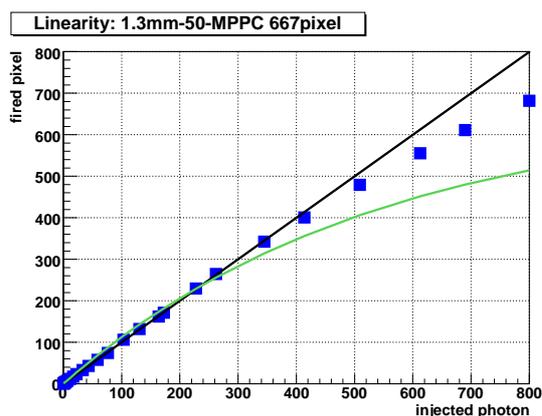


図 3.32: 50 μm リニアリティー測定結果。青点 … 測定結果・黒線 … 線形・緑線 … 理論曲線 (式 (3.12))

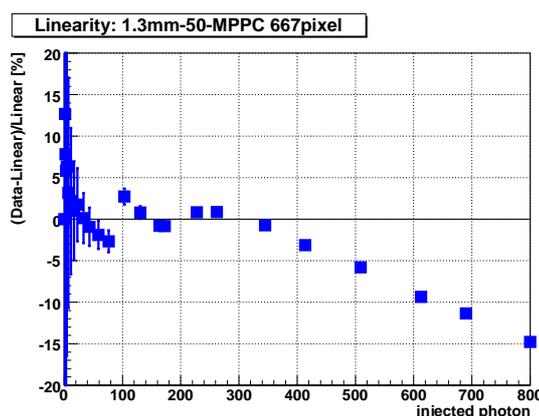


図 3.33: リニアリティー測定結果。(測定結果-線形)/(線形) を横軸に入射光量を取って表示した。

図 (3.32) にリニアリティーの測定結果を示す。測定は、 $\Delta V=1.5\text{V}$ 、ゲートの時間幅は 360 ナノ秒と大きめにとって取りこぼしのないようにしている。横軸に入射させた光子数を取り、縦軸に光子を検知したピクセル数をとった。青い点が測定結果を示し、緑色の線が式 (3.12) で述べた理論曲線を表している。光量の大きいところでは線型、理論による予測から外れてくることがわかる。

測定結果に関して、線形からのずれを、

$$\frac{(\text{data}) - (\text{Linear})}{(\text{Linear})} \times 100 [\%] \tag{3.13}$$

について表したものを図 (3.33) に示す。約 450p.e. まで、5% 以内で線型性が成立しているということがわかった。

3.8 結論

基礎特性	$\Delta V=1.0\text{V}$	$\Delta V=1.5\text{V}$
ゲイン	6.0×10^5	8.5×10^5
獲得光量	$1.7 \times \text{PMT}$	$2.3 \times \text{PMT}$
ノイズレート	400kHz	700kHz
クロストークレート	5%	12%
アフターパルスを起こす確率	7%	17%
クロストーク+アフターパルス	10%	23%

表 3.4: 50 μm ピッチ 1.3mm × 1.3mm 角 MPPC 素子 基礎特性測定結果まとめ (温度 20°C)

1.3mm × 1.3mm 角 MPPC 素子の特性を測定した。測定された結果からゲイン、GOMI Connector を使用した時の PMT に対する獲得光量、クロストークレート、アフターパルスを起こす確率、及びクロストーク+アフターパルスについては、温度などの他の要因によらず ΔV のみによる特性である

ということがわかった。これらの特性が同じバイアス電圧でも温度によって変化しているように見えてくるのは、ブレイクダウン電圧 V_{bd} が温度によって変化することによって相対的に MPPC へかかっている ΔV が変化するためである。ブレイクダウン電圧の温度変化は、図 (3.11) にも挙げられている通り、 1°C 温度が下がるのに対し 0.06V 減少する。また、ノイズレートに関しては、温度によって変化することから熱電子由来であることがわかった。

従来の $1.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ 角 MPPC 素子と比較して、この $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ 角 MPPC 素子は獲得できる光量が約 25% 増加していることがわかった。面積が拡大したことによるノイズレートの増大も見られたが、それでもこの素子は各検出器からの要請に十分応え得る性能を有している。その他の基礎特性に変化は見られなかった。以上から、T2K 実験ではこの $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ 角 MPPC 素子を使用することを決定した。表 (3.4) へ $50\mu\text{m}$ ピッチ $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ 角 MPPC 素子についての特性を示す。温度は INGRID 検出器で予定されている温度域、 20°C のものを、 ΔV は、FGD で予定されている 1V と、INGRID で予定されている 1.5V での結果を示す。

第4章 アフターパルスに関する研究

前章で述べたとおり、MPPC の性能は INGRID、及び Off-axis 検出器からの要請を満たしている。だが、光検出器としての長期的な開発を考えると、さらなる特性の向上が望まれる。現在の素子で特に改善が望まれる特性であるアフターパルスについて、2 種類の特特殊な素子を用いて測定を行なった。

4.1 1 ピクセル素子を用いた測定

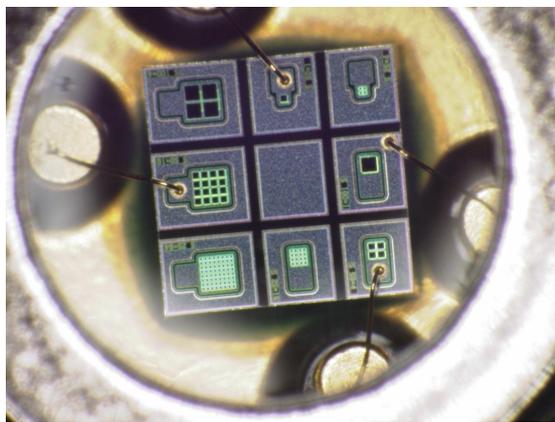


図 4.1: 少数ピクセル素子 顕微鏡写真

MPPC のアフターパルスを起こす確率を、3.6.2 章で測定した。しかし先述したとおり、この方法では 20 ナノ秒よりも短い時間スケールのアフターパルスを取ることができないために値を小さく見積もる可能性がある。そこで、アフターパルスを正確に評価するための特別な 1 ピクセルだけしか持たない素子を浜松ホトニクス社にいただいた。この素子では構造上クロストークが発生しないため、純粋にアフターパルスのみを測定することが可能である。なお、この素子は通常の MPPC と個々の APD ピクセルの構造は同一であり、ピクセル数だけが異なっている (付録 B 参照)。

4.1.1 測定結果

オシロスコープによる波形

まずはじめにオシロスコープでの波形を示す。図 (4.2) は $50\mu\text{m}$ ピクセル素子の $\Delta V = 1.5\text{V}$ の時の波形である。予想通り、2p.e. シグナル以上の波高を有するシグナルが全く見えていない。

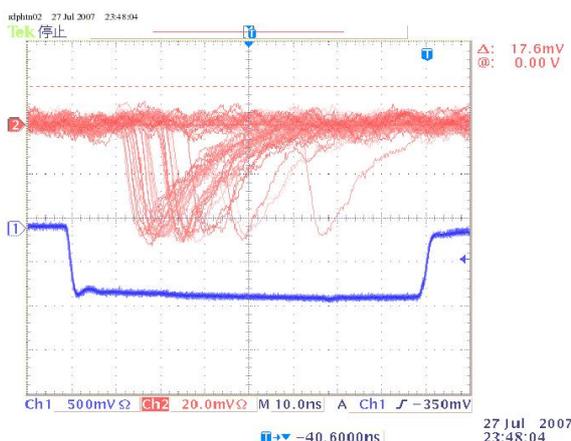


図 4.2: 1 ピクセル素子 ($50\mu\text{m}$) オシロスコープ波形

アフターパルス測定結果

1 ピクセル素子では、光源からの光で 1p.e. ピークを見るためには非常に大きな光を入れてやる必要がある。この時、光源の発光時間よりも APD ピクセルの回復時間が早ければ、再び光子を検知してガイガー放電を起こしてしまう可能性が考えられる。そのような現象をアフターパルスと識別することは不可能である。そのために今回は光源を用いず、熱電子ノイズによるセルフトリガーでの測定を行なった。また 1 ピクセルしかないが故に、ノイズレートは付録 B の図 (B.8) で示すように非常に小さく、最大でも約 200Hz 程度である。そのため、1 ゲート中にノイズが 2 回生じる可能性は、0.002% 未満であり無視できる。

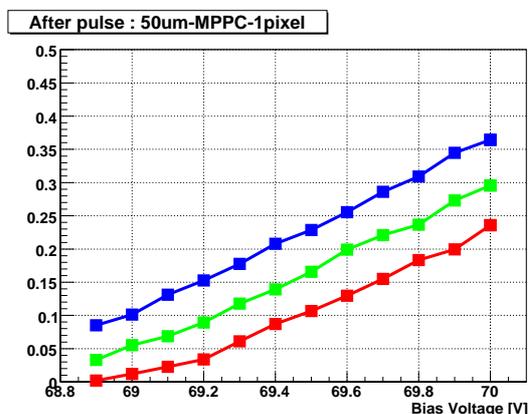


図 4.3: $50\mu\text{m}$ アフターパルス

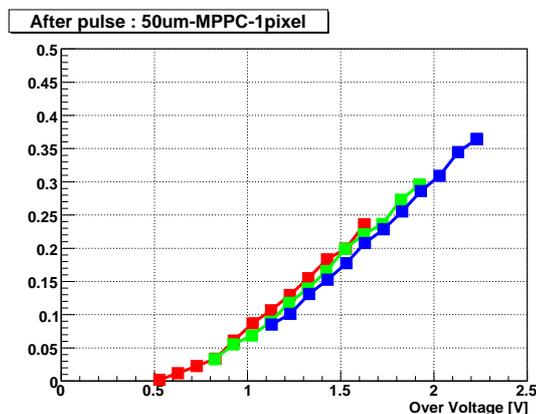


図 4.4: $50\mu\text{m}$ アフターパルス (横軸= ΔV)

ここで、ゲート幅は 80 ナノ秒に設定し、ADC 分布を用いてアフターパルスが起こる確率を測定した。クロストークは存在しないために、1p.e. を 2p.e. 以上に見せる事象は全てアフターパルス由来のものになる。図 (4.3)、図 (4.4) に $50\mu\text{m}$ ピッチ 1 ピクセル素子のアフターパルスが起こる確率の測定結果を示す。

4.1.2 多ピクセル素子におけるアフターパルスが起こる確率の測定の妥当性

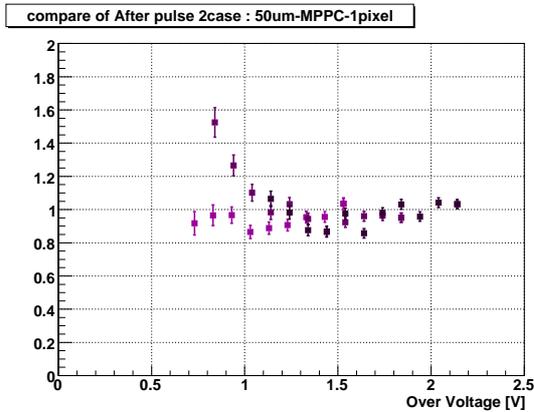


図 4.5: 50 μ m アフターパルス (400 ピクセル)/(1 ピクセル) : 比較結果

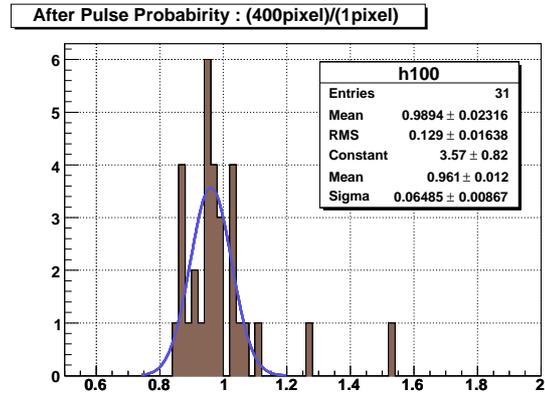


図 4.6: 50 μ m アフターパルス (400 ピクセル)/(1 ピクセル) 比の分布

少数ピクセル素子を用いてアフターパルスが起こる確率の絶対的な値を得ることに成功した。この値を、MPPC での測定結果と比較し、測定が妥当であるのかどうかについて見てみることにする。多ピクセル素子での結果は、図 (3.28)、図 (3.29) に示されている。2 つの素子の結果を、 ΔV が同じ点で比較する。図 (4.5) が、少数ピクセルの結果を 100% と見た時の 50 μ m ピッチの MPPC 素子のアフターパルスの比の値を示している。2 つの測定結果から、20 ナノ秒よりも短いアフターパルスをスケーラーを用いた測定では取り損なってしまうために MPPC での測定結果は約 4% 程、値が低く出てしまうということがわかった。

4.1.3 クロストーク・アフターパルス 比較

1 ピクセルサンプルを用いてアフターパルスを起こす確率を求めることができたので、この結果について 50 μ m ピッチ MPPC 素子のクロストークレート、及びクロストーク+アフターパルスを起こす確率の 2 つとの比較を行なう。横軸を ΔV にとり、1 ピクセル素子で求められたアフターパルス、MPPC で求められたクロストーク、及びクロストーク+アフターパルスの 3 つの測定結果を重ねたものを図 (4.7) に示す。暗色が MPPC のクロストーク+アフターパルス、青が MPPC のクロストークレート、赤が 1 ピクセル素子のアフターパルスが起こる確率を示している。クロストークレートとアフターパルスを起こす確率とを比較すると、後者の方が優位であるということがわかった。

型番	クロストーク	アフターパルス
50 μ m-MPPC-1pixel	50.5 \pm 2.7%	78.9 \pm 4.6%

表 4.1: クロストーク・アフターパルスそれぞれの、クロストーク+アフターパルスに占める割合

次に、クロストーク+アフターパルスが起こる確率 (暗色) を 100% とした時の、アフターパルスが起こる確率、クロストークレートの 2 つの挙動を求めてみた。図 (4.8) が 50 μ m ピッチ素子のクロストーク・アフターパルスの全体に対する割合の測定結果である。赤色が、(アフターパルス)/(クロス

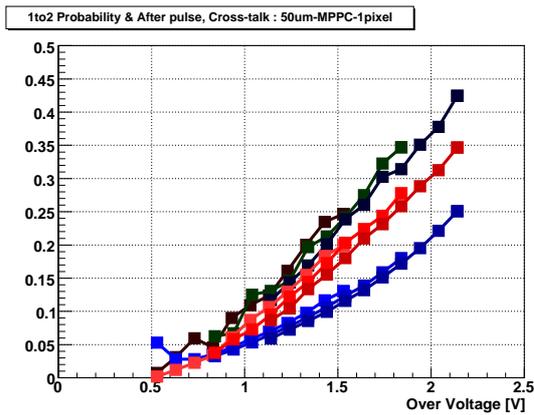


図 4.7: 50 μm クロストーク・アフターパルス測定結果。暗色 … クロストーク+アフターパルス・青 … クロストークレイト・赤 … アフターパルス。

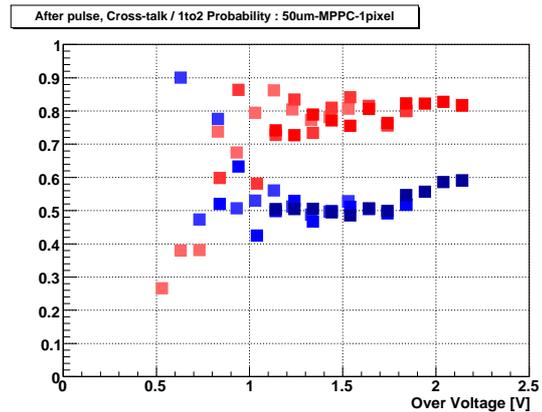


図 4.8: 50 μm クロストーク・アフターパルス割合。青 … クロストークレイト・赤 … アフターパルス。

トーク+アフターパルス)の測定結果、青色が、(クロストーク)/(クロストーク+アフターパルス)の測定結果になる。同じ結果を表(4.1)にもまとめた。以上の測定結果より、クロストーク+アフターパルスの中ではアフターパルスが優位であるということがわかった。

4.1.4 アフターパルスの時間構造の測定

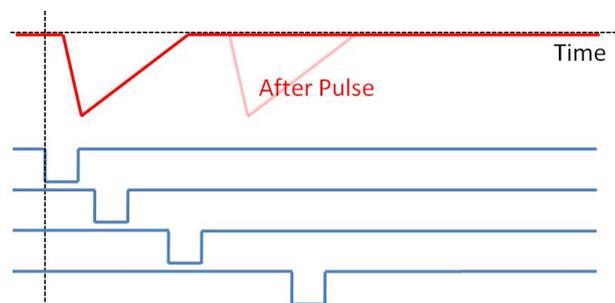


図 4.9: アフターパルスの時間構造の測定方法。徐々にゲートを遅らせていき、時間方向にスキャンを行なう。ここで、1ピクセル素子を用いるのでクロストークは存在しない。

1ピクセル素子を用いて、アフターパルスの時間構造を測定した。ここでは時間幅が20ナノ秒のゲートを用いて測定を行なう。この短い時間幅のゲートを用いて熱電子ノイズをトリガーに取り、時間方向にスキャンを行なうことでアフターパルスがどのような時間構造をもっているかを測定する。ピクセル数が1なので、ノイズ、クロストークの影響を差し引くことを考えなくても良い。図(4.9)で示すように、この短い時間幅のゲートをトリガー位置から時間方向にスキャンしていき、その位置でのアフターパルスを起こす確率を測定する。この測定結果を、横軸に時間、縦軸にアフターパルスによるシグナルが観測できた割合をとり解析を行なう。

ここで、アフターパルスが発生する確率は、

$$\text{After pulse} = A \exp\left(-\frac{(t - t_{AP})}{\tau_{AP}}\right) \tag{4.1}$$

のような時間構造になることが予想される。

本来ならば式 (4.1) のような形になるはずであるが、 t がごく小さいところでは APD ピクセルが元の状態にまで回復しないために、発生する電荷量が少なく識別ができない。この効果を式 (4.2) のような形であると仮定すれば、測定結果は式 (4.3) のような形になることが予想される。

$$\text{APD pixel Recovery} = B \exp\left(-\frac{(t - t_{re})}{\tau_{Rec}}\right) \tag{4.2}$$

$$\text{Result} = A \exp\left(-\frac{(t - t_{AP})}{\tau_{AP}}\right) - B \exp\left(-\frac{(t - t_{re})}{\tau_{re}}\right) \tag{4.3}$$

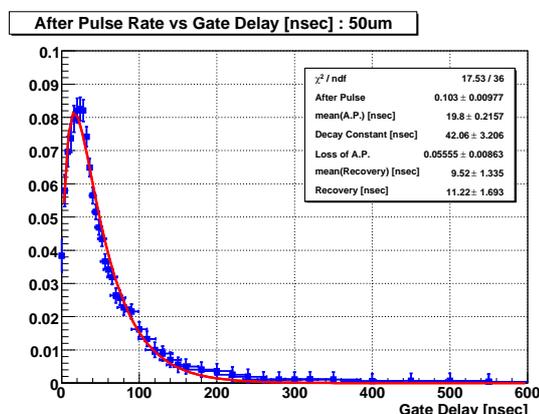


図 4.10: 50 μm アフターパルス 時間構造

型番	ピッチ長	τ_{AP}	τ_{re}
50 μm -MPPC-1pixel	50 μm	42.1 ± 3.2nsec	11.2 ± 1.7nsec

表 4.2: アフターパルス時間構造

結果を図 (4.10) に示す。赤い線が、式 (4.3) でフィットした結果を示している。式 (4.3) は測定結果とよく合っていることがわかる。結果より、アフターパルスは 100 ナノ秒以内の短い時間スケールに全体の約 90% が発生しているということがわかった。短い時間スケールにアフターパルスが集中していることから、MPPC のリカバリータイムをクエンチング抵抗の抵抗値が高いものを使用することで長くすることによって、アフターパルスを抑制することは可能であると予想される。

4.1.5 1 ピクセル素子 結論

1 ピクセル素子の測定によって、アフターパルスの絶対値を求めることができた。これによって今まで分離して見ることはできなかったクロストークとアフターパルスの両者の比較が可能になった。そ

の結果、アフターパルスが重きを担っているということがわかった。今後、もしこの 1p.e. シグナルを 2p.e. 以上のシグナルに見せてしまう効果を無くしてゆこうとするのならば、まずアフターパルスに照準を定めて対策を施していくのが妥当だということになる。また、多数のピクセルを擁する MPPC に関して求められたアフターパルスが起こる確率と、1 ピクセル素子での結果とを比較することで、4% 程度、スケーラーにおいてのアフターパルスの取り損ないが起こっていることがわかった。

また、1 ピクセル素子を用いてアフターパルスの時間構造の測定を行なった。この結果から、リカバリータイムを長くすることによってアフターパルスを減少させることは十分可能であると予想される。この可能性について、以下に続く 4.2 章で検証していくことにする。

4.2 高抵抗 MPPC 素子のテスト

4.2.1 動機、及び目的

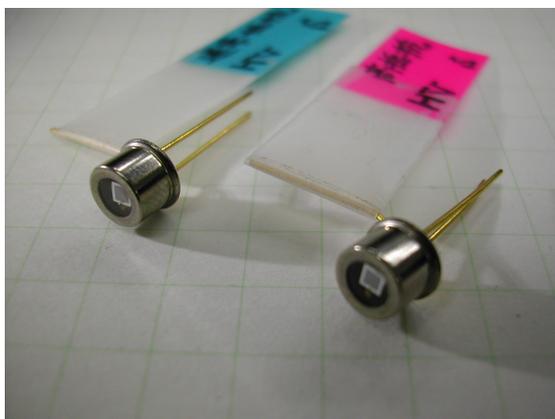


図 4.11: 通常抵抗 MPPC 素子 (左)・高抵抗 MPPC 素子 (右) 両者は共に缶パッケージである。

図 (2.6) で示すように、MPPC の各 APD ピクセルは近似的に抵抗とコンデンサーとが直列につながった回路図で表現される。クエンチング抵抗を高くすることでリカバリータイムを長くすることができ、その間に起こるアフターパルスを抑制することができる。そこで、クエンチング抵抗が通常の $110\text{k}\Omega$ よりも高い $190\text{k}\Omega$ の素子を用いて測定を行なった。

4.2.2 APD ピクセルの評価

2007 年 10 月に、クエンチング抵抗が通常よりも高い素子を浜松ホトニクス社に製作してもらった。この高抵抗素子について、通常抵抗の素子と比較しつつ測定を行なった。この素子は共に、 $1.3\text{mm}\times 1.3\text{mm}$ 角、 $50\mu\text{m}$ ピッチの MPPC である。以下の表 (4.3) に、浜松ホトニクス社のデータ表によるスペックを記す。

それぞれの波形をオシロスコープで観察してみる。図 (4.12)、及び図 (4.13) より両者のシグナルの波高・時間スケールは異なっていることがわかる。クエンチング抵抗が大きくなったことにより、シグナルの時定数が大きくなりシグナルがなまっていることがわかる。

型番	抵抗値	HPK 測定電圧	ゲイン	1p.e. ノイズレート	2p.e. ノイズレート
1003-10-50N-F No.4	110kΩ	69.41V	7.50×10^5	1435kHz	103kHz
1008-10-50N-F No.1	190kΩ	70.14V	7.48×10^5	1000kHz	55kHz

表 4.3: 通常抵抗 MPPC 素子測定結果・高抵抗 MPPC 素子 基礎データ表スペック

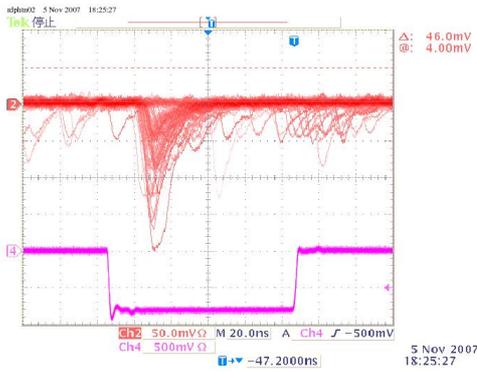


図 4.12: オシロスコープ波形 通常抵抗

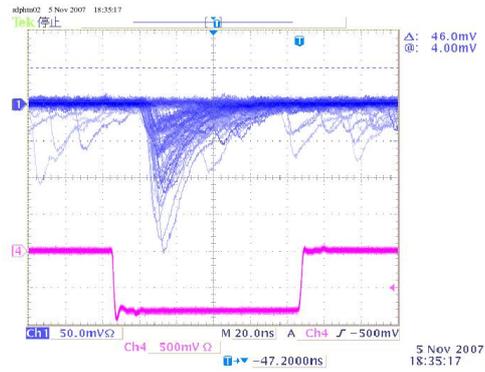


図 4.13: オシロスコープ波形 高抵抗

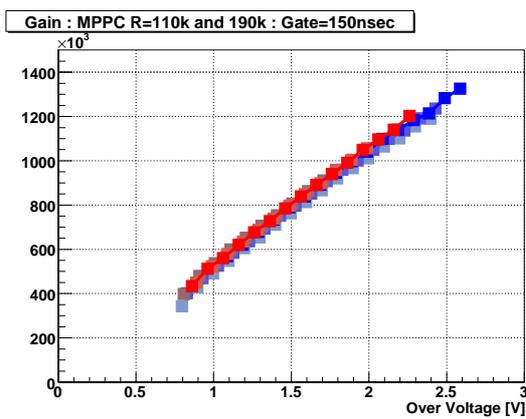


図 4.14: 通常抵抗 MPPC 素子 (青)・高抵抗 MPPC 素子 (赤) ゲイン測定結果 (横軸=ΔV)

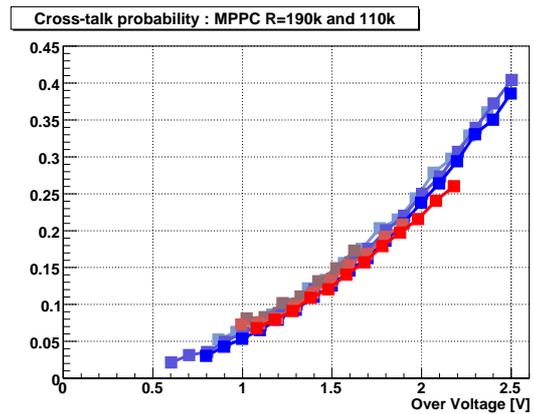


図 4.15: 通常抵抗 MPPC 素子 (青)・高抵抗 MPPC 素子 (赤) クロストークレート (横軸=ΔV)

まず、アフターパルス以外の測定を行なった。図 (4.14) に 2 種類の素子のゲインの測定結果を、図 (4.15) へクロストークレートの測定結果を示す。青色が通常抵抗素子の測定結果、赤色が高抵抗素子の測定結果になる。この 2 つの特性について、両者は同等の特性を持つことがわかった。すなわち、APD ピクセルとしては同じものを使用しているということが確認された。

110kΩ	1003-10-50N-F	No.4	190kΩ	1008-10-50N-F	No.1
温度 [°C]	キャパシタンス [fF]	V_{BD}	温度 [°C]	キャパシタンス [fF]	V_{BD}
15	84.48 ± 0.54	67.42 ± 0.01	15	85.60 ± 0.53	68.14 ± 0.01
20	83.94 ± 0.67	67.69 ± 0.01	20	85.43 ± 0.51	68.41 ± 0.01
25	80.81 ± 1.26	67.89 ± 0.03	25	85.89 ± 1.07	68.69 ± 0.02

表 4.4: 通常抵抗 MPPC 素子・高抵抗 MPPC 素子 ゲイン測定結果

4.2.3 通常抵抗・高抵抗、両者のアフターパルス時間構造の測定

通常抵抗 MPPC 素子・高抵抗 MPPC 素子、両者のアフターパルスが起こる確率の時間構造について、1 ピクセル素子の時と同じ方法で測定を行なった。また、ここではクロストークの影響を除くために、図 (4.16) のような回路を組み、2p.e. 以上のシグナルについて veto をかけ測定にかからないようにしている。オシロスコープでの波形、図 (4.17) を見てみればわかるとおり、1p.e. シグナルのみにトリガーがかかっている。

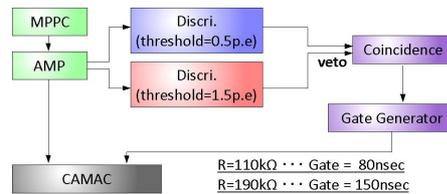


図 4.16: 通常抵抗 MPPC 素子・高抵抗 MPPC 素子 アフターパルスの時間構造の測定回路図

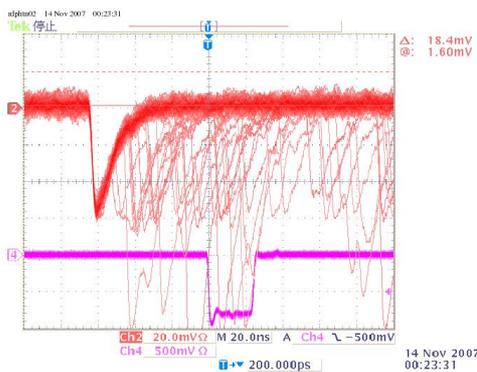


図 4.17: オシロスコープ波形 クロストークによる 2p.e. シグナルを除去できている

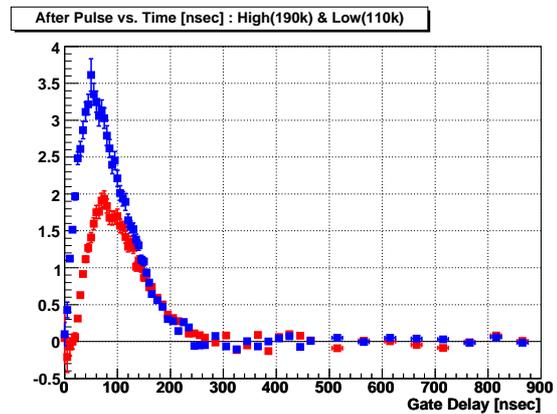


図 4.18: 通常抵抗 MPPC 素子 (青)・高抵抗 MPPC 素子 (赤) アフターパルス時間構造 測定結果。

図 (4.18) にアフターパルスの時間構造についての測定結果を示す。青色が通常抵抗 MPPC 素子での測定結果、赤色が高抵抗 MPPC 素子での測定結果である。リカバリータイムを長くすることによ

て、応答の速いアフターパルスを抑制する効果が見えている。また、グラフ右側の時間の遅いテール部分は、同じ APD ピクセルを使用していること、アフターパルスの発生のメカニズムが抵抗値によらないことから同じ挙動を示している。

4.2.4 アフターパルス測定

アフターパルスの時間構造について、通常抵抗 MPPC 素子の 1 ピクセルデバイスで測定した結果をここでもう一度参照する。この結果から、高抵抗 MPPC 素子のアフターパルスの時間構造を予測する。グラフ右側の時間の遅いテール部分は同じと考えられるので、 τ_{AP} に関しては同じ値とする。一方で、 τ_{re} は 1p.e. シグナルの構造による値であり、抵抗値 R に比例することから通常抵抗 MPPC 素子の値に (190/110) をかけた値とする。表 (4.5) にその予想値をまとめる。

型番	抵抗値	τ_{re}	τ_{AP}
1003-10-50N-F No.4	110k Ω	11.22nsec	42.06nsec
1008-10-50N-F No.1	190k Ω	19.38nsec	42.06nsec

表 4.5: 通常抵抗 MPPC 測定結果・及び高抵抗 MPPC 予想値

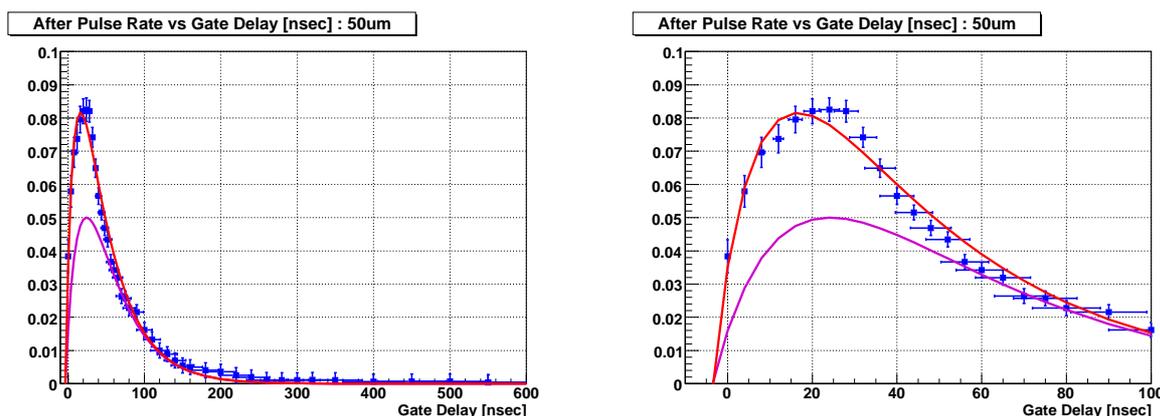


図 4.19: 通常抵抗 MPPC 素子によるアフターパルスの時間構造の測定から、高抵抗 MPPC 素子でのアフターパルスの挙動を予想する。 τ_{re} だけが (190/110) 倍になっていると考えれば、紫の線のようになることが予想される。

1 ピクセルの測定結果、図 (4.10) へ高抵抗素子について予想したものを紫の線で重ねたものを図 (4.19) へ示す。この予測結果は、前項で述べた時間構造と同じ挙動を示している。この分布を時間積分することで、アフターパルスを起こす確率を求め両者の比をとると、高抵抗素子でアフターパルスが起こる確率は通常の素子の 73.6% と予想される。

高抵抗 MPPC 素子と通常抵抗 MPPC 素子とでアフターパルスを起こす確率を測定し、予想と比較する。しかし、高抵抗 MPPC 素子ではオシロスコープで確認したように、1p.e. シグナルがなまってしまうためにスケーラーを用いての測定では閾値の設定が難しく、測定による誤差が大きくなってしまふ。ここではクロストーク+アフターパルスを起こす確率に関して測定、比較を行なった。測定は、3.6.3 章で説明されたとおり、ADC 分布からポアソン分布を仮定することで求められる。図 (4.20) に

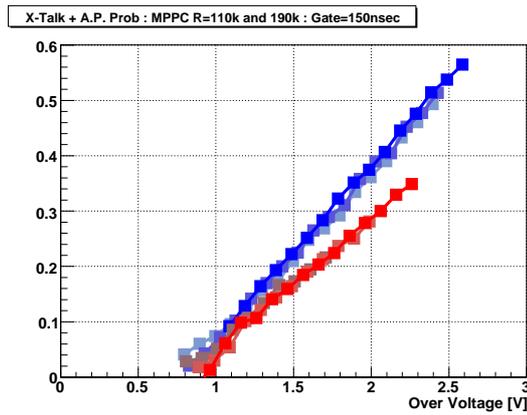


図 4.20: 通常抵抗 MPPC 素子・高抵抗 MPPC 素子 クロストーク+アフターパルス測定結果 (横軸 = ΔV)。青・・・通常抵抗・赤・・・高抵抗。

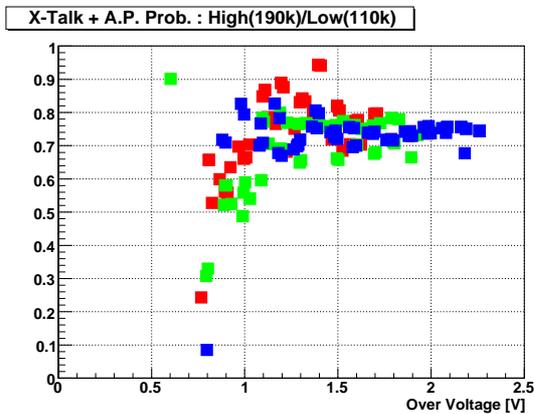


図 4.21: 通常抵抗 MPPC 素子・高抵抗 MPPC 素子 クロストーク+アフターパルス 両者の比率 測定結果 (横軸 = ΔV)

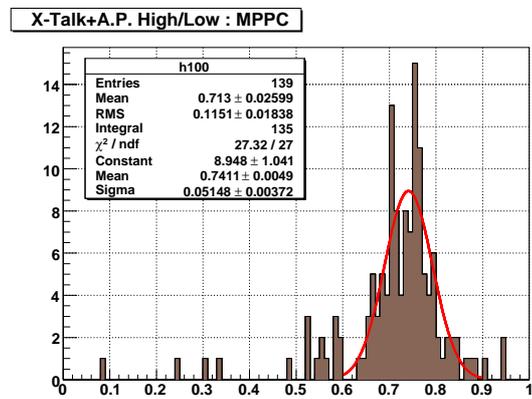


図 4.22: 通常抵抗 MPPC 素子・高抵抗 MPPC 素子 クロストークレート+アフターパルス 両者の比率 ヒストグラム

測定結果を示す。青いグラフが通常抵抗 MPPC 素子での測定結果・赤いグラフが高抵抗 MPPC 素子での測定結果になる。比較のために横軸は ΔV で取っている。クエンチング抵抗を高いものに変えることで、優位に差が見られることがわかった。通常抵抗素子での値を 100% と見た時の、高抵抗素子での値を、図 (4.21) にまとめる。高抵抗素子でのクロストーク+アフターパルスが起こる確率は、通常抵抗素子の 74.1% であり、1 ピクセル素子の測定結果を用いた予想と一致することがわかった。

4.2.5 高抵抗 MPPC 素子 結論

ここまで高抵抗 MPPC 素子について測定を行ない、通常の抵抗を持つ MPPC 素子と比較してその特性を評価してきた。クエンチング抵抗を高いものに変えることによって、リカバリータイムを長くすることができ、それによって応答の速いアフターパルスを抑制できることを示した。測定されたクロストーク+アフターパルスが起こる確率の減少量、時間構造などは、通常抵抗の素子を用いて予測

されたものと一致することを示した。クエンチング抵抗の抵抗値によるアフターパルスを起こす確率の変化は、良い精度で予測できることがわかった。

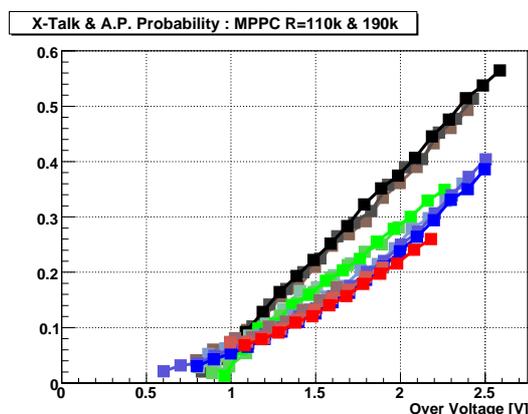


図 4.23: $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ 角 $50\mu\text{m}$ ピッチ 通常抵抗 MPPC 素子・高抵抗 MPPC 素子 クロストーク・アフターパルス 測定結果まとめ (横軸= ΔV)。暗色 … 通常抵抗クロストーク+アフターパルス・緑 … 高抵抗クロストーク+アフターパルス・青 … 通常抵抗クロストークレート・赤 … 高抵抗クロストークレート。

図 (4.23) に、クロストークレート、アフターパルスを起こす確率の測定結果をまとめる。黒が通常抵抗 MPPC 素子の、緑が高抵抗 MPPC 素子のクロストーク+アフターパルスが起こる確率を示しており、青が通常抵抗 MPPC 素子の、赤が高抵抗 MPPC 素子のクロストークレートを示している。高抵抗 MPPC 素子に関して、クロストーク+アフターパルス確率とクロストークレートとを比較すると結果はほぼ同程度になることがわかる。190k Ω の時点で既にクロストークの側が大きく効いてきていることがわかる。このことから、これ以上抵抗値を上げアフターパルスを抑制しても、クロストークが支配的になってしまうため ADC 分布で見た時にはあまり変化は見られなくなると考えられる。

第5章 MPPC 性能評価システムの構築

T2K 実験は、MPPC を用いる世界初の大規模実験であり、総数約 60,000 個の MPPC が前置検出器に使用される。この中で、京都大学では INGRID に使用されるものの半分と、FGD に使用される分、合計 15,000 個の MPPC の特性を評価する。

T2K 実験で用いられる 15,000 個の $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ 角 MPPC 素子は 2008 年 2 月から納入が開始される予定であり、実機のスケジュールへ間に合わせるためには約 6ヶ月でその全てについて性能を評価しなければならない。多数の MPPC を同時に測定できるよう、フェルミ国立加速研究所で製作された Trip-t チップを使用した MPPC の読み出しエレクトロニクスを開発した。Trip-t チップは 32 個の入力シグナルをシリアル化することで、測定チャンネルの必要数を減らすことができる。我々は Trip-t チップを搭載し 32 個の MPPC の同時測定が可能な基板を作成し、実際に T2K 実験で使用される MPPC のテストのための性能評価システムを構築した。

5.1 測定項目

この性能評価システムでの測定項目として、以下の 4 つの特性を選択した。

1. ゲイン (ブレイクダウン電圧)
2. 獲得できる光量
3. ノイズレート
4. クロストーク+アフターパルスを起こす確率

それぞれの特性について電圧依存性を測定する。また温度依存性を調べるため、全ての測定は 15°C ・ 20°C ・ 25°C の 3 点での温度において繰り返すこととした。また、ここでは GOMI Connector を用いて光量の測定を行なう。

しかし、スケーラーを用いてのノイズレートの測定は多量の MPPC 素子の測定に際しては難しい。ADC 分布を用いてノイズレートを測定する方法について考察した。

ゲート幅を 800 ナノ秒に設定し、光源無しのランダムゲートでとった ADC 分布を図 (5.1) へ示す。ノイズのみを測定した場合でも、MPPC による 1p.e. ピークが確認できることがわかった。クロストークとアフターパルスとの影響を取り除くために、得られた ADC 分布から 0p.e. に立つピークの個数だけを見る。このペダスタルのイベント数を用いて、ポアソン分布を仮定することによって実際の各光電子数の位置に立つピークの個数を計算することができる。この計算された値を用いて、1p.e. ノイズレートを定義する。

$$\text{Noise rate} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n \times N_n}{\text{Time} \times \text{events}} = \frac{-\ln(N_0/\text{events})}{\text{Time}} \quad (5.1)$$

N_n = Estimated value of n p.e. events

Time = Gate length [sec]

events = Total events

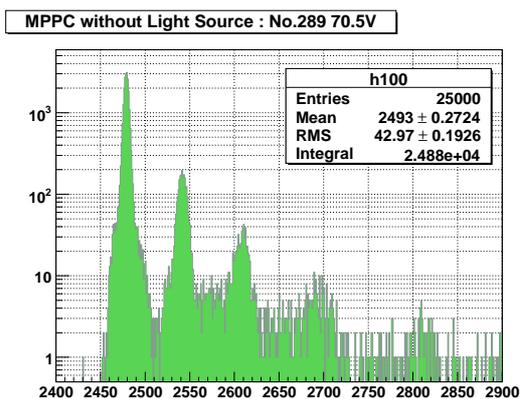


図 5.1: ランダムトリガーに設定しノイズのみを測定した時の ADC 分布。縦軸は対数表示に取っている。用いたゲート幅は 800 ナノ秒。

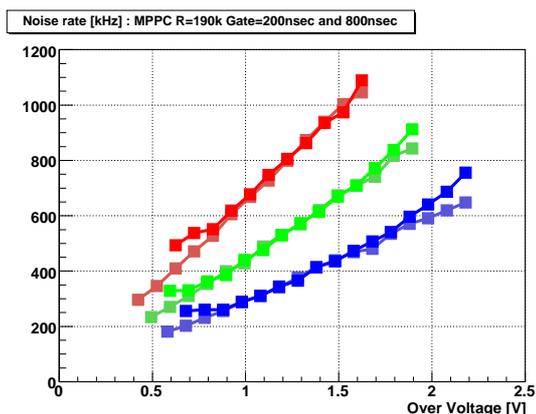


図 5.2: 異なるゲート幅によるノイズレート測定結果 (横軸= ΔV)。濃 … 200nsec・淡 … 800nsec。

以上の定義を定式化すると、式 (5.1) になる。この定義では、ゲート幅をいくらに設定しようとも測定されたノイズレートは等しくなるはずである。図 (5.2) に、同一の素子でゲート幅を 200 ナノ秒と 800 ナノ秒とにとった時の結果を示す。両者の結果は良く一致している。

5.2 セットアップ

5.2.1 セットアップ全体図

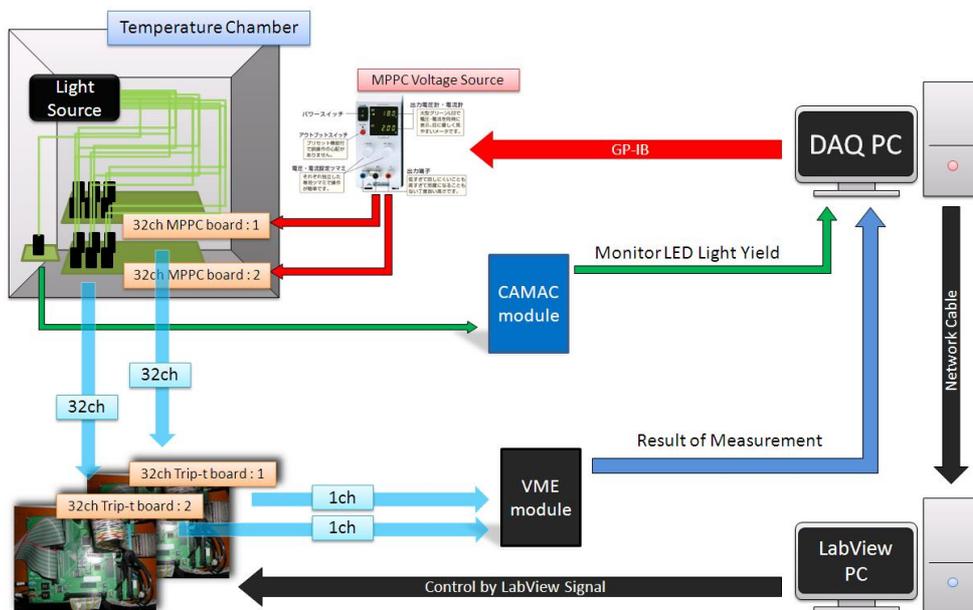


図 5.3: T2K 実験用 MPPC 素子 性能評価システム概要図

図(5.3)にセットアップの全体図を示す。今回の MPPC 性能評価システムは大きく分けて以下の要素からなっている。

- DAQ 用 PC
恒温槽を除く全ての機器の制御を司る PC。システムの中核を為す。この PC から、MPPC 電源・LabView PC・VME・CAMAC への制御信号が放たれる。
- LabView PC
National Instruments 社製 PXI-1042Q モジュール。Trip-t ASIC チップの制御を司る。DAQ 用 PC からネットワークケーブルを介して信号を受け取り、Trip-t チップのゲイン・用いるゲート幅・光源の有無・VME へのトリガー信号の供給などの設定を行なっている。
- MPPC 電源
松定プレジジョン社製、PL-120-0.6。32 × 2 = 64 個の MPPC へ同じ電圧を供給する。GP-IB 接続により DAQ 用 PC とつながっており、DAQ 用 PC から電源の設定を行なう。また GP-IB 制御には、同社の GP-32 モジュール、及び GP-PL モジュールを用いた。
- VME
VME6U DAQ ボード。2 枚の DAQ ボードを使用して 64 個の MPPC の同時測定を行なう。
- CAMAC
光源から供給される光量のモニターを行なう。この MPPC のみ別電源で使用する。測定の全工程において、同じ MPPC を同じ設定で使用し、測定ごとの光量のばらつきを測定する。この MPPC で測定された値を用いて、各チャンネルへ光源から移送された光量の補正を行なう。
- 32 チャンネル Trip-t ボード
Trip-t ASIC チップを搭載する 32 個の MPPC の同時測定に対応する基板。今回はこの基板を 2 枚同時に使用し、64 個の MPPC の同時測定を行なう。LabView PC からの論理信号を用いて Trip-t チップの設定を行なう。設定は、1 個のモジュールからの信号を途中で分割し、2 枚の基板上の Trip-t へ移送する。
- 恒温槽
SANYO 製 インキュベーター (低温恒温器) MIR-153。3 段階でのプログラム運転が可能。
- 光源

5.2.2 Trip-t



図 5.4: Trip-t ASIC チップ

本測定では、T2K 実験において MPPC の読み出しに使用されることが決定している Trip-t (TRIGGER and Pipeline with Timing) という ASIC (Application Specific Integrated Circuit) チップを用いた基板を使用して測定を行なった。Trip-t を用いることによって、32 個の MPPC からのシグナルを同時に読み出すことができる。32 個の各入力チャンネルに入力されたシグナルはフロントエンドに配置されたアンプにおいて増幅され、読み出す前段階としてパイプラインに保管される。パイプラインの深さは 1~48 に設定可能である。保管されたシグナルは、次に

Trip-t の最後段に位置するマルチプレクサによって 1 チャンネルへシリアル化される。これによって

Trip-t は入力チャンネルの個数を 32 から 1 へと減少させることができる。Trip-t には 3 種類の出力が存在している。

- A OUT : 32 個の入力強度に対応するシリアル化されたアナログシグナル。
- T OUT : 32 個のゲートとシグナルとの時間差に対応するシリアル化されたアナログシグナル。
- D OUT : 各入力チャンネルに対応するデジタル化されたシグナル。

A OUT は各入力シグナルの電荷の情報を有する出力であり、T OUT は入力シグナルの時間の情報を有する出力である。Trip-t には 14 のパラメーターが存在しており、それらによって Trip-t の測定ステータスが決定される。それらはレジスターをプログラミングすることによって設定することができる。Trip-t は、DØ 実験の VLPC(Visible Light Photon Counter)[18] の読み出しに使用された ASIC であり、MINERνA 実験 [19]、そして T2K 実験に使用が予定されている。

5.2.3 32 チャンネル Trip-t ボード



図 5.5: 32 チャンネル Trip-t ボード 左=MPPC 設置用基板・右=Trip-t 搭載シリアル化用基板

本測定では高エネルギー加速器研究機構で開発された 32 チャンネル Trip-t ボードを用いて測定を行なう。このボードの回路図を、付録 G へ示す。このボードを使用することにより、32 個の MPPC に関して同時に測定することが可能である。

今回の測定で使用した基板を、図 (5.5) に示す。左側のものが MPPC マウント用、右側のものが 32 チャンネル Trip-t ボードである。32 個の MPPC は各々 MPPC マウント用の基板に設置される。各 MPPC からの出力シグナルは、MPPC マウント用の基板からフラットケーブルを通じ 32 チャンネル Trip-t ボードへと送られる。MPPC マウント用ボードと Trip-t ボードとの間は AC カップリングを行なうことで、後段の電子回路の入力を保護している。AC カップリングのための抵抗、及びコンデンサーには、100k Ω 、100nF のものをそれぞれ採用した。

Trip-t は、33 の入力に対応している。その内で Trip-t チップのゲイン校正用のチャンネルが 1 チャンネル用意されており、MPPC 用には 32 のチャンネルが存在する。MPPC の入力はこのボードの左

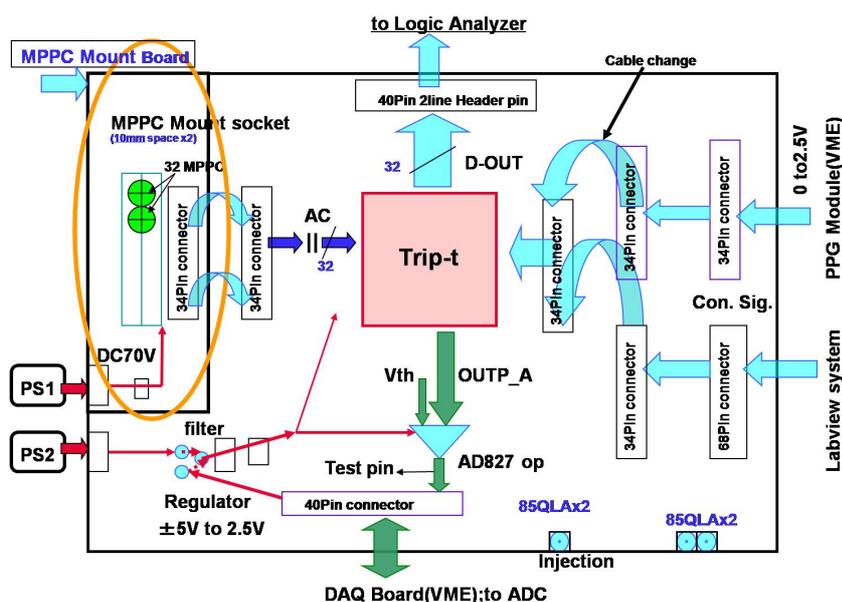


図 5.6: Trip-t ボード ブロックダイアグラム

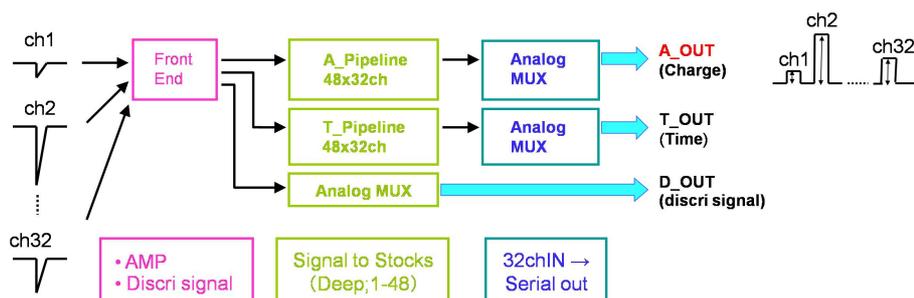


図 5.7: Trip-t ブロックダイアグラム

側から行なわれ、ボードの右側からは Trip-t チップのコントロールを行なうシグナルが、LabView PC から入力される。

32 チャンネル Trip-t ボードの回路のブロックダイアグラムを図 (5.6) に示す。Trip-t チップは +2.5V をかけることで動作する。また同一の基板上にオペアンプ (型番:ANALOG DEVICES AD827) も付随しており、これには $\pm 5V$ を印加している。このオペアンプは、 $\sim M\Omega$ のオーダーである Trip-t の A OUT のインピーダンスを VME モジュールの設定に合わせるために付属している。Trip-t のゲインが十分に高いために、オペアンプのゲインは 1 に設定している。このテストボードではレギュレーターを使用し、供給された $\pm 5V$ から +2.5V を作成し Trip-t チップへ、 $\pm 5V$ をオペアンプへ供給する構造をとっている。

図 (5.7) に Trip-t チップのブロックダイアグラムを、図 (5.8) に Trip-t チップの読み出しシーケンスを示す。図で示されるようにして 32 個の MPPC からのシグナルはシリアル化され、後述する VME の DAQ ボードによってデジタル変換されて読み出される。

今回の測定ではこの 32 チャンネル Trip-t ボードを 2 枚使用することによって、64 個の MPPC が同

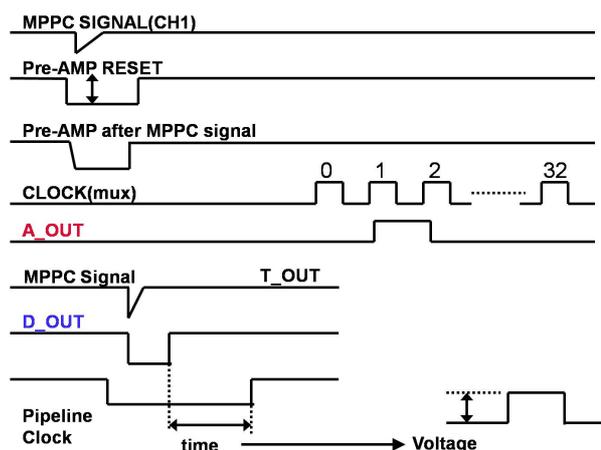


図 5.8: Trip-t 読み出しシーケンス



図 5.9: 2 枚の 32 チャンネル Trip-t ボードを使用
 してのセットアップ図。LabView PC からのケー
 ブルは下の基板に接続し、そこから 2 つに分割さ
 せることで上の基板にも信号を移送している。

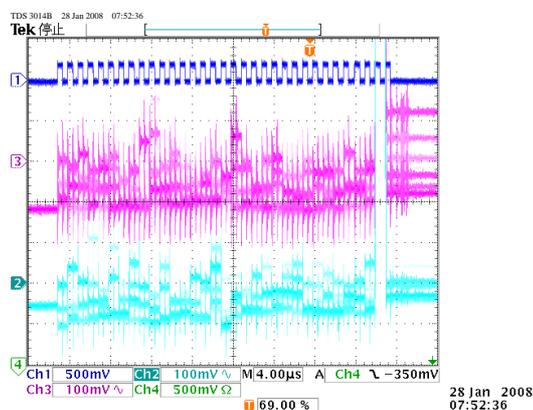
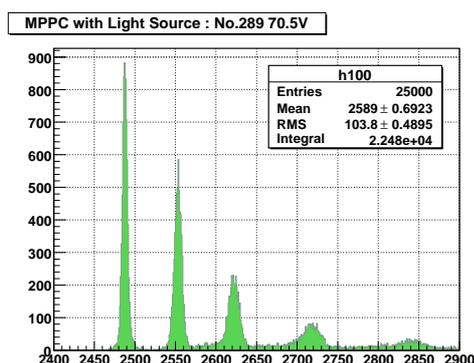


図 5.10: Trip-t A OUT 出力 オシロスコープ
 波形 × 2 枚。計 64 個の MPPC からのシグナルを
 確認することができる。

時に測定できるようにした。2 枚のボードを用いたセットアップを図 (5.9) に示す。2 枚の Trip-t ボードはスペーサーによって重ねられている。1 台のモジュールからのシグナルを途中で 2 つに分割し、2 枚の Trip-t チップへは同じシグナルを移送している。つまり上下の Trip-t は同じ設定で動作することになる。図 (5.10) に、32 チャンネル Trip-t ボードによってシリアル化された A OUT の波形を示す。ここでは 2 枚の Trip-t ボードからの出力を示している。シリアル化されたシグナルは、矩形波になって対応する論理信号と同期するように見えてきている。32 個の MPPC からのシグナルを、1 チャンネルへシリアル化できていることが確認できた。2 枚のボードを使用することで、64 個の MPPC からの信号を読み取ることができていることがわかる。また、VME モジュール、Trip-t チップを用いた際の ADC 分布を図 (5.11) へ示す。CAMAC ADC とは異なり、ペDESTAL によるピークが約 2000 付近に立っていることが確認できる。

図 5.11: ADC 分布 : $\Delta V = 1.5V$

5.2.4 LabView PC

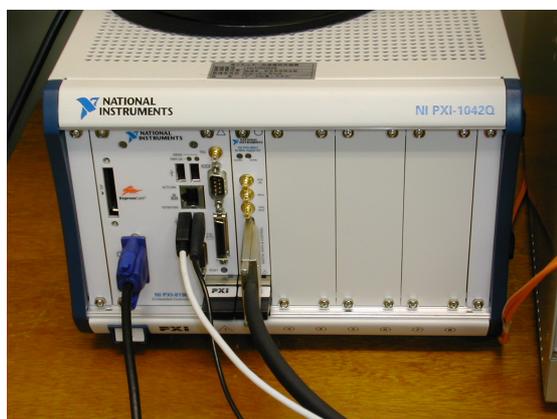


図 5.12: LabView PC。National Instruments 社製 PXI-1042Q モジュール。

Trip-t チップの制御に使用した National Instruments 社製 PXI-1042Q モジュールを図 (5.12) に示す。本論文内ではこのモジュールを LabView PC と呼ぶ。

このモジュールから送られる信号を用いて、Trip-t チップのゲイン、用いるゲート時間幅の設定を行ない、LED トリガー、VME トリガー信号も制御する。LabView PC 自体は DAQ PC とネットワークケーブルを介して接続されており、DAQ PC によって制御されている。Trip-t チップ、及び DAQ ボードを含む読み出しシステムのイメージを図 (5.13) に示す。

5.2.5 VME6U DAQ ボード

図 (5.14) に示された今回使用した DAQ ボードは、K2K 実験での SciBar 検出器用に開発された VME モジュールである。SciBar 実験では、VA チップによってシリアル化された 64 チャンネル MAPMT(Multi-Anode PMT) からのシグナルの読み出し、及び VA チップによる読み出しシーケンスの操作に使用されていた。この DAQ ボードを、Trip-t からの A OUT アナログ出力信号のデジタ

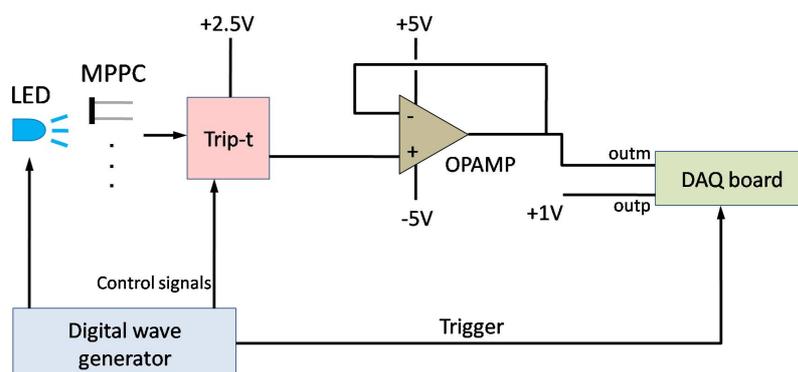


図 5.13: Trip-t チップ、及び DAQ ボードを含む読み出しシステムのイメージ図。青色 LED から光を MPPC を用いて検知し、その出力信号を Trip-t チップでシリアル化、オペアンプを用いて A OUT の出力を DAQ ボードの outm へ入れた。一方で個別に作成した+1V を outp へ入れ、その差を見る。最終的に DAQ ボード上の flash ADC においてデジタル変換する。

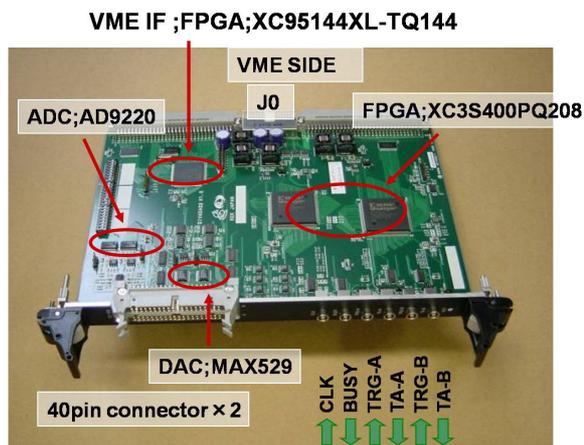


図 5.14: VME6U DAQ ボード

ル変換に使用した。DAQ ボードと Trip-t テストボードとの接続には 1m のフラットケーブルを使用する。MPPC、Trip-t から仕様に合うよう幾つか DAQ ボード側に変更を加えた。

- A OUT は DC 1V のオフセットの上に乗っている。そのため、A OUT を DAQ ボードの “outm” へ、DC+1V を別に作成し “outp” へそれぞれ入力し、DAQ ボードにおいてその差を見ることがすることで DC オフセットを消去した。
- DAQ ボードのゲインを 20 から 1 へ変更した。これは Trip-t のゲインが十分に高いためである。

本測定トリガーレートは約 1kHz であり、これは DAQ ボードによって決まっている。

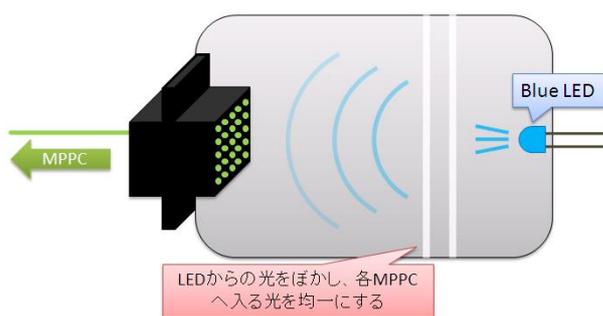


図 5.15: 光源 概念図



図 5.16: 光源

5.2.6 多量 MPPC 素子 同時測定用光源

今回の測定で使用する光源の概念を図 (5.15) へ示す。青色 LED からの光を半透明のプラスチック板を用いて拡散させ、波長変換ファイバーを用いて各 MPPC へ配分する。LED とファイバーとの相対的な距離はプラスチックケースによって固定し、MPPC の換装時などに光源が動いて再現性を損なうことを防ぐ。波長変換ファイバーは、光源側ではクッキーを使用して 64 本を束ね、光が均一に入るように設置する。波長変換ファイバーは約 500mm の長さに設定した。また、MPPC 側は、付録 D で紹介した GOMI Connector を用いて接続することによって測定条件を実機と同一にした。光源の実際の写真を図 (5.16) へ示す。

今回の測定における光量の分布を、図 (5.17) に示す。各 MPPC へ導かれる光量は、場所に依らず揃っていることがわかった。各チャンネルにおける光量の比を、図 (5.18) に示した。

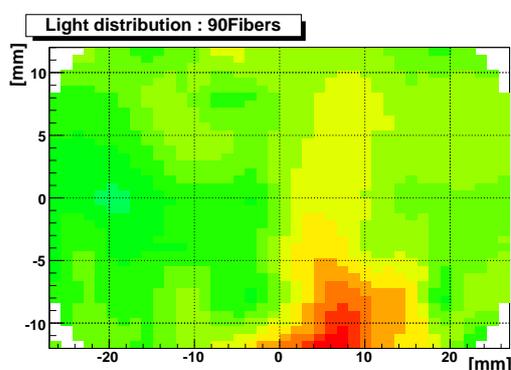


図 5.17: 本測定に使用する光源での、光量の空間分布

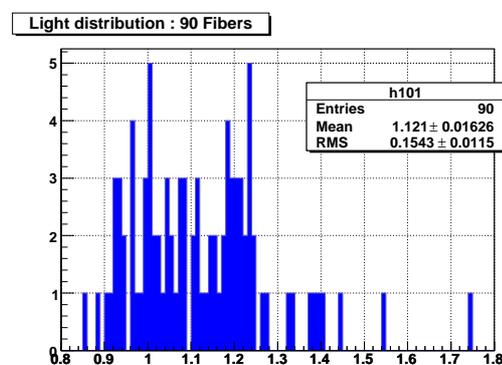


図 5.18: 各チャンネルへ導かれる光量の比

5.3 測定手順

このテストでは T2K 実験で使用する MPPC 素子の測定を行なう。用いる MPPC 素子のロットナンバーは S10362-13-050CK であり、全て 1.3mm × 1.3mm 角である。2008 年 2 月より、5,000 個/月のペースで京都大学に送られてくる予定である。ここでは測定の手順に関して報告する。

測定の前に MPPC ヘタグ付けを行なう。MPPC の特性は ΔV によって決定される。あまりにブレイクダウン電圧の異なる MPPC 素子を同時に測定しようとする、付加させる電圧の範囲が大きくなってしまい測定時間が増加し、また異常に高い電圧を MPPC に付加してしまう可能性がある。それを避けるために、浜松ホトニクス社から添付されてくるデータ表を元に 5,000 個の MPPC をブレイクダウン電圧が低いと予想される順に並び変える。タグ付けと平行して MPPC 素子を、治具¹を用いて GOMI Connector にインストールする。この時、GOMI Connector の外側に識別のためのシールを貼る。

測定手順を述べる。

1. 測定を行なう 64 個の MPPC を、2 枚の MPPC マウント用基板上に並べ、各チャンネルに対応する波長変換ファイバーと GOMI Connector を用いて接続する。
2. 恒温槽の温度を設定する。本測定では、MPPC 素子の温度特性も調べる。そのため、 25°C ・ 20°C ・ 15°C の 3 点で測定を行なう。この温度値は、INGRID 検出器で予定されている 20°C を基本に決定した。
3. 恒温槽の温度が設定値になった後、MPPC 素子のノイズレートについて、電圧依存性を測定する。ノイズレートの測定のため、光源は OFF にして測定を行なう。
 - (a) LabView PC から信号を送り、Trip-t のゲインを設定する。また、ゲート幅を 800 ナノ秒に、LED トリガーを OFF に設定し、VME トリガーを送る。
 - (b) MPPC へ電圧を印加し、ADC 分布をとる。MPPC の電圧依存性を調べるため、電圧を変えながら測定を行なう。本測定では、予想されたブレイクダウン電圧から ΔV が 0.5V から 2.0V までの範囲を目安に測定範囲を決定する。この範囲を、0.1V 刻み、15 点において測定を行なう。また、各点では 25,000 イベントまで統計を貯める。これは、光源無しでの測定では 1p.e. イベントが非常に小さいためにある程度統計が必要になること、及び時間的な面から決定している。今回の Trip-t ボードを使用した測定システムでは、この 15 点での測定に約 8 分程度の時間を必要とする。
 - (c) 測定終了後、LabView PC からのトリガー信号を停止する。
4. 次に光源を ON に設定を変え、ゲイン、獲得できる光量、クロスオーク+アフターパルスを起こす確率の測定を行なう。
 - (a) まずはじめに CAMAC ADC を用いて各測定時ごとの光量のチェックを行なう。これは、測定ごとに LED の光量がばらついていて、補正を行なうためのものである。測定には既知の MPPC を使用する。別電源を用意し、常に同じ電圧値で測定を行なう。
 - (b) LabView PC から信号を送り、Trip-t のゲインを設定する。また、ゲート幅を 200 ナノ秒に、LED トリガーを ON に設定し、VME トリガーを送る。
 - (c) 先程と同様に MPPC へ電圧を印加し、ADC 分布をとる。電圧範囲、イベント数などの条件は先程と同じである。
 - (d) 測定終了後、LabView PC からのトリガー信号を停止する。
5. 以上で、その温度域での測定は終了である。手順 2 へ戻り、次の温度域に設定を変更し、再び恒温槽内部が設定温度に安定するまで待機する。
6. 3 点の温度での測定が終了した後、恒温槽を止め、MPPC を換装する。

以上の手順をもって、1 回の測定が終了する。1 回の測定には、約 3 時間の時間を要する。これは恒温槽からの要請から決定している (5.4.4 章参照)。

¹ 永井直樹 (京都大学大学院理学研究科 高エネルギー物理学研究室 修士一年) が設計・開発・作成した。

5.4 自動測定システム

5.4.1 目的

本測定では全数で 15,000 という膨大な数の MPPC のテストを行わなければならない。そのためには前項で述べた手順を自動化し、人為的な労力を軽減すると共に人為的なミスの入る余地を限りなく減少させることが必要である。測定手順の中で以下に示す項目に関して自動化を行なう。

- MPPC 電源の設定
上記の手順 3b、手順 4c にあたる。DAQ PC からの GP-IB 接続を用いて、MPPC 電源の電圧の設定を行なう。
 - 光源の ON・OFF
 - 用いるゲート時間幅の設定
 - Trip-t チップのゲインの設定
上記の手順 3a、手順 3c、手順 4b、及び手順 4d。
 - － 光源あり
 1. ゲイン・獲得光量・クロストーク+アフターパルスを起こす確率、の測定
 2. ゲート時間幅=200 ナノ秒
 3. Trip-t チップのゲイン … 低 (ダイナミックレンジ優先)
 - － 光源無し
 1. ノイズレート・クロストーク+アフターパルスを起こす確率、の測定
 2. ゲート時間幅=800 ナノ秒
 3. Trip-t チップのゲイン … 高 (1p.e. ピークをノイズのみで規定するため)
- 光源無しでの測定では、ノイズのみから 1p.e. ピークを求めなければならないためにゲインを高く設定する。光源ありでの測定時にはダイナミックレンジを優先するために幾分低くした。以上の設定は、全て LabView PC からの信号によって行なわれる。ここでは、LabView PC を DAQ PC から遠隔操作することで、それらの設定を DAQ PC から行なえるようにする。
- VME によるデータ収集
上記の手順 3b、手順 4c。各電圧における測定データを VME にて収集する。電源の制御と同期させる。
 - 恒温槽による温度設定
上記の手順 2、手順 5 にあたる。DAQ PC からの制御はできない。恒温槽のみは単独でプログラム運転させ、DAQ システムの方で同期をとる。

以上の項目に関して自動化を行なう。本項では我々が作成した自動化システムについて述べる。

5.4.2 MPPC 電源の遠隔操作

図 (5.19) へ、この性能評価システムで使用する MPPC 用の電源、松定プレジジョン社製「GP-120-0.6」を示す。付加できる電圧の最大値は 120V であり、0V から 120V までを 65,536 通りに分けて設



図 5.19: MPPC 用電源。松定プレジジョン社製。左 … 「GP-120-0.6」・右上 … 「GP-32」・右下 … 「GP-PL」。

定することが可能である。すなわち、最小で 0.0018V 刻みでの設定ができる。この電源の DAQ PC からの遠隔制御を、GP-IB 接続を用いて行なった。DAQ PC からの信号は、「GP-32」モジュールへ送られる。さらにそこから、対応するユニット番号を有した「GP-PL」モジュールへ信号が送られ、最終的には最後段に位置する「GP-120-0.6」モジュールへ信号が送信され MPPC へ電圧が供給される。

5.4.3 LabView PC の遠隔操作システムの構築

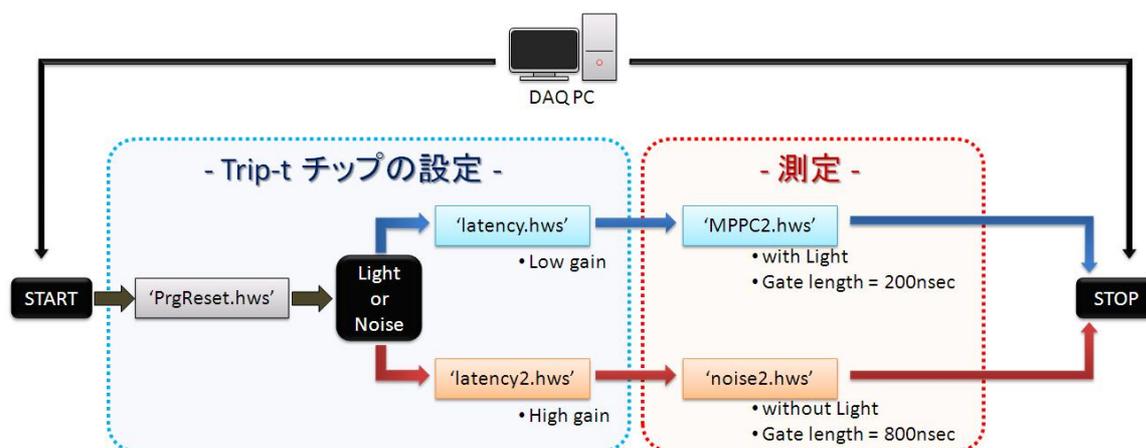


図 5.20: LabView 制御システム概略図。DAQ PC からの信号を受け、LED 光源の ON・OFF の切り替え、測定に用いるゲートの時間幅の設定、Trip-t チップ内での増幅率の設定を行なうことができる。

Trip-t チップの設定、及び VME、LED のトリガーの設定の変更を DAQ PC から行なうために、LabView PC の DAQ PC による遠隔制御を行なった。ここでは LabView ソフトウェアを用いて、図 (5.20) に示すような概念に沿ってプログラムを作成した。実際のブロックダイアグラムは、図 (5.21) に示す。測定に使用する信号を、以下にまとめる。

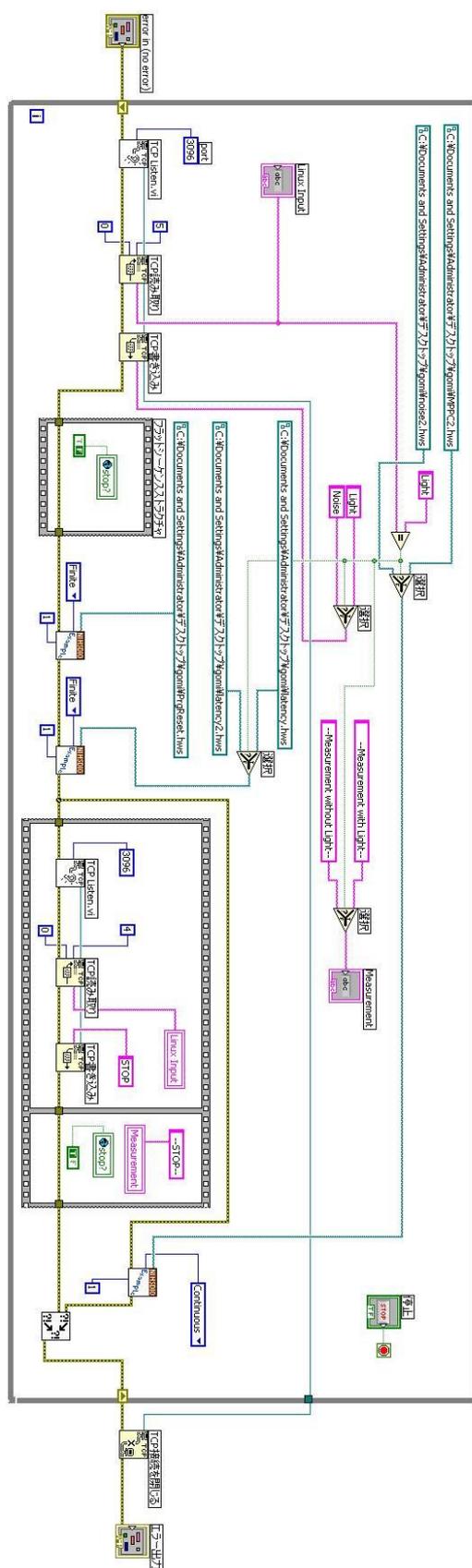


図 5.21: LabView ブロックダイアグラム

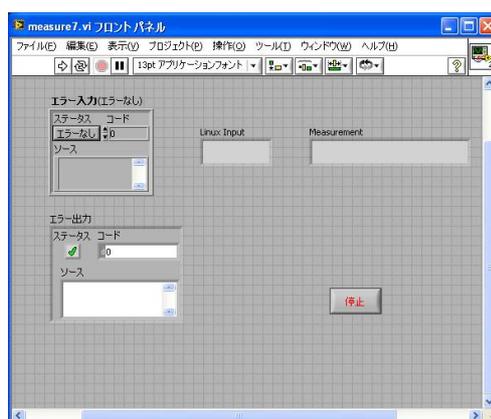


図 5.22: LabView PC フロントパネル

● 測定:光源あり

1. “PrgReset.hws” … Trip-t の設定をリセットする (共通)。
2. “latency.hws” … Trip-t を読み取りモードに設定する。また、ゲインを設定する (低ゲイン:ダイナミックレンジ重視)。
3. “MPPC2.hws” … VME トリガーを送る。ゲート時間幅 \Rightarrow 200 ナノ秒。LED トリガー \Rightarrow ON。

● 測定:光源無し

1. “PrgReset.hws” … Trip-t の設定をリセットする (共通)。
2. “latency2.hws” … Trip-t を読み取りモードに設定する。また、ゲインを設定する (高ゲイン:1p.e. の分離を重視)。
3. “noise2.hws” … VME トリガーを送る。ゲート時間幅 \Rightarrow 800 ナノ秒。LED トリガー \Rightarrow OFF。

LabView PC と DAQ PC とはネットワークケーブルによって接続されている。以上の信号は DAQ PC からの信号によって選択され、Trip-t チップへ送られる。また、選択された設定に従って DAQ PC 側へはそれぞれ条件に該当する文字列が返信され、DAQ PC 側からも行なった設定の確認をすることが可能であるように作成した。

この確認は、LabView PC におけるフロントパネル上でも確認できる。図 (5.22) へ作成したプログラムのフロントパネルを示す。余計な部分をできるだけ排除している。図 (5.22) 中の “Linux Input” へ、DAQ PC から送られてきた信号の情報が出力され、またそれに対応して LabView PC 側から選択されたステータスを、“Measurement” へ出力するように作成した。両者は一致していなければならない。

5.4.4 恒温槽のセッティング

図 (5.23) へ、今回の測定で使用する恒温槽を示す。この恒温槽では、あらかじめ時間、温度を設定しておくことでプログラム運転が可能である。今回の測定では、 25°C 、 20°C 、 15°C の 3 点におい

て測定を行なう。図(5.24)に“温度とり”を用いて測定した恒温槽内部の温度の時間変化を示す。恒温槽のプログラム運転は、30分刻みでの設定が可能である。温度変化の結果から、内部の温度が安定するまでに20～30分待つ必要があることがわかる。測定時間を考慮し、ここでは各温度域で1時間ずつ時間をとることに決定した。

恒温槽はDAQ PCと接続されておらず、独立に動作している。そのため、測定システムの方で恒温槽の温度変化に合わせて測定を行なうように時間を設定し、両者を同時にスタートさせることによって、各温度での測定が可能であることを確認した。



図 5.23: 恒温槽。SANYO 製 低温恒温器 (インキュベーター) MIR-153。

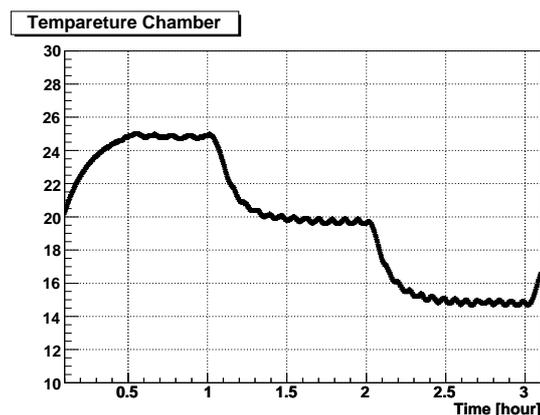


図 5.24: 恒温槽内部の温度の時間変化

5.5 自動化システム テスト結果

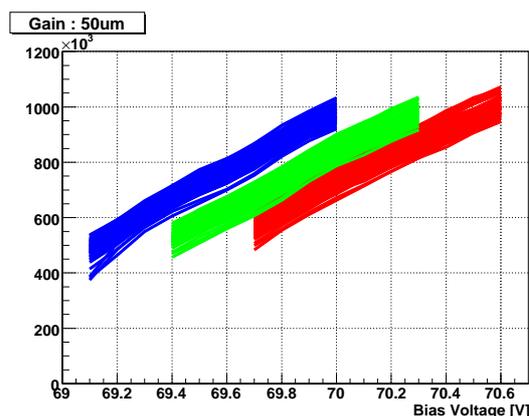


図 5.25: S10362-11-050CK : 50 μ m 64MPPC 素子 ゲイン測定結果 (横軸=バイアス電圧)

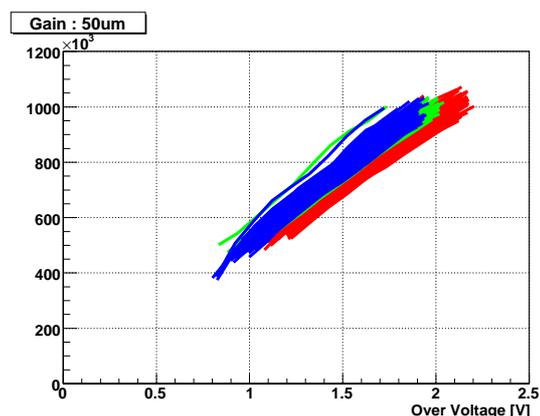


図 5.26: S10362-11-050CK : 50 μ m 64MPPC 素子 ゲイン測定結果 (横軸= ΔV)

以上によって、MPPC 電源、Trip-t チップ (ゲイン・ゲート時間幅)、LED トリガー、恒温槽の各設定に関して自動化が達成できた。作成した自動化システムを用いて測定を行なったときの測定結果を

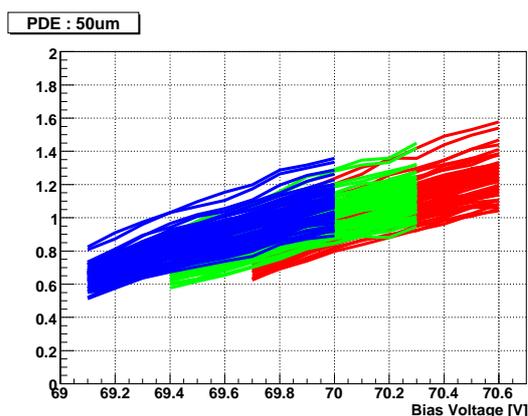


図 5.27: S10362-11-050CK : 50 μ m 64MPPC 素子 獲得できる光量 測定結果 (横軸=バイアス電圧)

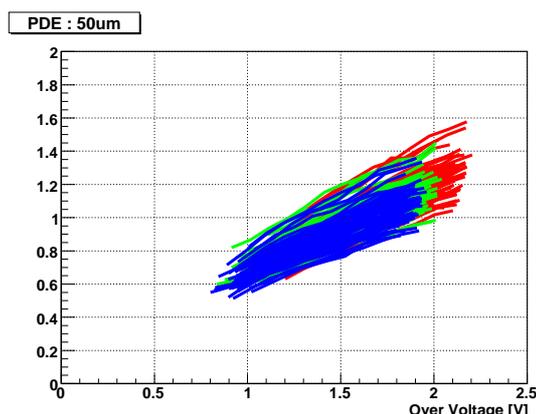


図 5.28: S10362-11-050CK : 50 μ m 64MPPC 素子 獲得できる光量 測定結果 (横軸= ΔV)

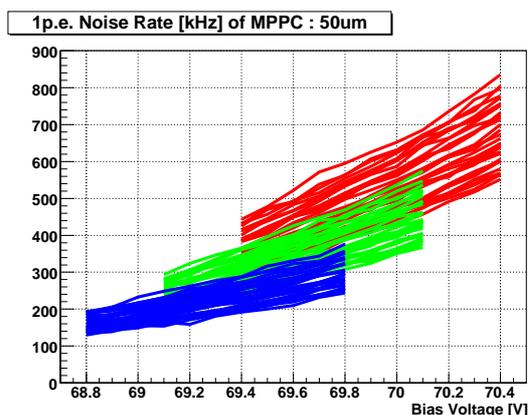


図 5.29: S10362-11-050CK : 50 μ m 64MPPC 素子 ノイズレート測定結果 (横軸=バイアス電圧)

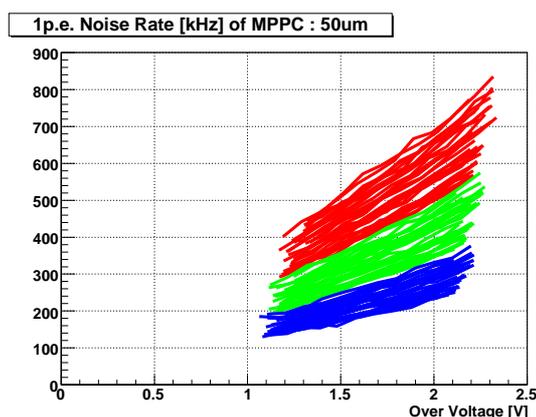


図 5.30: S10362-11-050CK : 50 μ m 64MPPC 素子 ノイズレート測定結果 (横軸= ΔV)

示す。この測定には、50 μ m ピッチ 400 ピクセル MPPC(型番 : S10362-11-050CK) を使用した。図で示されるように、この性能評価システムによって 64 個の MPPC に関して、ゲイン、獲得できる光量、アフターパルス+クロストークを起こす確率、及びノイズレートという 4 つの基礎特性について測定に成功した。

5.6 100 個の 1.0mm \times 1.0mm 角 MPPC 素子 個体差の測定

ここで、別の測定で調べた MPPC 素子の持つ個体差に関して報告を行なう。100 個の 50 μ m ピッチ、1.0mm \times 1.0mm 角 MPPC 素子 (型番:S10362-11-050MOD) に関して、ゲイン、PDE、ノイズレート、クロストーク+アフターパルスを起こす確率、の 4 つの基礎特性に関して測定を行ない、個体差を測

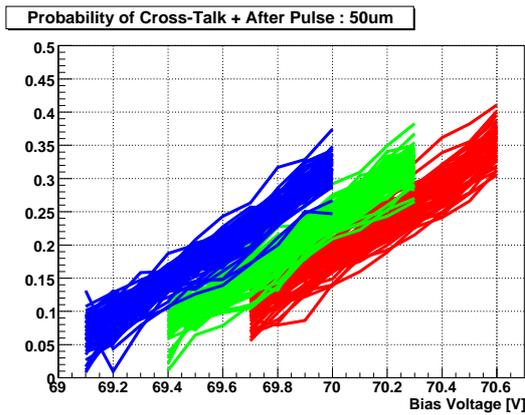


図 5.31: S10362-11-050CK : 50 μ m 64MPPC 素子 クロストーク+アフターパルス測定結果 (横軸=バイアス電圧)

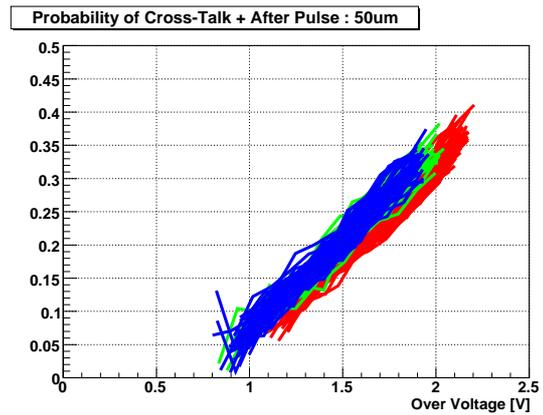


図 5.32: S10362-11-050CK : 50 μ m 64MPPC 素子 クロストーク+アフターパルス測定結果 (横軸= ΔV)

定した。最終的には、ここまで報告を行ってきた性能評価システムを用いて以下のような議論を行なってゆくことになる。

5.6.1 測定結果

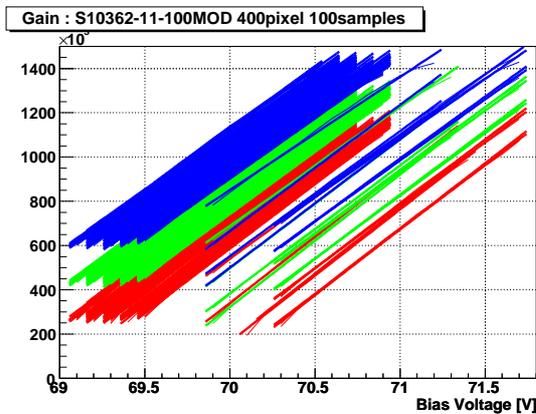


図 5.33: ゲイン測定結果

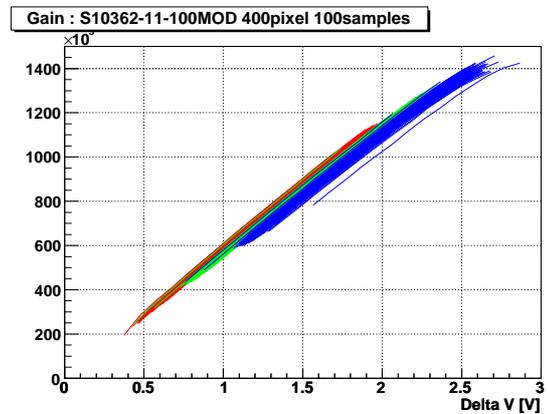


図 5.34: ゲイン測定結果 横軸 ΔV

測定結果を示す。図 (5.33)、図 (5.34) にゲインの測定結果を示す。赤が 25 $^{\circ}$ C の時の、緑が 20 $^{\circ}$ C の時の、青が 15 $^{\circ}$ C の時のゲインの測定結果になる。図 (5.34) よりゲインは温度には因らない、 ΔV のみの関数であることがわかる。そしてグラフを見ればわかるとおり、その ΔV に対する挙動は 100 個の素子、3 点の温度領域に関して同じである。すなわち、横軸をバイアス電圧に取った時に見える特性の個体差、及び温度による特性のばらつきは全てブレイクダウン電圧のばらつきに起因するものであるということがわかった。

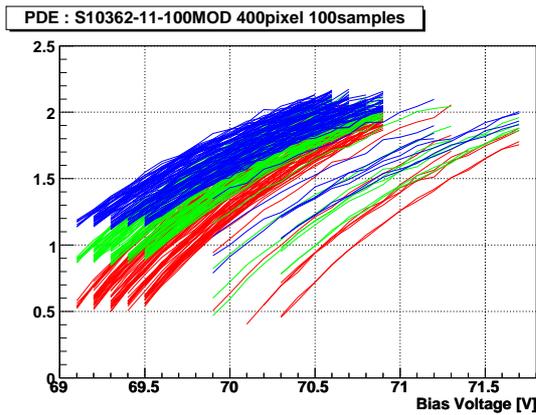


図 5.35: PDE 測定結果

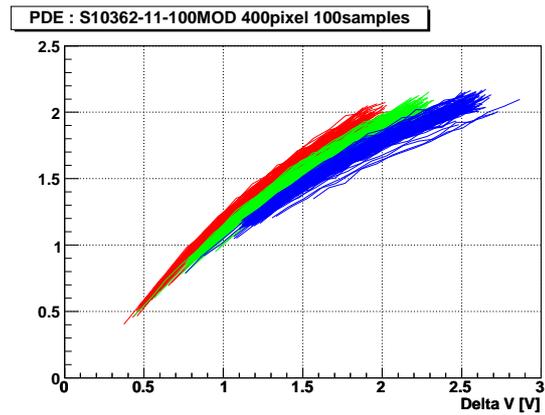


図 5.36: PDE 測定結果 横軸 ΔV

図 (5.35)、図 (5.36) に PDE の測定結果を示す。図 (5.36) より PDE は温度には因らない、 ΔV のみの関数であることがわかる。そしてグラフを見ればわかるとおり、その ΔV に対する挙動は 100 個の素子、3 点の温度領域に関して同じである。すなわち、PDE に関して見ても横軸をバイアス電圧に取った時に見える素子間の特性のばらつき、及び温度による特性のばらつきは全てブレイクダウン電圧のばらつきに起因するものであるということがわかった。

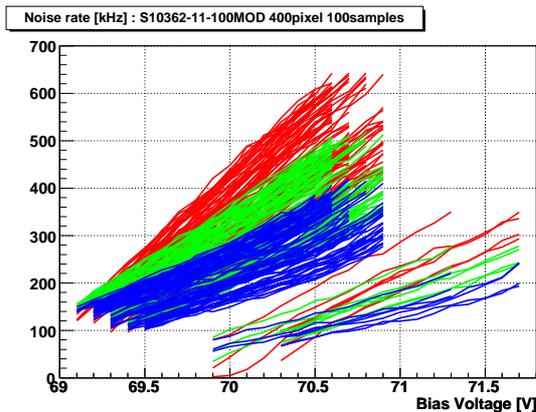


図 5.37: ノイズレート測定結果

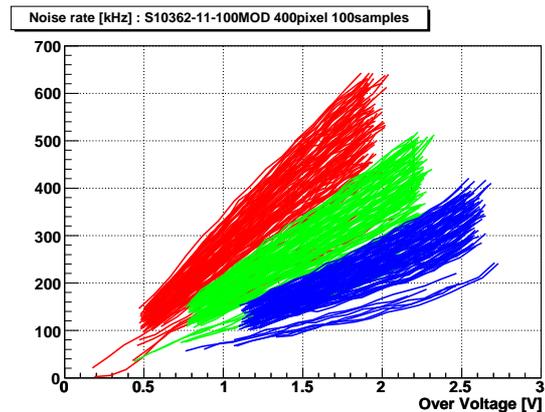


図 5.38: ノイズレート測定結果 横軸 ΔV

図 (5.37)、図 (5.38) に 1p.e. ノイズレートの測定結果を示す。ノイズに関しては、他の特性とは挙動が異なっている。まずノイズレートは ΔV 以外にも温度にも依存する特性であるために、横軸を ΔV にとった時もグラフが一つに重なりはしない。これはこの測定結果からも読み取れる。そして、それ以外にもノイズレートに関しては各 MPPC 間に個体差が存在するということがわかった。グラフを見ればわかるとおり、 ΔV に対する挙動は 100 個の素子、3 点の温度領域に関して異なっている。ノイズレートという特性には個体差が存在するのだということが今回の測定から理解される。

ここで、図 (5.36) の PDE の結果を見てみると、PDE に温度による変化や個体差は無く ΔV のみの関数になっていることがわかる。よって PDE の定義である式 (3.5) 中の、 ϵ_{Geiger} に個体差は無いと考えられるため、各 MPPC 素子間には熱電子が MPPC 内に発生するレートに個体差があるということ

がわかる。

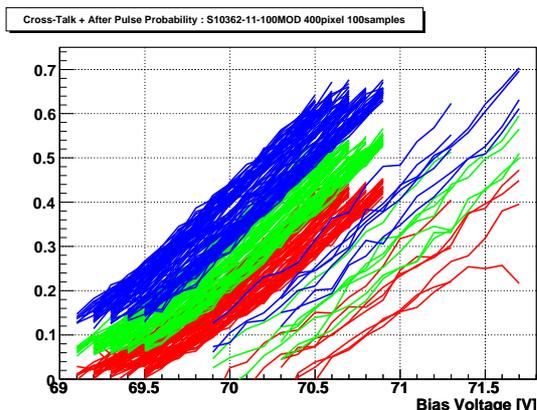


図 5.39: クロストーク+アフターパルス 測定結果

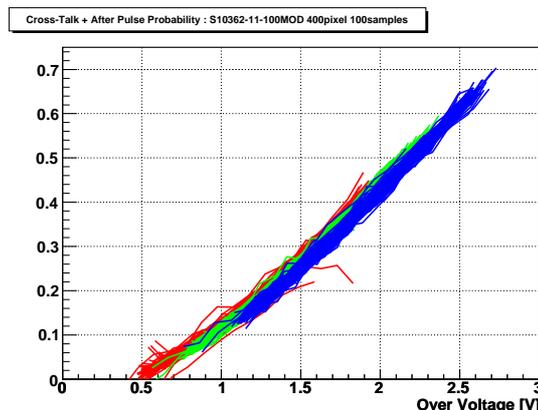


図 5.40: クロストーク+アフターパルス 測定結果 横軸 ΔV

図 (5.39)、図 (5.40) にクロストーク+アフターパルスが起こる確率の測定結果を示す。図 (5.40) よりクロストークもアフターパルスも温度には因らない、 ΔV のみの関数であることがわかる。そしてグラフを見ればわかるとおり、その ΔV に対する挙動は 100 個の素子、3 点の温度領域に関して同じである。すなわち、クロストーク+アフターパルスを起こす確率に関して見ても横軸をバイアス電圧に取った時に見える素子間の特性のばらつき、及び温度による特性のばらつきは全てブレイクダウン電圧のばらつきに起因するものであるということがわかった。

5.6.2 解析

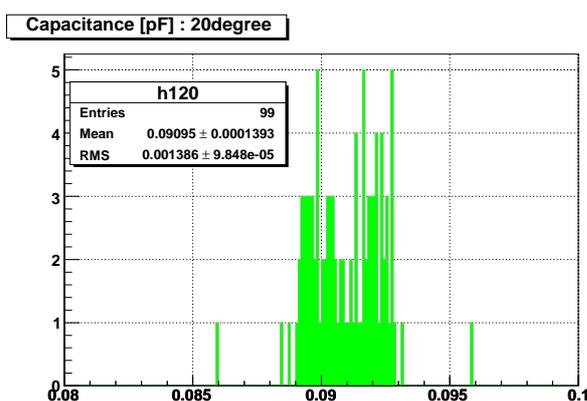


図 5.41: キャパシタンス [pF] 測定結果 ($20^{\circ}C$)

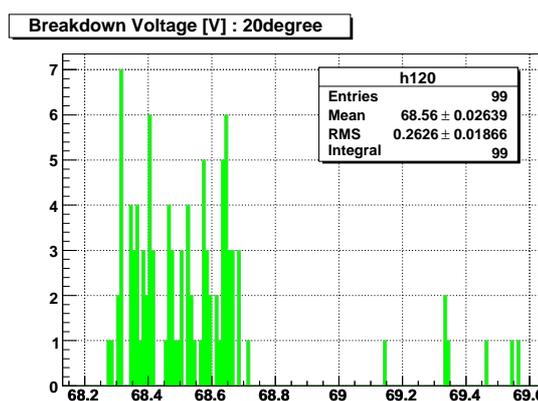


図 5.42: ブレイクダウン電圧 測定結果 ($20^{\circ}C$)

図 (5.41) にゲインの測定結果から求められた APD ピクセルのキャパシタンスの測定結果のヒストグラムを示す。キャパシタンスは非常によく揃っているということがわかる。各素子の $20^{\circ}C$ の時のブレイクダウン電圧の分布を図 (5.42) へ示す。100 個の素子において、ブレイクダウン電圧は約 0.5V

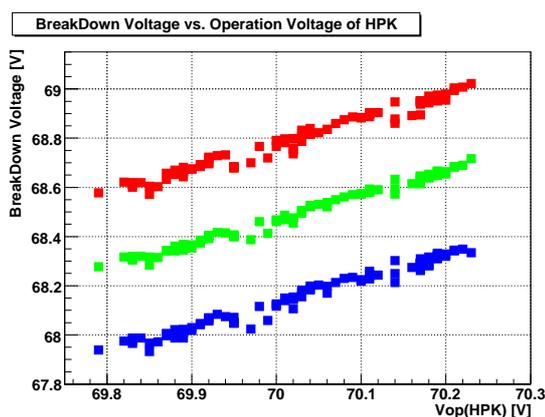


図 5.43: ブレイクダウン電圧と HPK 測定電圧

の範囲に大部分の素子は分布しているということがわかった。ただし、わずかに高いブレイクダウン電圧を有している素子が、7 個混入しているということがわかった。

ここで、浜松ホトニクス社で行なわれた測定との相関を見てみる。浜松ホトニクス社によるデータ表では、ゲインが $\sim 7.5 \times 10^5$ 程度になる電圧値、その時のゲイン、1p.e. ノイズレート、2p.e. ノイズレートの値が記載されている。ここでは、横軸にその電圧値を取り、縦軸に測定されたブレイクダウン電圧をプロットしてみた。結果を図 (5.43) に示す。2 つの結果には、相関が見られることがわかった。ここから、添付されてきたデータ表を用いればあらかじめ MPPC の特性を予測することができることがわかる。

各特性の値がどの程度の個体差を有しているのかについて、同じ ΔV の点での値について取り出し比較を行なう。ここではゲイン、PDE、ノイズレート、クロストーク+アフターパルスを起こす確率の 4 つの特性に関して $\Delta V = 1.5V$ での比較を行なった。

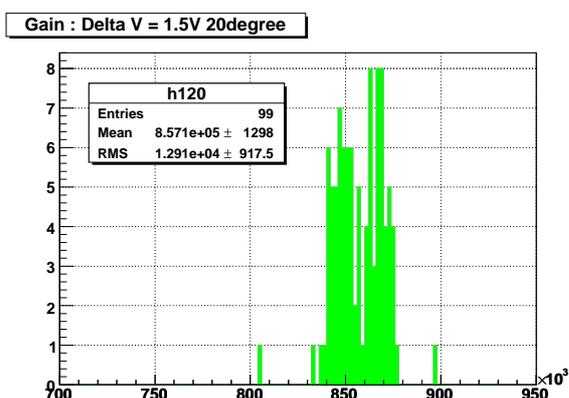


図 5.44: ゲイン測定結果 $\Delta V = 1.5V$

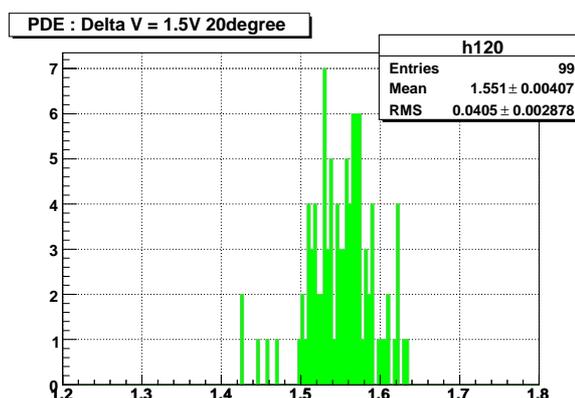


図 5.45: PDE 測定結果 $\Delta V = 1.5V$

ノイズレートは温度によって変化する特性である。ここでは各特性がどれほど個体差を持っているのかを見るため、全て $20^\circ C$ での結果について見た。

表 (5.1) に個体差の測定結果を示す。ゲイン、PDE、クロストーク+アフターパルスを起こす確率

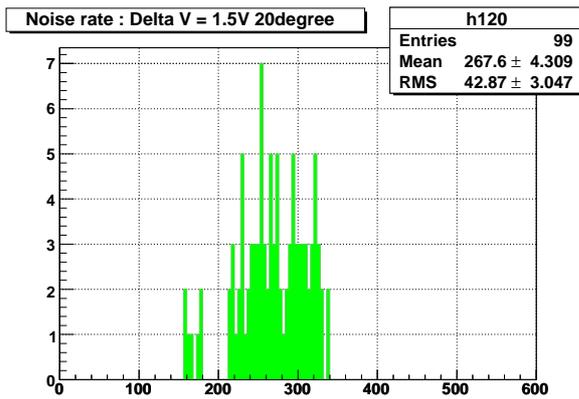


図 5.46: 1p.e. ノイズレート測定結果 $\Delta V = 1.5V$

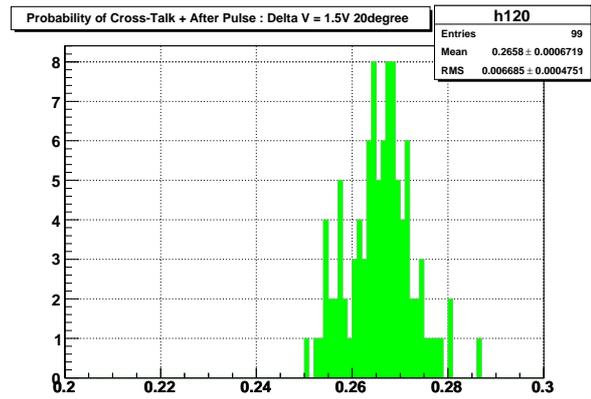


図 5.47: クロストーク+アフターパルス測定結果 $\Delta V = 1.5V$

index	中心値	二乗平均平方根 (RMS)	RMS/中心値
ゲイン	857100	12910	0.0150
PDE	$1.551 \times \text{PMT}$	$0.0405 \times \text{PMT}$	0.0261
ノイズレート	267.6kHz	42.87kHz	0.1602
クロストーク+アフターパルス	26.58%	0.6685%	0.0252
キャパシタンス	90.95pF	1.386pF	0.0152

表 5.1: $50\mu\text{m}$ 400 ピクセル MPPC 特性個体差 ($20^\circ\text{C} \cdot \Delta V=1.5V$)

の3つの特性に関しては、個体差はブレイクダウン電圧の個体差に起因するものであるということがわかった。同じ ΔV での点を比較した時の100個のMPPC素子間の個体差は非常に小さい。一方で、ノイズレートは個体差が他の特性と比べると大きいことがわかった。これは熱電子が発生するレートが、温度によって変化し、またMPPC素子間に個体差を持つパラメーターであることによる。

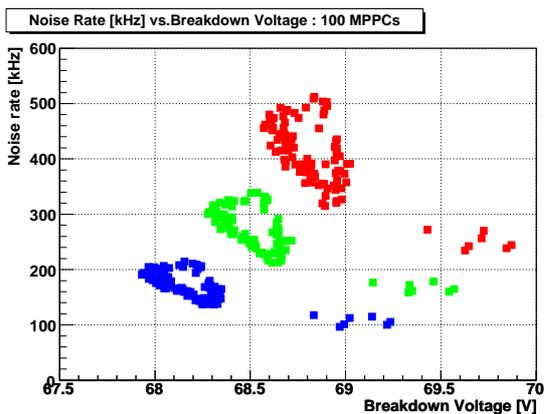


図 5.48: 1p.e. ノイズレート ($\Delta V = 1.5V$ 時) と、ブレイクダウン電圧との相関

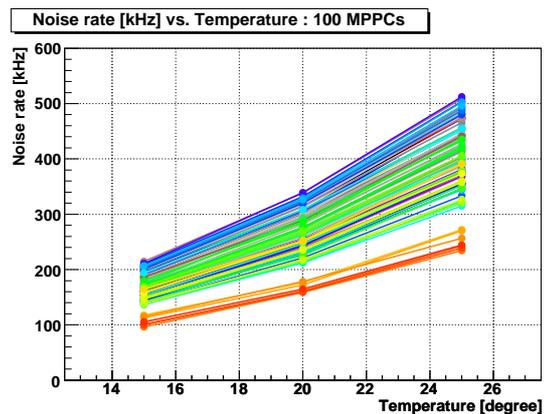


図 5.49: 1p.e. ノイズレート ($\Delta V = 1.5V$ 時) と、温度との相関

ノイズレートの個体差に関して、 $\Delta V = 1.5V$ の時での測定結果を、ブレイクダウン電圧を横軸にとって見た時のものを図 (5.48) へ示す。結果より、ブレイクダウン電圧が高い MPPC 素子ほどノイズレートは小さい傾向にあるということがわかる。この両者の間の相関についてはまだ詳しいことはわかっていない。また、ノイズレートの温度依存性を 100 個の素子に関して見てみたものを図 (5.49) に示す。いずれの素子に関しても、ノイズレートは温度によって指数関数的に上昇していくことがわかる。

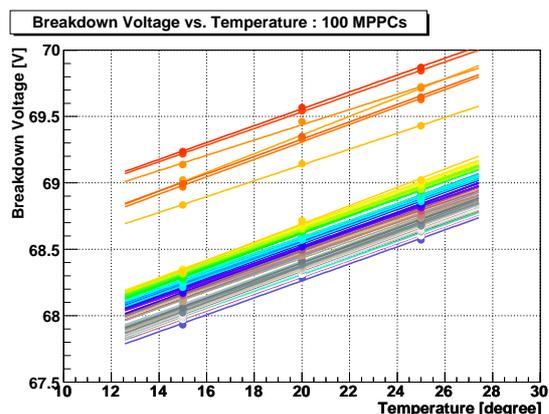


図 5.50: ブレイクダウン電圧の温度依存性。25°C・20°C・15°C の 3 点で測定を行なった。

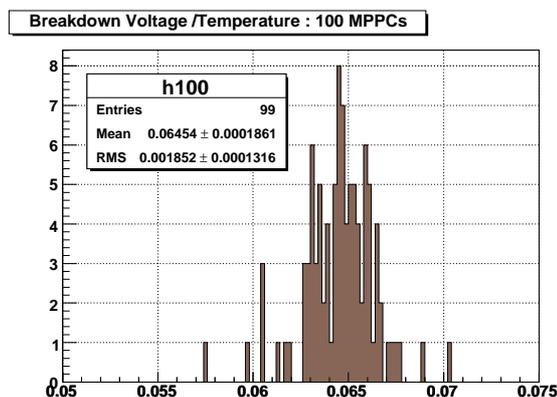


図 5.51: ブレイクダウン電圧の温度変化の個体差について。

index	中心値	二乗平均平方根 (RMS)	RMS/中心値
ブレイクダウン電圧変化	0.06454V/1°C	0.001852V/1°C	0.0287

表 5.2: 50 μm MPPC ブレイクダウン電圧の温度依存性の個体差

100 個の素子について、ブレイクダウン電圧の温度依存性を見たものを図 (5.50) に示す。いずれの素子に関しても、温度が下がるにつれてブレイクダウン電圧は小さくなってゆく。3 点での結果を直線で近似した時の、その傾きに関して個体差を見たものを図 (5.51) に示す。結果を表 (5.2) にまとめた。ブレイクダウン電圧は温度によって線型に変化し、1°C 温度が低下するごとに 0.06V だけ低くなることがわかる。100 個の素子について、この温度変化によるブレイクダウン電圧の変化分についての個体差は小さいことがわかった。

5.6.3 100 個の MPPC 素子の個体差についての結論

4 つの基礎特性に関して、100 個の素子について測定を行なった。ゲイン、PDE、クロストーク+アフターパルスが起こる確率、の 3 つの基礎特性は ΔV のみの関数であり、同じ ΔV での MPPC 素子の性能の個体差は表 (5.1) へ示した通り小さいということがわかった。ゲイン、PDE、クロストーク+アフターパルスが起こる確率、の 3 つの基礎特性を横軸を ΔV にとって 100 個の MPPC 素子に関して重ねて書いてみれば、その挙動は同じであるということがわかる。

一方、ノイズレートの測定結果についてみる。ノイズレートは ΔV のみではなく温度にも因る基礎特性であり、素子ごとに個体差が大きいということがわかった。

また、ブレイクダウン電圧の温度依存性に関しても個体差を測定した。100 個の素子に関してその個体差は、先の 3 つの特性と同等程度に小さいことがわかった。

5.7 結論、及び今後の予定

測定回数/day	測定時間/day	測定個数/day	測定個数/month
2	7 時間	192 個/day	3,200 個/day
3	10.5 時間	128 個/day	4,800 個/day

表 5.3: 15,000MPPC 素子測定案 (1月=25日 で計算)

多量の MPPC 素子に関して測定を行なうシステムの開発に成功した。Trip-t チップを使用することで、多量の MPPC 素子の同時測定が可能になった。今回の測定システムでは、64 個の MPPC の同時測定を実現している。しかし、以前に行なった 100 個の MPPC 素子の測定の結果と比較すると、このシステムで得られた結果はまだ改善の余地が残されていることがわかる。

また、自動化システムを用いることで、実際の測定時における作業を大きく削減した。これにより、人的な労力を削ることができ、また人為的なミスが入る余地も削減している。MPPC の換装に関しては手作業で行なう必要がある。測定には 3 時間を要する。換装には約 30 分の時間が必要になるため、1 回の測定には約 3.5 時間かかることになる。

2008 年 2 月から実際に T2K 実験に使用される MPPC の納入がスタートされる。これらの素子の測定を、このシステムを用いて行なってゆく。T2K 実験のスケジュールからの要請では、約 6ヶ月で 15,000 個の MPPC を測定しなければならない。今回作成されたシステムで、スケジュールに間に合わせることは可能であることが示された。

第6章 結論

新型光検出器 Multi Pixel Photon Counter(MPPC) について、T2K 実験にむけて研究開発を行ってきた。MPPC は浜松ホトニクス社によって開発された PPD の一種で、 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 、もしくは $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ の有感領域内に多数の APD ピクセルが敷き詰められた構造をしている。各 APD ピクセルはガイガーモードで動作し、1つの MPPC の出力としては各 APD ピクセルからのシグナルの総和になる。MPPC はその性能の高さ、サイズが小さいこと、磁場内でも安定に動作する点などから、T2K 実験においての使用が決定している。

我々は、T2K 実験へ向けて開発された $50\mu\text{m}$ ピッチ・ $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ 角 MPPC 素子の特性の評価を行なった。MPPC の基礎特性として、ゲイン、PDE、ノイズレート、クロストークレート、アフターパルスを起こす確率、クロストーク+アフターパルス、パルスリニアリティについて測定を行ない、その電圧に対する依存性、温度に対する依存性などを求めることができた。。この結果、MPPC は非常に高い性能を誇り、来る T2K 実験からの要請に十分応えることができることを示した。また、T2K 実験で MPPC を使用するための、波長変換ファイバーとの接続のための GOMI Connector を開発した。面積を従来の $1.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ のものよりも拡大させた T2K 実験用の MPPC 素子は、この GOMI Connector を使用した T2K 実験の使用条件での測定において獲得できる光量の面で従来の素子と比較してさらに高い性能を発揮することがわかった。また、このような詳細な特性の測定に関しては、浜松ホトニクス社内においても行われておらず、今回の測定結果は MPPC のさまざまな領域への実用化へむけた性能向上のためにも重要な情報であるといえる。

基礎特性において、クロストーク、アフターパルスについて詳細な研究結果もまた示された。特に、今まで無視できるレベルであると考えられてきたアフターパルスについて、絶対値を初めて測定することに成功し、それが MPPC の重要な特性であることを示した。MPPC に課せられる今後の課題としては、アフターパルス、及びクロストークの減少、また面積が拡大することによるノイズレートの増加を如何にして抑えるかといった点に絞られると思われる。

また我々は、T2K 実験において実機で使用する 15,000 個の MPPC 素子の性能評価システムの構築を行なった。性能評価システムのために、32 個の MPPC を同時に測定できる基板の開発に成功した。また、性能評価システムの大部分の自動化に成功し、人的労力を大きく削減することで人為的なミスの入る余地も無くし、安定なシステムを構築することができた。2008 年 2 月より、6ヶ月という期間で 15,000 個の MPPC の性能の評価をこれから行なってゆく。その前段階として数百と言う単位での MPPC の性能を評価した。数百の単位での MPPC の基礎特性を測定することにより、MPPC の個体差の研究に大きく貢献することができた。測定の結果、ゲイン、PDE、クロストーク+アフターパルスを起こす確率という 3 つの特性は、温度変化による値の変化、及び個体差の主な原因が V_{bd} の変化に伴う ΔV の変化にあるという結論に至った。それに対してノイズレートに関しては、それが全て ΔV によるものではなく、温度により、また個体間でも差異が存在するということがわかった。この効果は熱電子ノイズが発生するレートが、温度によって、また素子によって異なるためである。

我々は、MPPC と言う新型の光検出器の特性に関してその高い性能を示し、その個体差も制御できるものであるということを示した。今後、世界初になる大規模実験での MPPC の実用化になる、2009 年に始まる T2K 実験に向けて、15,000 個の MPPC を作製した性能評価システムを用いて評価する。

謝辞

この2年と言う月日をこの高エネルギー物理学研究室で過ごさせてもらいました。本当に短い期間だったとしか今となっては思い返せませんが、密度と言う意味では自分にとって非常に意義がある2年間だと思っています。T2K 実験と言う、非常に大きな実験の一端に僅かばかりですが力添えができたことを本当に嬉しいと感じています。この論文へ至るまでにいろいろなことがありました。微々たるものではあるにしろ成長はあったのではと確信しています。その成長は、多くの方々に支えられて研究してこれたからだということも、同じように確信しています。本当にありがとうございます。

2年の間、研究の指導をしてくださった中家剛准教授と横山将志助教には本当に感謝しています。お二人の要所での適切なコメントと、真摯なお心遣いとに幾度も助けられました。何とかこの論文にまで辿りつくことができました。ありがとうございます。

研究員の新田和範さんにもコネクタの件や、システム構築時になどいろいろとお世話になりました。忙しい時期にプログラムの話などをお願いしてしまって申し訳ありませんでした。本当に感謝しています。

修士2年生になってからの1年はほとんどを KEK で過ごさせていただきました。測定器開発室の皆様方からも、いろいろな助言やアイデアをいただき、研究を進める術を与えてくれました。感謝しています。

高エネルギー加速器研究機構の中平武助教には、1年間の研究所生活の中で非常にお世話になりました。KEK での測定システムの構築や、LabView のプログラムの作成に関して何度も助けていただきました。本当にありがとうございました。

奈良女子大学の宮林謙吉准教授には、GP-IB コントロールの件でアドバイスをいただきました。おかげで、電源の遠隔操作をすることができるようになりました。ありがとうございます。

また、KEK 回路室の村上武さんには、Trip-t 基板の開発で非常にお世話になりました。はじめの頃は、本当に動くのか不安は湧き上がる一方だったのですが、お力添えのおかげでこうして性能評価システムの構築にまで至ることができました。本当にありがとうございます。

京都大学高エネ研 KEK 支部長の市川温子准教授には、KEK でお世話になりました。幸運のメール、ありがとうございました。実質あまりシフトには入ることができなかったような気がします。

KEK の坂下さんには生命の根幹に関わる部分で非常にお世話になりました。茨城で遭難しなかったのは坂下さんのおかげです。

GOMI Connector の作成に関して、有限会社ジーテックの後藤昌幸社長には図面や構造のアドバイスから、製作する過程の見学までいろいろとお世話になりました。この場を借りまして、重ねて御礼申し上げます。

田口さん、は読んで下さるのでしょうか。1年生の時、何も知らないでいた私を、1年間ずっと導いて下さいました。本当にありがとうございます。

黒澤さん、松岡さんにも KEK の生活でなど、いろいろと非常にお世話になりました。そう言えば、最後の味平には多少心残りもあります。

昨年的一年間をほとんど京都に居れなかったために、同期の川向裕之君、久保一君には京都大学での仕事に関してお世話になってしまいました。この場を借りてお礼を言いたいと思います。また、M1 の皆さん、これからは物事が一気に進んで行き、時間の流れが加速していくように感じると思いますが、本当に頑張ってください。

最後になりますが、京都大学高エネルギー研究室と KEK 測定器開発室との全ての方々、寮の友人、及び関東に居る家族にこの場を借りて深く御礼申し上げます。本当にありがとうございました。

2008年1月31日(木)
五味 慎一

付録A 1.3mm × 1.3mm MPPC素子 APD ピクセル性能

ここでは1.3mm × 1.3mm 角 MPPC 素子において、1.0mm × 1.0mm の MPPC 素子と同じ APD ピクセルが使用されていることを確認する。特性として、1APD ピクセルの性能にそれが因っている特性はピクセル数が増加しようとも変化しないはずである。ゲインは APD ピクセルのキャパシタンスに因る値であるので、変化しないはずである。クロストークレート、アフターパルスが起こる確率の二つも、APD ピクセルの配置が同じであるならば変化しないはずである。クロストークに関しては僅かに変化する可能性はあるが、ほぼ同じであるとして良い(付録 C 参照)。1つの MPPC として見た時の特性は、今まで見てきたとおりに当然変化する。コネクタを使用しての獲得できる光量を求めれば、それは明らかに変化していた(3.4.2 章参照)。またノイズレートも増大していた(3.5.2 章参照)。ここでは、APD ピクセルの性能に因る特性である、ゲイン、クロストーク、クロストーク+アフターパルスについて比較を行う。測定には 80 ナノ秒のゲート幅を使用した。

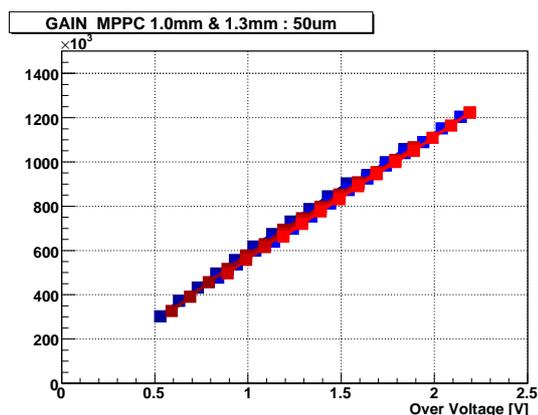


図 A.1: 50 μ m MPPC 素子 ゲイン

型番	ピッチ長	ピクセル数	C/e 25	C/e 20	C/e 15
S10362-11-050CK	50 μ m	400pixel	5.849 $\times 10^5$	5.760 $\times 10^5$	5.627 $\times 10^5$
1.3 × 1.3-50-MPPC	50 μ m	667pixel	5.735 $\times 10^5$	5.639 $\times 10^5$	5.575 $\times 10^5$

表 A.1: 1.3mm 角 MPPC 素子

図 (A.1) にゲインの測定結果を示す。共に赤いグラフが 1.3mm × 1.3mm の MPPC 素子、青いグラフが 1.0mm × 1.0mm の MPPC 素子の結果を表している。図から二つのグラフは重なっていることがわかる。このことから、両者の ΔV に対する挙動は同じであることが判った。表 (A.1) で示された

キャパシタンスを比較してもわかるとおり、両者には同じ APD ピクセルが使用されている。

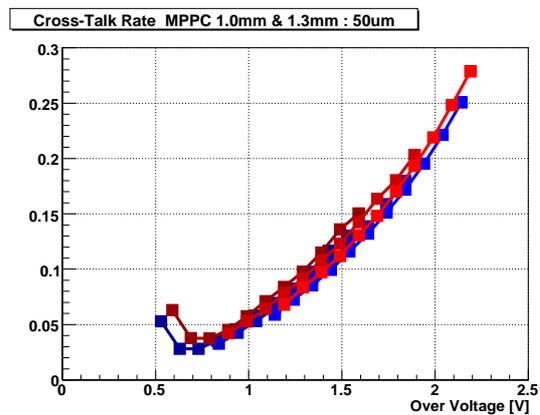


図 A.2: $50\mu\text{m}$ MPPC 素子 クロストークレート測定結果

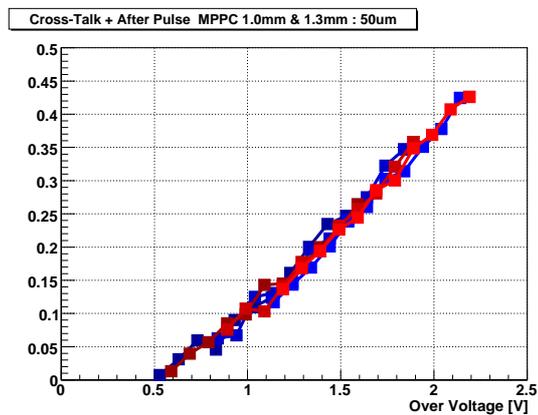


図 A.3: $50\mu\text{m}$ MPPC 素子 クロストーク+アフターパルス測定結果

図 (A.2) にクロストークの測定結果を、図 (A.3) にクロストーク+アフターパルスの測定結果を示す。同じように赤いグラフが $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ の MPPC 素子の、青いグラフが $1.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ の MPPC 素子の結果になっている。同じように ΔV に対する挙動を比較すると、両者は同じ挙動を示しているということがわかる。以上の 3 つの測定結果から、 $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ の MPPC 素子と $1.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$ の MPPC 素子とでは同じ APD ピクセルが使用されているということが確認できた。

付録B 少数ピクセル素子 基礎特性

B.1 APD ピクセルの性能に関して

4.1 章で記載した 1 ピクセル素子、及び付録 C でのクロストークについて議論した際の少数ピクセル素子について、その基礎特性を紹介する。我々が手にした素子は、 $50\mu\text{m}$ ピッチ素子、1 ピクセル、4 ピクセル、16 ピクセルであった。以上の 3 つの素子について、ゲイン、ノイズレート、クロストークレートの測定結果を記載する。ここで、PDE の測定は行っていない。ノイズレートはいずれの非常に低く抑えられている。ノイズは APD ピクセルにもよるが、その個数にも大きく依存している。

B.2 ゲイン

さて、今回この少数ピクセル素子を評価するにあたって、この素子に使用されている APD ピクセルが現在存在し保有している MPPC 素子と同じものであるということをまず確かめなければならない。しかし、比較対照となる特性というゲインしか存在しない。クロストークは 1 ピクセル素子ではゼロであるし、故にクロストーク+アフターパルスの値も大きく違ってしまふ。PDE の測定には 1 ピクセル以下にまで絞ったレーザー光のような非常に特殊な測定システムが必要になってくる。ここではゲインの比較を行い、それぞれの APD ピクセルを比較する。

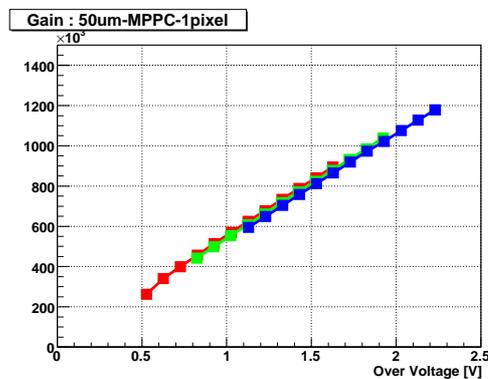
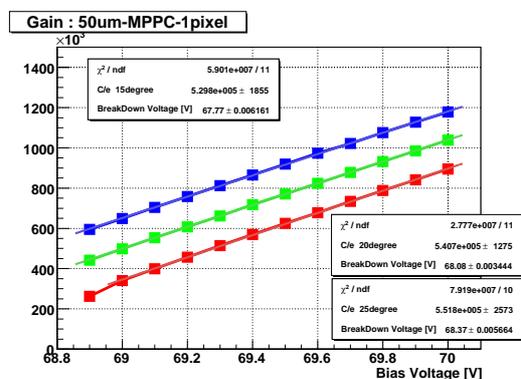


図 B.1: $50\mu\text{m}$ 1 ピクセル ゲイン測定結果

図 B.2: $50\mu\text{m}$ 1 ピクセル ゲイン測定結果 (横軸= ΔV)

表 (B.1) より、APD ピクセルのキャパシタンスを比較してみると値は同じであるということがわかる。このことからそれぞれには同じ APD ピクセルが使用されていることがわかる。

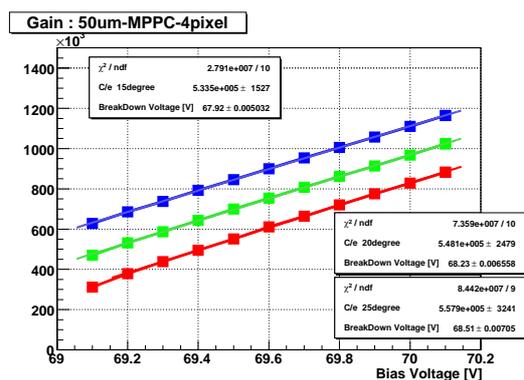


図 B.3: 50μm 4 ピクセル ゲイン測定結果

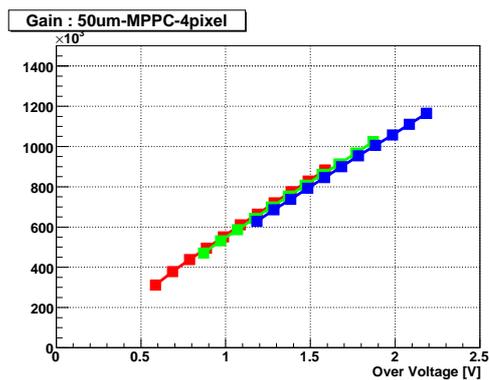


図 B.4: 50μm 4 ピクセル ゲイン測定結果 (横軸=ΔV)

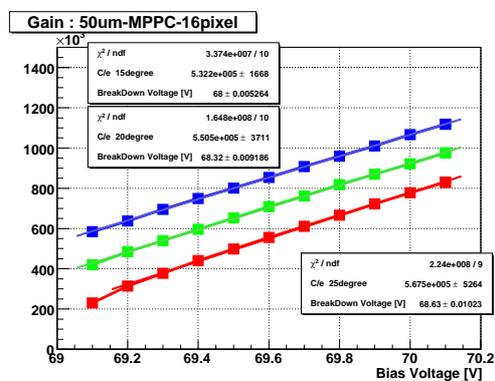


図 B.5: 50μm 16 ピクセル ゲイン測定結果

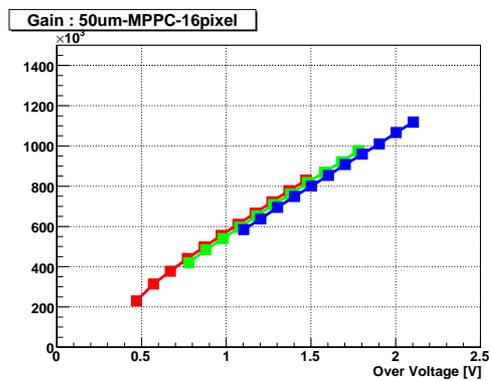


図 B.6: 50μm 16 ピクセル ゲイン測定結果 (横軸=ΔV)

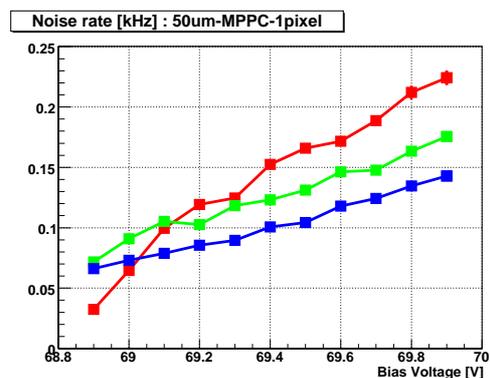


図 B.7: 50μm 1 ピクセル ノイズレート測定結果

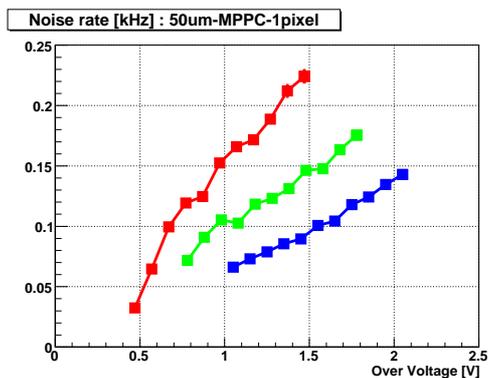


図 B.8: 50μm 1 ピクセル ノイズレート測定結果 (横軸=ΔV)

型番	ピッチ長	ピクセル数	C [fF] 25	C [fF] 20	C [fF] 15
S10362-13-050CK	50 μ m	667pixel	91.88 \pm 1.05	90.35 \pm 0.54	89.32 \pm 0.31
50 μ m-MPPC-1pixel	50 μ m	1pixel	88.41 \pm 0.41	86.63 \pm 0.20	84.88 \pm 0.30
50 μ m-MPPC-4pixel	50 μ m	4pixel	89.39 \pm 0.52	87.82 \pm 0.40	85.48 \pm 0.24
50 μ m-MPPC-16pixel	50 μ m	16pixel	90.92 \pm 0.84	88.20 \pm 0.59	85.27 \pm 0.27

表 B.1: 少数ピクセル素子 キャパシタンスまとめ

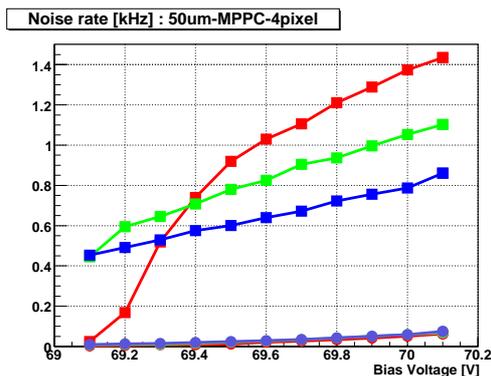


図 B.9: 50 μ m 4 ピクセル ノイズレート測定結果

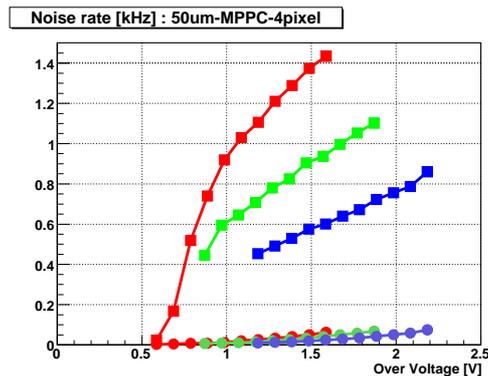


図 B.10: 50 μ m 4 ピクセル ノイズレート測定結果 (横軸= ΔV)

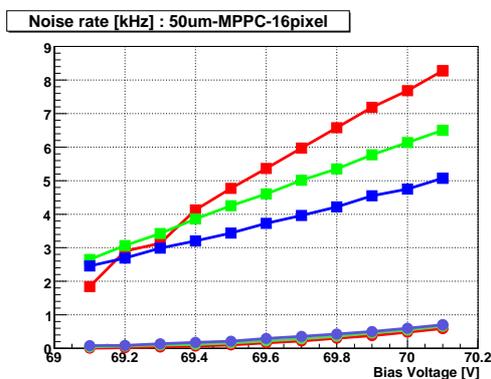


図 B.11: 50 μ m 16 ピクセル ノイズレート測定結果

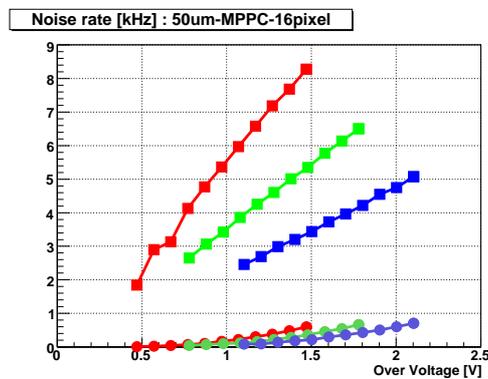


図 B.12: 50 μ m 16 ピクセル ノイズレート測定結果 (横軸= ΔV)

B.3 ノイズレート

ノイズレートの測定結果を示す。ピクセル数が小さいために、ノイズレートは非常に小さい値になっている。

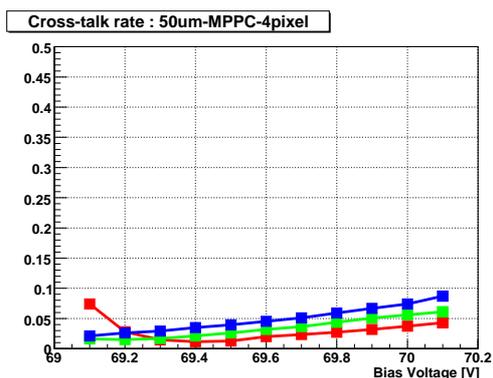


図 B.13: 50 μm 4 ピクセル クロストークレート測定結果

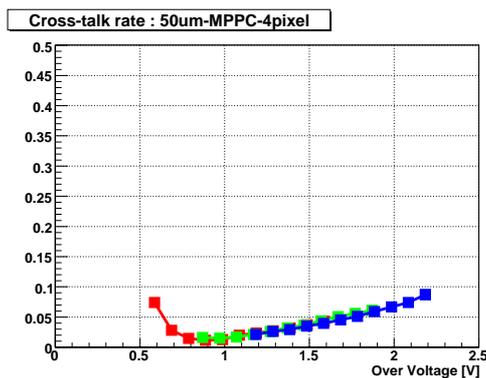


図 B.14: 50 μm 4 ピクセル クロストークレート測定結果 (横軸= ΔV)

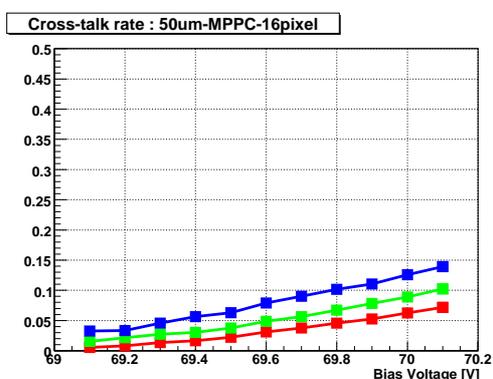


図 B.15: 50 μm 16 ピクセル クロストークレート測定結果

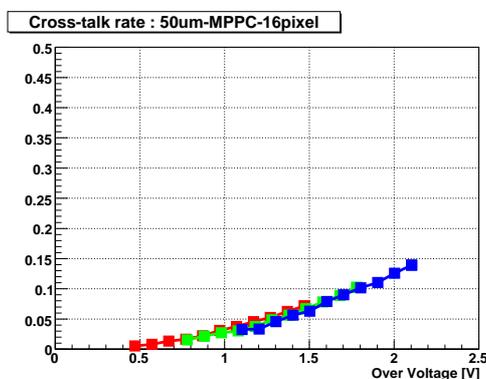


図 B.16: 50 μm 16 ピクセル クロストークレート測定結果 (横軸= ΔV)

B.4 クロストークレート

隣のピクセルが存在しないために、1ピクセルでクロストークは存在しない。また、最外縁部に位置するピクセルから外へ飛来した二次光子はクロストークを起こし得ない。全体数に比較した際に端に位置するピクセルの割合がピクセル数が少ない素子ほど高いために、ピクセル数が少ない素子ほどクロストークレートは低い傾向にある。この点に関する詳細な考察を、付録 C で行なう。

付録C クロストークに関する研究

C.1 ピクセル間クロストークについての考察

クロストークという現象は、ある APD ピクセルで生じたガイガー放電の最中に放出された光子が近辺、おそらくは大半が隣の APD ピクセルへと飛来し別のガイガー放電のトリガーになってしまう現象を指している。クロストークが起こると、本来 1p.e. でしかなかったシグナルが 2p.e. 以上に見えてしまう。ガイガー放電自体はピコ秒のオーダーで終息するので、クロストークが起こると 2 つのピクセルからの 2 つのシグナルはほぼ同時に起こるものとしてみることができる。同時に 2 つの APD ピクセルでガイガー放電が起こることによって、シグナルは波高が 2 倍になったものとして見えてくることになる。この章ではクロストークについて少数ピクセル素子の結果から $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ 角 MPPC 素子の結果までをまとめて考察を加えてゆく。

C.1.1 ピクセル間クロストーク

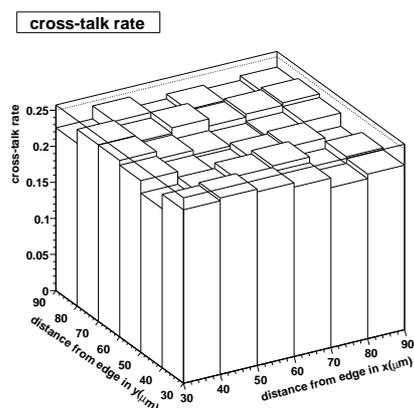


図 C.1: $50\mu\text{m}$ クロストークレート : 1 ピクセルスキャン測定結果

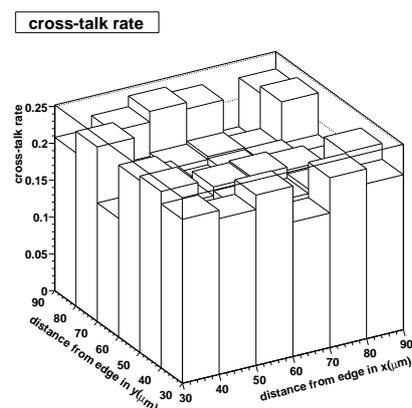


図 C.2: $100\mu\text{m}$ クロストークレート : 1 ピクセルスキャン測定結果

クロストークがどういうメカニズムで生じるかについては前項のとおりである。クロストークのトリガーとなる発生した 2 次的な光子が何処まで飛んでゆけるものなのかを考察する。まず、スポットサイズが $2\mu\text{m}$ まで絞ることが可能なレーザーシステムを用いてクロストーク+アフターパルスを起こす確率について 1APD ピクセル内をスキャンした結果を見る。 $100\mu\text{m}$ ピッチ素子のスキャンを行なった時の測定結果、図 (C.2) を見ればわかるとおり、クロストーク+アフターパルスを起こす確率は APD ピクセルの外縁で高く内側では低い。この効果はしかし、 $50\mu\text{m}$ ピッチ素子のスキャンを行なった時の測定結果、図 (C.1) ではピクセルが小さいためか見られない。アフターパルスを起こす確率に関し

ては APD ピクセル内においてほぼ均一であることが予想され、ここで見られる外縁部の高さはクロストークの影響によるものと考えられる。外縁部に近いほど、言い換えれば隣のピクセルに近いほどクロストークを起こす確率は高くなるということであり、これはクロストークの描像と矛盾しない。

ここから、2 次的に発生した光子はさほど飛距離を長く持てないと仮定される。もし非常に飛距離が長いのであれば、中央部からのクロストークも外縁部に劣らず見えてくるはずである。このような凹型の分布を有しているということは、クロストークという現象のほとんどが隣合うピクセル間でのみ起こるものであることから来ていると考えることができる

この仮定の元にクロストークに関してそのピクセル数との関係を考えてゆく。我々は現在、 $50\mu\text{m}$ ピッチ素子としてピクセル数が、1、4、16、400、667 のものを有している。これらの素子に関してクロストークレートを測定することで、ピクセル間クロストークがどのような描像で生じているのかについて考察を行なう。ピクセル数が多い素子に比べ、ピクセル数が少ない素子では有効面積外に出て行く 2 次光子の割合が高いためにクロストークレートは低いと予想される。極論してしまえば 1 ピクセルではクロストークはゼロであった。ピクセル数の異なる素子ごとにクロストークレートを測定し、比較を行なうことで 2 次光子発生構造について考察を行なう。

C.2 測定結果

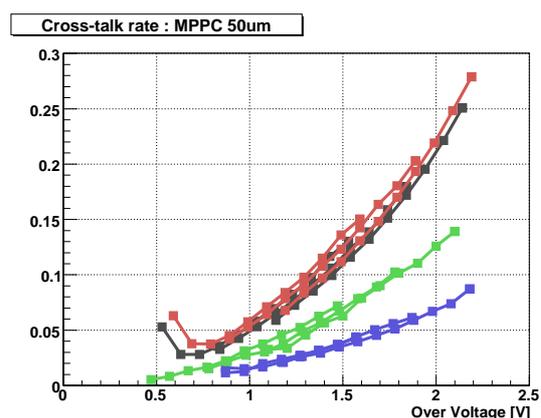


図 C.3: クロストークレート 測定結果。赤 … 667 ピクセル・黒 … 400 ピクセル (基準)・緑 … 16 ピクセル・青 … 4 ピクセル。

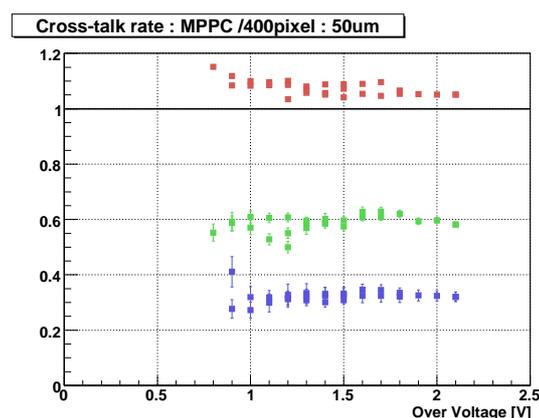


図 C.4: クロストークレート 比較。400 ピクセルの結果を 100% にとっている。赤 … 667 ピクセル・緑 … 16 ピクセル・青 … 4 ピクセル。

図 (C.3) にクロストークレートの測定結果を示す。赤いグラフが 667 ピクセル素子のもの、黒が 400、緑が 16、青が 4 ピクセルでの測定結果になっている。予想通り、ピクセル数が小さいものほどクロストークレートが小さくなっている。また、図 (C.4) に 400 ピクセルでの結果を基準ととったときの 4、16、667 ピクセルの測定結果の比を載せている。ピクセル数に従って、クロストークレートは決まった比が存在しているということがわかる。

C.3 考察

ここで、発生した 2 次光子の方向に依存性は無く、また横縦に隣り合うピクセル間のみクロストークが起こると簡単に仮定する。上下右左の四方向へ、均等にクロストークが起こることから 2 次光子がクロストークを起こす起こすイベントが 100 イベント中 x イベントだけ観測されるとする時、各辺からのクロストークはそれぞれ $x/4$ イベントになる。さらに最外縁部のピクセルから外側へ飛来する 2 次光子はクロストークを起こさないために、ピクセル数とクロストークレートとの関係は以下の式 (C.1) の通りになる。

$$\text{Cross-talk rate} = X - l \times \left(\frac{x}{4}\right) \quad (\text{C.1})$$

ここで、 X はピクセル数、 l は MPPC の最外縁にあるピクセルの個数を指している。この式を用いて予想されるクロストークレートを計算した。また、先の結果からその 400 ピクセル素子に対する比率を求め、以下の表 (C.1) に結果をまとめた。

ピクセル数	クロストークレート	予想比率	測定比率
1	0%	0	0
4	$0.5x\%$	0.5263	0.3225 ± 0.0046
16	$0.75x\%$	0.7895	0.5872 ± 0.0056
400	$0.95x\%$	-	-
667	$0.9615x\%$	1.0121	1.0750 ± 0.0048

表 C.1: クロストークレート比較 予想値

表 (C.1) より、予想される値よりもピクセル数の効果による増減が大きく利いてきているということがわかる。仮定はどうやら正しくないようではある。しかし、今の段階ではこの単純なモデル以上のものを考案しようとするには資料が不足している。継続した解析が必要である。

付録D GOMI Connector 設計図

GOMI Connector(General Optical MPPC Injection Connector) は、前置検出器のうち、INGRID 検出器と FGD とにおいて、MPPC の受光領域と波長変換ファイバーの端面とをつなぐためのコネクタとして開発した。コネクタに対する要請を以下にまとめる。

1. 波長変換ファイバーの端面の中心と MPPC 受光領域の中心とが正確に一致すること (横方向のアライメント)
2. 波長変換ファイバーの端面ができるだけ MPPC へと近づけられていること (縦方向のアライメント)
3. 上記 2 つの再現性が高いこと
4. 取り外しが容易であること
5. 遮光性が高いこと
6. 壊れにくいこと
7. MPPC が壊れてしまった際にコネクタの再利用ができること
8. 検出器の構造上の制限から、直径 8mm 以下、高さ 20mm 未満程度の大きさであること

今回、基本的なデザインは我々が決定し、コネクタの制作は有限会社ジーテック社に依頼した。大量に作るために型で成型することで、予想される精度は $100\mu\text{m}$ に抑えられる。我々はこの $100\mu\text{m}$ を許容しうるずれの最小値と見て、構造を考えた。

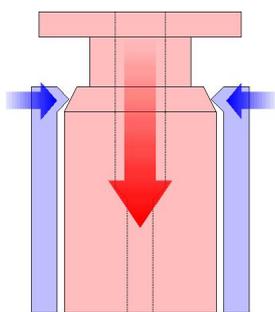


図 D.1: GOMI Connector : 押し付け概念図

MPPC セラミックパッケージの設計図は図 (3.2) に示した。MPPC の受光領域は、セラミックパッケージの外枠を基準に設置されているため、図で示された 5mm の直線部分 (横)、もしくは $\phi 6\text{mm}$ の部分 (縦) にあわせるような構造にしなければならない。ここで 5mm の直線部分にはプラス方向にもマイナス方向にも誤差がついているが $\phi 6\text{mm}$ の部分にはマイナス方向にしか誤差がついていないことに着目する。 $\phi 6\text{mm}$ の穴を開けそこにセラミックパッケージを置く構造をとれば、セラミックパッケージが大きく出来上がってしまいコネクタに入らないという事態は起こりえない。この $\phi 6\text{mm}$ の部分を用いてコネクタと MPPC セラミックパッケージとのアライメントを取ることにする。さらにファイバーを固定する側の治具も $\phi 6\text{mm}$ にすることで、両者の中心を合わせる構造を考える。

ファイバー端面と受光領域との距離が変化すると、MPPC へ入る光量が変化する可能性がある。また、できるだけ光量を大きく取るためにはファイバーと受光領域とは近い方が望ましい。そこで、ファイバー治具を MPPC に押し付ける構造を考えた。

押し付ける構造に関して、図 (D.1) にその概念図を示す。本コネクタは2つのパーツから成っている。これをそれぞれファイバー側パーツ、MPPC マウント側パーツと呼称する。MPPC マウント側パーツには6本のツメ部分がついている。このツメ部分の先端の最狭部分は、その直径を 6mm よりも小さく取っている。また、ファイバー側パーツ側には $\phi 6\text{mm}$ の円筒形の上部に、円錐のように傾斜を持った部分が存在している。この傾斜部はMPPCを入れた時、6本のツメの弾性力によって6方向から均等に締め付けられ、ファイバー側パーツをMPPC セラミックパッケージへ押し付ける縦向きの力へ変換する。

この構造では、ツメ部分の弾性が重要である。そのため、耐摩擦磨耗性に優れ、弾性が高いポリアセタール樹脂を使用する。ツメ部分が壊れやすい印象を与えるようにも思えるが、弾性が高いために破損することは稀である。また、遮光性の要請から黒色のプラスチックを使用した。大きさも要求以下に抑えられ、MPPC の取り外しもコネクタの再利用も可能である。

また、MPPC をコネクタに挿入した後に2本のピンのいずれがシグナル読み出し用でいずれが電圧を負荷する方かを確認できるように、片方のツメの外側に薄く凸部を作ってある。この目印に従えば、MPPC を入れた後に正しい方向を確認できる。

GOMI Connector の写真を図 (D.2) に示す。左がMPPC マウント側パーツ、右側が波長変換ファイバー側パーツになる。また、MPPC を実際にマウントし、両パーツを接続した時の写真を図 (D.3) に示す。

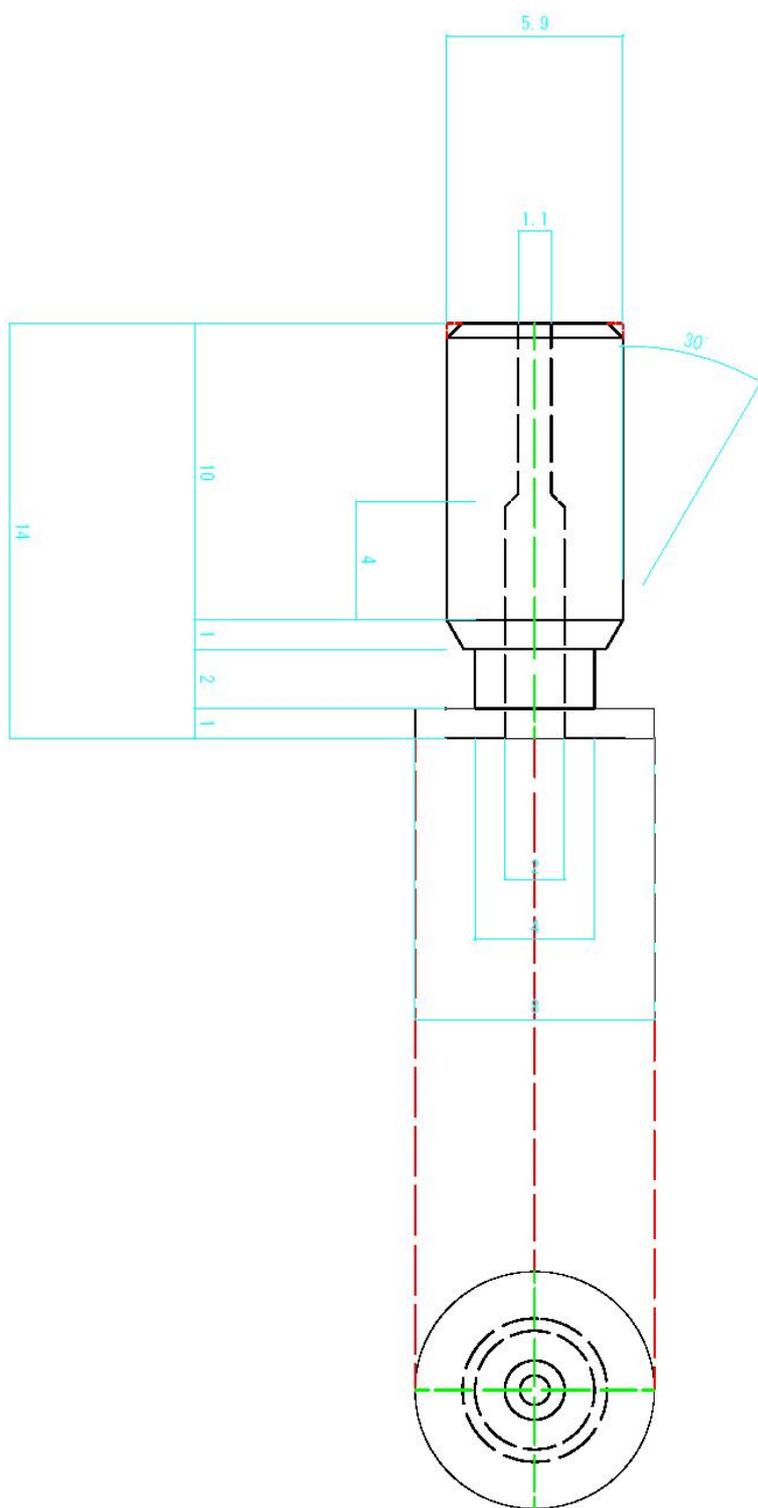


図 D.2: GOMI Connector 写真。左…MPPC マウント側パーツ・右… 波長変換ファイバー側パーツ。



図 D.3: GOMI Connector : MPPC 接続状態

GOMI Connector の設計図を示す。図 (D.4) に波長変換ファイバー側パーツの設計図を、図 (D.5) にMPPC をマウントする側のパーツの設計図を、それぞれ示した。



fiber housing

MPPC (Photo Detector) Plastic Package : Cap Type

図 D.4: GOMI Connector : 波長変換ファイバー側パーツ

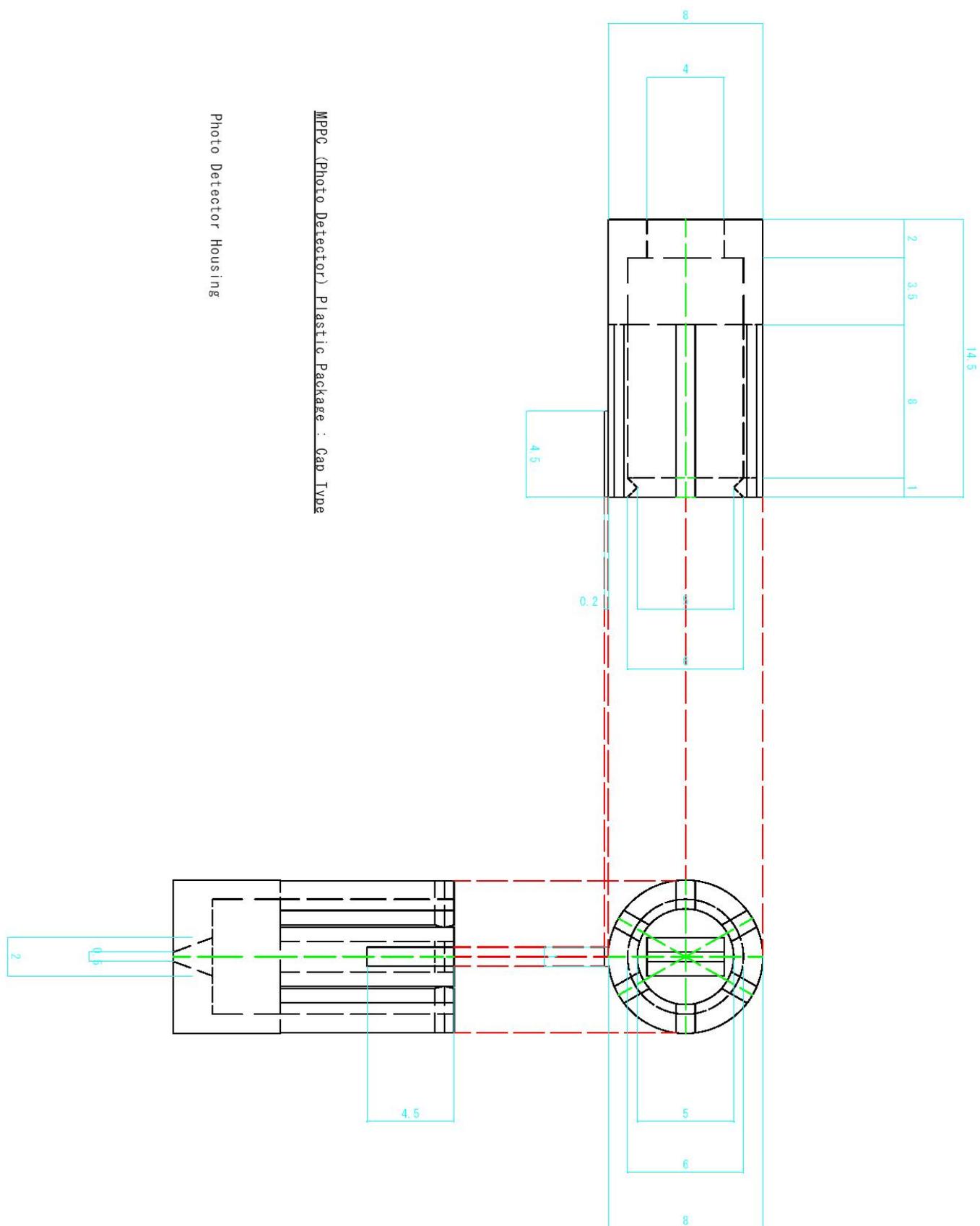


図 D.5: GOMI Connector : MPPC マウント側パーツ

付録E 擦子式コネクタ

擦子式コネクタは GOMI Connector の試作機として最も初めに考案されたモデルである。その要請等は付録 D で述べた。このモデルでは、接続にキャップではなく擦子を用いている。図 (E.6)、図 (E.7) に我々が考案した擦子式プラスチックコネクタの設計図をあげる。擦子式として 2 種類のコネクタを考案、作成を依頼した。ここでは 2 パーツモデル、3 パーツモデルとここでは呼称する。これらは試作品であるので型ではなく削り出しによって作成されている。遮光性を考えて、使用した素材は黒色のアクリロニトリル-ブタジエン-スチレン樹脂 (ABS) を使用した。非常に単純な構造をしているために壊れにくく、またコンパクトである。擦子を用いて接続しているので MPPC の取り外しも可能でありコネクタの再利用も利く構造になっている。

このコネクタは、擦子を締めることで MPPC のセラミックパッケージ外枠にファイバークラス側が当たり、そこで止まるまで擦子を回すことによって両者間の距離がゼロになるようにコントロールできる。ファイバークラス側を研磨でいくらか削ろうが両者間の間隔は変化しないために、再現性も非常に高いことが予想される。抜き差しによる再現性のテストを行なった。図 (E.1) に 2 パーツモデルの抜き差しのテスト結果を、図 (E.2) に 3 パーツモデルの抜き差しのテスト結果をあげる。やはり 2 パーツモデルの方が 3 パーツモデルよりも再現性が高いということがわかる。しかし 2 パーツモデルも実際に使用を考えた時にある欠点が見えてくる。

これらのコネクタの利点と欠点をまとめよう。2 パーツモデルは再現性が非常に高い。しかし、波長変換ファイバークラスと MPPC ピンとの両方を固定されてしまった時、擦子を回転させることが出来なくなってしまう。ファイバークラスと MPPC マウント治具との間にもう一つパーツをはさんだ 3 パーツモデルでは、回転させるパーツが独立になっているために両者が固定されていたとしても擦子を回すことができる。しかし反面ファイバークラスと MPPC マウント治具とがパーツを一つ分挿んで介しているため、その分だけ横方向のアライメントが 2 パーツモデルに比較した時に低くなる。また、擦子式は接続の際に擦子を回さなければならず、数万以上のオーダーになった時にはそれは重労働になる。以上のような困難が在るために擦子式コネクタの案は取り止め、新たにキャップ式コネクタの開発、設計を行なった。

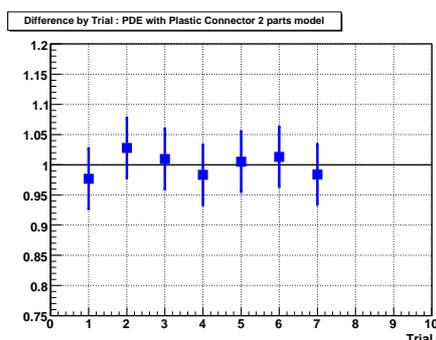


図 E.1: 再現性 : 2 パーツモデル

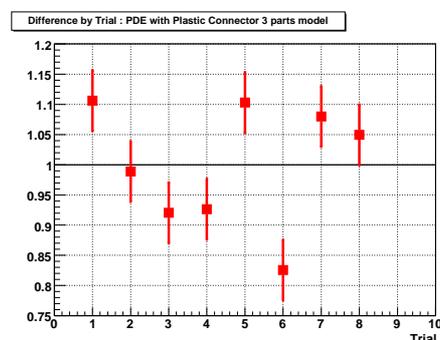


図 E.2: 再現性 : 3 パーツモデル

図 (E.3) に掬子式コネクタの概念図を示す。掬子を締めて調節ができるために、波長変換ファイバー端面と MPPC との距離はコネクタの精度に関係なくできるだけ近づけることができる。

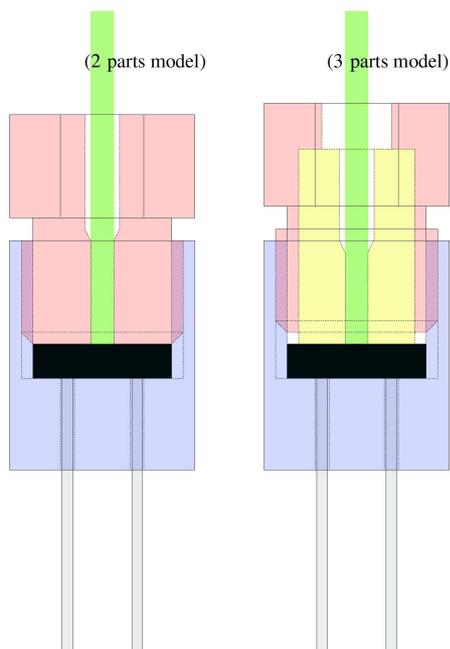


図 E.3: 掬子式コネクタ：概念図

図 (E.4) に 2 パーツモデルの掬子式コネクタの写真を示す。波長変換ファイバーが固定されるのは、2 パーツモデルでは掬子である左のパーツ、3 パーツモデルでは中央のパーツになり、これは自由に回転するために波長変換ファイバー、MPPC とともに固定されていても問題なく掬子部分を回転できる。



図 E.4: 写真：2 パーツモデル



図 E.5: 写真：3 パーツモデル

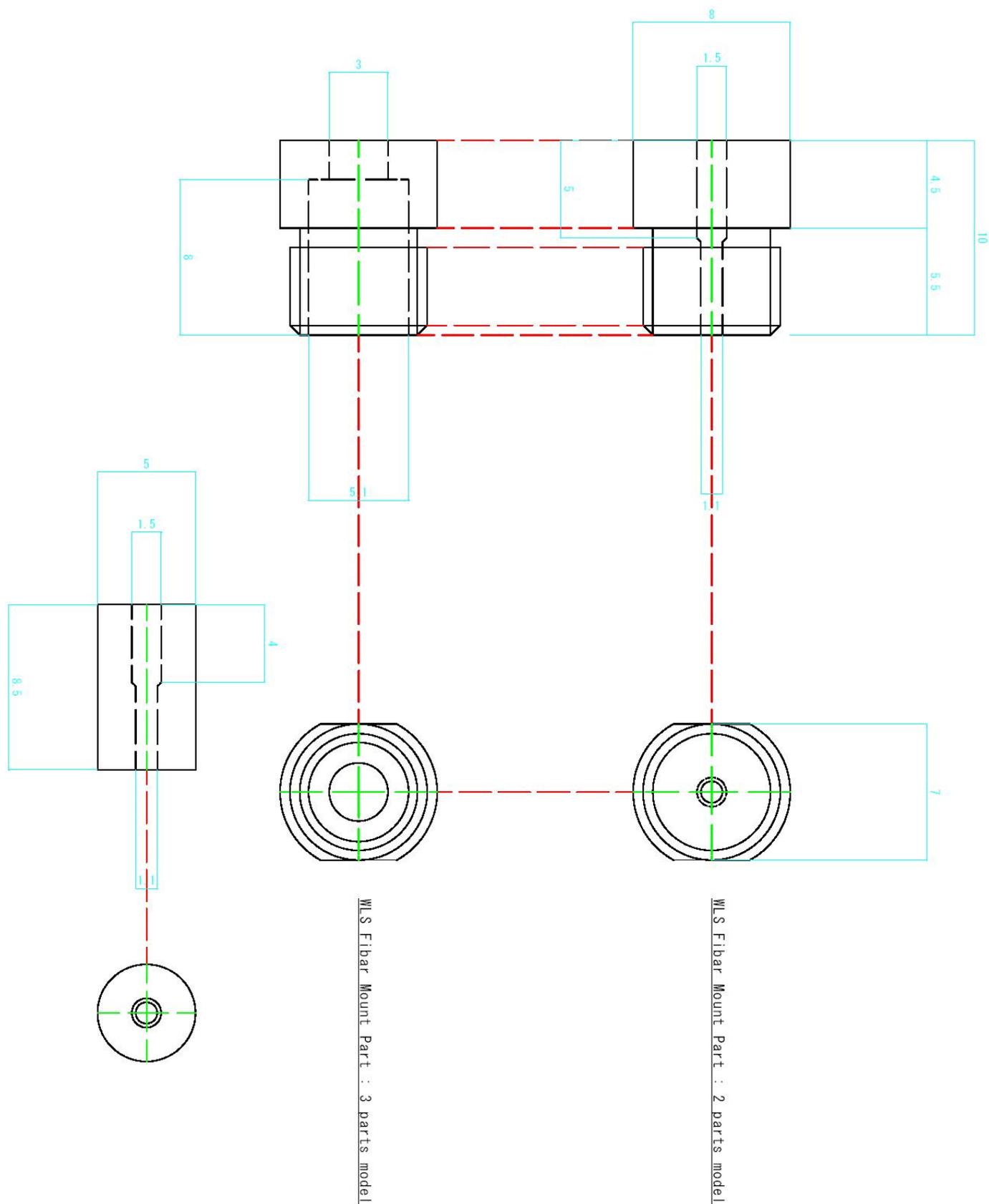


図 E.6: 換子式コネクタ : 波長変換ファイバー治具

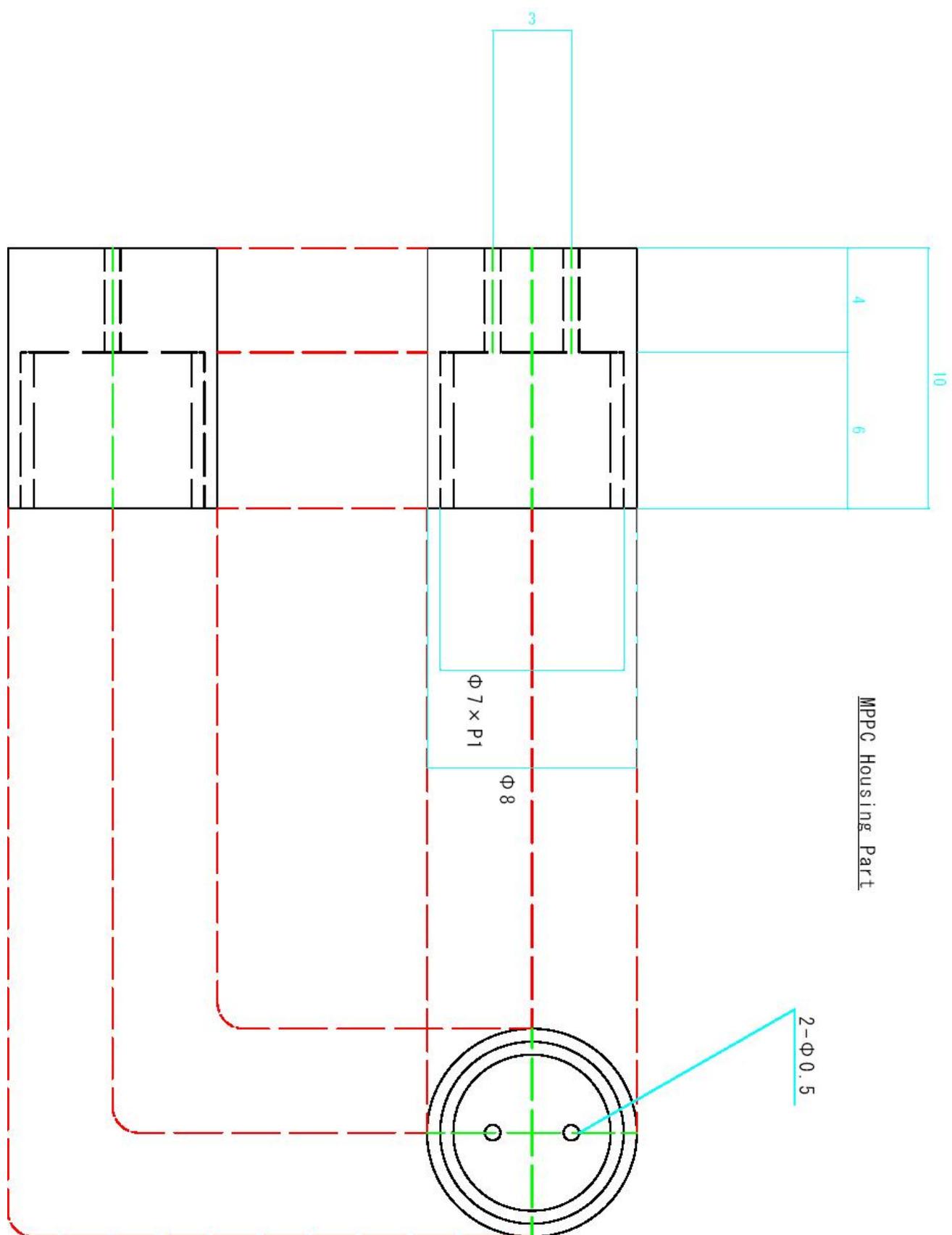


図 E.7: 抜き式コネクタ : MPPC 治具

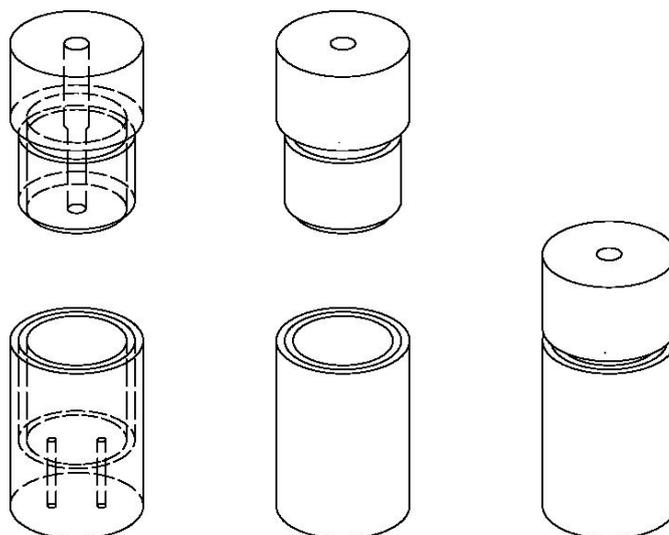


図 E.8: 換子式コネクタ : 2 パーツモデル

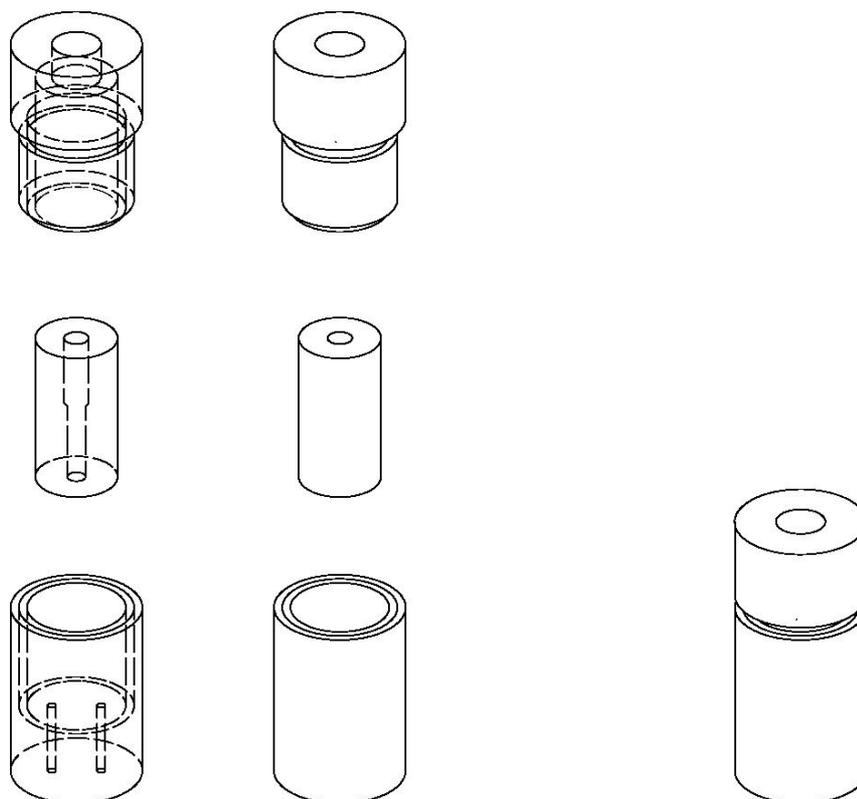


図 E.9: 換子式コネクタ : 3 パーツモデル

付 録 F MPPC 素子の持つ個体差の測定

300 個の $50\mu\text{m}$ ピッチ、 $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ 角 MPPC 素子に関してその個体差を測定した。使用した MPPC 素子の型番は S10362-11-050CK である。この測定では、32 チャンネル Trip-t ボードを初めて用いて測定を行なった。

F.1 セットアップ

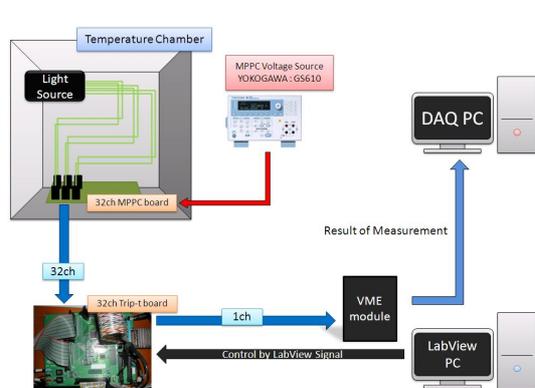


図 F.1: 300MPPC 素子測定 セットアップイメージ図



図 F.2: 300MPPC 素子測定 実際のセットアップ写真

本測定のセットアップを述べる。図 (F.1) はそのイメージ図であり、実際の写真が図 (F.2) になる。構造としては、第 5 章に述べた性能評価システムと同じである。ただし、幾つか相違点が存在する。

- 32 チャンネル Trip-t テストボード

この時点では試作機であり、幾つかの不備があった。基板上的オペアンプへ電圧を付加させようとすると、Trip-t の制御に支障をきたすと言う効果が見られ、実際に基板上的オペアンプを測定に使用することができなかった。今回の測定では、図 (F.3) で示すように、止むを得ず別に作成したオペアンプ基板へシグナルを移送し、測定を行なった。しかしそのために回路全体のグラウンドが非常に安定せず、ノイズが非常に多い測定結果になってしまった。

- オペアンプ

既述したとおり基板上的のものは使用できず別個に基板を作成した。Trip-t チップの出力からシグナルを牽引しオペアンプへ通している。

- MPPC 電源

横河電機製電源 GS610 を使用した。この時点では電源の遠隔操作に成功しておらず、制御は手動で行った。

- 恒温槽

恒温槽に関するプログラム動作に成功しておらず、手動で設定を行なった。この測定では温度は 20°C のみで測定を行なった。



図 F.3: 32 チャンネル Trip-t テストボード セットアップ図。図で示すように、基板上的オペアンプへ至る信号線を取り出し、別の基板上に作成した回路へ信号を牽引し VME へ移送した。このため GND が安定せず、測定に困難が伴うことになった。

F.2 測定前の準備

測定を開始する前に測定しておかなければならない項目について報告する。まず第一に Trip-t のゲインを校正しなければならない。今回の実験では、既に良くキャパシタンスの容量の知られている過去の MPPC 素子を用いてこの校正を行った。また、PDE の測定に際し各チャンネルに移送される光量の値を測定して置かなければならない。今回の測定では PMT を用いて相対的な PDE(relative PDE) の測定を行なう。各チャンネルにおいて PMT を接続し、各点においての光量を測定しその結果を用いて relative PDE の測定を行なった。 15°C での光量分布を図 (F.4) に挙げておく。このように 32 という非常に多チャンネルの測定にありながらそれぞれの MPPC へ移送される光量は非常に揃ったものになっている。

F.3 測定・解析

以降に測定結果を示す。全て 20°C の時の測定結果になる。ゲイン、PDE、クロストーク+アフターパルスを起こす確率、の 3 つの特性は温度には因らない ΔV のみの関数であり、その ΔV に対する挙動は同じであることがわかっている。すなわち、特性のばらつきは全てブレイクダウン電圧のばらつきに起因するものである。図 (F.5) にゲインの測定結果から求められた APD ピクセルのキャパシタンスの測定結果をあげる。キャパシタンスは非常によく揃っているということがわかる。ブレイクダウン電圧のばらつきを図 (F.6) にあげる。大部分の MPPC 素子は約 1V の範囲で分布しているということがわかる。しかし、わずかに高いブレイクダウン電圧を有している MPPC 素子が幾つか混入しているということがわかった。

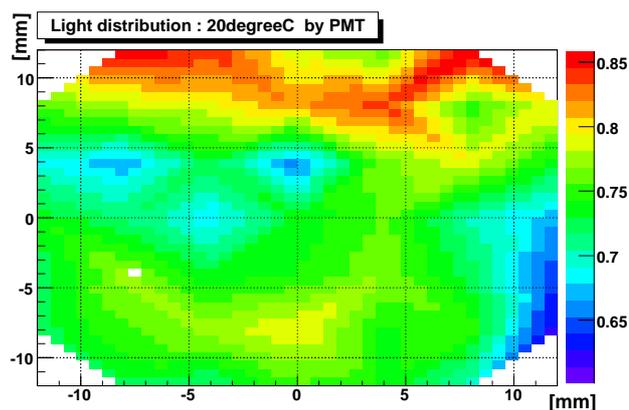


図 F.4: PMT による測定 (20°C)

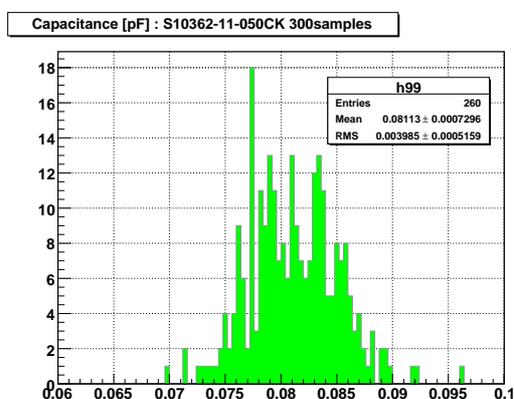


図 F.5: キャパシタンス測定結果

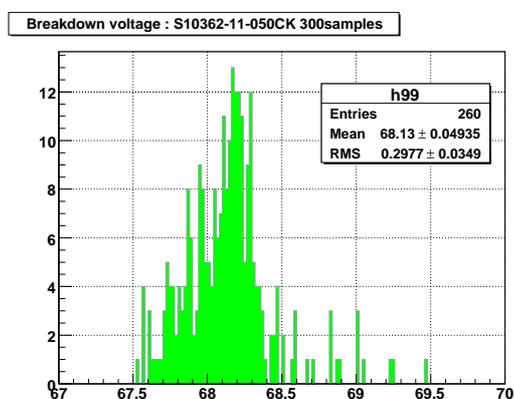


図 F.6: ブレイクダウン電圧測定結果

各特性の値がどのくらいのばらつきを有しているのかについて、同じ ΔV の点での値について取り出し比較を行なってみる。ここではゲイン、PDE に関しては $\Delta V = 1.5V$ での比較を、ノイズレート、クロストーク+アフターパルスを起こす確率に関しては $\Delta V = 2.0V$ での点での比較を行なった。

表 (F.1) に個体差の測定結果を示す。ゲイン、コネクタの効果を含めた PDE、クロストーク+アフターパルスを起こす確率の 3 つに関しては個体差はブレイクダウン電圧の個体差に起因するものであるということがわかった。この 3 つの特性に関しては、 ΔV でスケールした際の個体差は非常に小さい。一方で、ノイズレートは個体差が大きいことがわかった。ここで、ノイズの $\Delta V = 2.0V$ の時での測定結果を求められたブレイクダウン電圧を横軸にとって結果をプロットしてみる。図 (F.11) を見ると、ブレイクダウン電圧が高い MPPC 素子ほどノイズレートは小さい傾向にあるということがわかる。この両者の間の相関についてはまだ詳しいことはわかっていない。

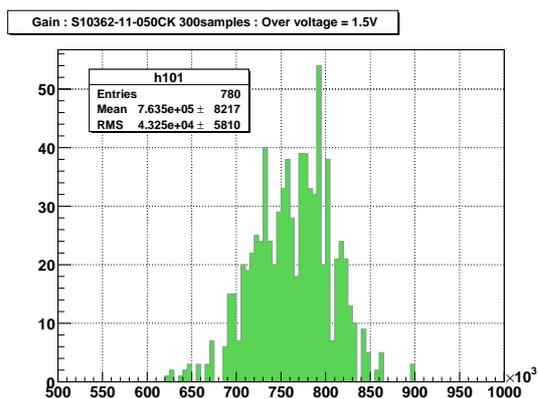


図 F.7: ゲイン測定結果 $\Delta V = 1.5V$

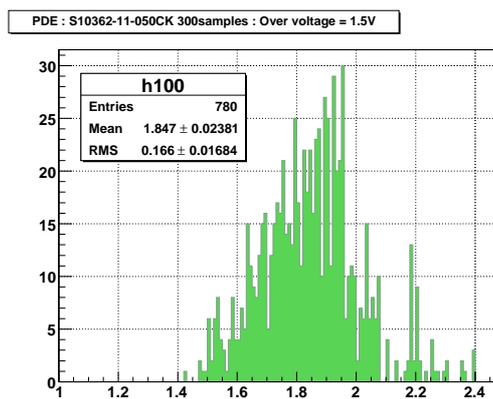


図 F.8: PDE 測定結果 $\Delta V = 1.5V$

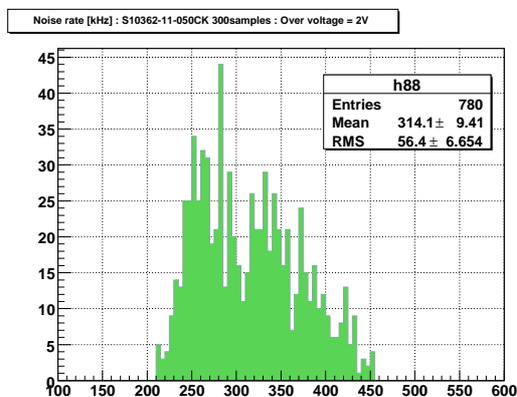


図 F.9: 1p.e. ノイズレート測定結果 $\Delta V = 1.5V$

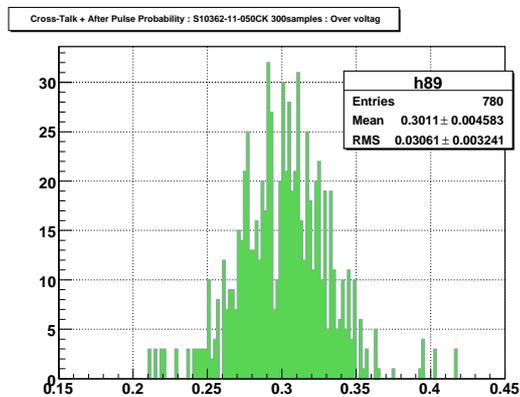


図 F.10: クロストーク+アフターパルス測定結果 $\Delta V = 2.0V$

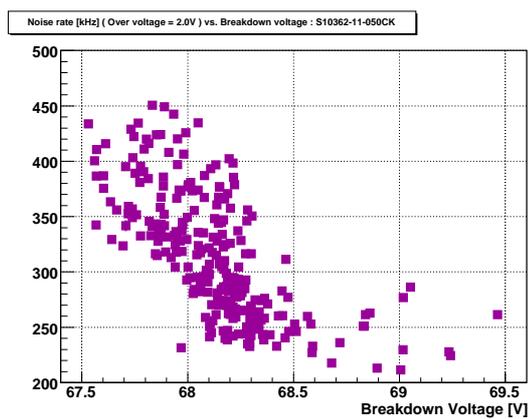


図 F.11: ノイズレートとブレイクダウン電圧との相関

index	中心値	二乗平均平方根 (RMS)	RMS/中心値
ゲイン	763500	43250	0.057
PDE(コネクタ込み)	1.85	0.17	0.090
ノイズレート	314.1kHz	56.4kHz	0.180
クロストーク+アフターパルス	0.301%	0.0306%	0.102
キャパシタンス	0.08113pF	0.00399pF	0.049

表 F.1: 50 μ m 400 ピクセル MPPC 300MPPC 素子 特性ばらつきまとめ

F.4 備考

この測定を通して、多量の MPPC 素子の性能評価システムに関して問題点を浮き彫りにすることが出来た。この測定結果をベースに、精度の高い測定が可能となるような性能評価システムの構築を行なった。また自動化の不備のこの時点では大きな問題であった。恒温槽、及び電源の操作を手作業で行なっており、労力の面で大きな問題になる。これらの問題点は、現時点では改善することができている。

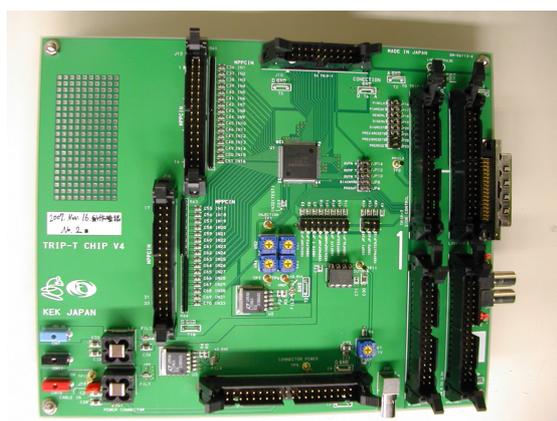


図 F.12: 32 チャンネル Trip-t テストボード 試作機最終形図。基板上のオペアンプの動作を確認し、基板下部のコネクタから VME へ信号を移送する。GND が先の基盤と比較して非常に安定することになり、測定の精度が格段に向上すると共に、労力の面でも大きな向上が見込まれる。

個体差測定試験後に作成された最新の基板について、写真を図 (F.12) へ示す。新しい基板では基板上のオペアンプも正常に動作し、グラウンドレベルが大幅に安定化された。基本的な構造は同じであるが、初期モデルに外部から加えた修正点を基板内に組み込んでいる。修正点を以下に示す。

- C16・C20・C78 について、ピンの位置をまとめた。回路図に関しては、付録 G 参照。プレテスト時にはケーブルで外からつなげていたが、この最終版では基板内で修正を施している。
- デジタル GND とアナログ GND との接続を行なった。Trip-t には電圧の入力としてアナログとデジタルの 2 つが存在している (共に 2.5V)。この 2 つに対応して GND も 2 つ存在しており、これまで両者は基板内では隔離されていたが最終版ではブリッジを介して接続している。これにより何らかの問題が発生した場合はブリッジを物理切断することで、元のように隔離させることもできる。

- テストピンの位置を是正した。これは直接的に性能には関係しない項目であるが、以前の基盤ではシグナルのテストを行う際のテストピンがフラットケーブルの下に位置していた。これを中央部へ移動させ、さらにホールからピンへ変えることによってプローブを用いてのチェックが非常に容易になった。

以上の変更を加えることによって基板上のオペアンプを動作させることに成功した。これによって GND の安定性が飛躍的に高まり、より誤差の少ない測定が可能になっている。

付録G 32チャンネル Trip-t ボード回路図

測定に使用した 32 チャンネル Trip-t ボードの回路図を示す。ここでは簡単にボードについての設定に関して述べる。

今回我々が考えている通常の使用に際しては、ジャンパーを 3 つ用意する。

1 つ目のジャンパーは、この基板の電源供給に関するものである。第 5 章で述べたように、このボードへは $\pm 5V$ を供給することで、Trip-t チップ、オペアンプ両方へ電圧を供給することができる。ここではレギュレーターを用いることで、供給された $\pm 5V$ から $+2.5V$ を作り Trip-t へ供給する構造をとる。Trip-t チップには、電源のデジタル入力 (VDDD) とアナログ入力 (VDDA) とが存在しており、ここではともに $2.5V$ を供給している。両者へ送る電圧は、基板上に設置された可変抵抗を用いることで個別に制御することが可能な構造になっている。 $+5V$ の供給源として、外部電源、VME モジュールの 2 通りをジャンパーを用いることで選択することができるようになっている。ここでは外部電源を使用するので、図 (G.5) 中の「J19」へジャンパーを設置する。VME モジュールを使用する際は「J17」へ設置する。

また、Trip-t を制御するためのシグナルは現在 NI 社製のモジュールを用いているが、将来的に VME の PPG (Pulse Pattern Generator) モジュールからの信号で制御を行なう時のために、フラットケーブルからの信号の受け口も用意されている。VME、LED のトリガーに関して、このどちらのモジュールを使用したかをジャンパーの設置によって選択することができる。対応す位置にジャンパーを設置しなければならない。今回の測定では、NI 社製の LabView モジュールを使用するので、図 (G.2) 中の「J4」(LED トリガー)・「J7」(VME トリガー) へジャンパーを設置する。PPG を使用する際には、「J4」(LED トリガー)・「J7」(VME トリガー) へ設置する。

この 3 つのジャンパーに関して、設置を行なわないとボードに電圧が供給されなかったり、トリガー信号が途中で断線してしまっていたりと測定ができないので注意が必要である。

次に、基板上に設置されている可変抵抗に関して説明を行なう。基板上には全部で 5 つの可変抵抗が設置されている。

まず、図 (G.5) 中の「VR7」に関して述べる。このセットアップでは Trip-t の出力シグナル上の $+1V$ のオフセットをキャンセルするために、供給された $+5V$ から $+1V$ を作り VME モジュールへ移送している。この $+1V$ を、可変抵抗「VR7」によって設定することができる。測定の前に値を確認する必要がある。

また、基板中央部に 4 つの可変抵抗「VR1」・「VR2」・「VR3」・「VR4」が設置されている (図 (G.2))。「VR1」・「VR3」は「vref」の値を設定するためのものであり、「VR2」・「VR4」は「vth」の値を設定するものである。ここでは、 $vref=2.5V$ 、 $vth=1.5V$ に設定している。この値が適切でない場合、Trip-t チップを LabView PC からの信号によって設定できなくなってしまう。

以上、基板を使用する前の注意点に関して列挙した。ジャンパーを 3 つ用意し、適切に設置すること。可変抵抗値を適切に設定すること。この 32 チャンネル Trip-t ボードを実機で使用する際には、この 2 点を必ず確認しなければならない。

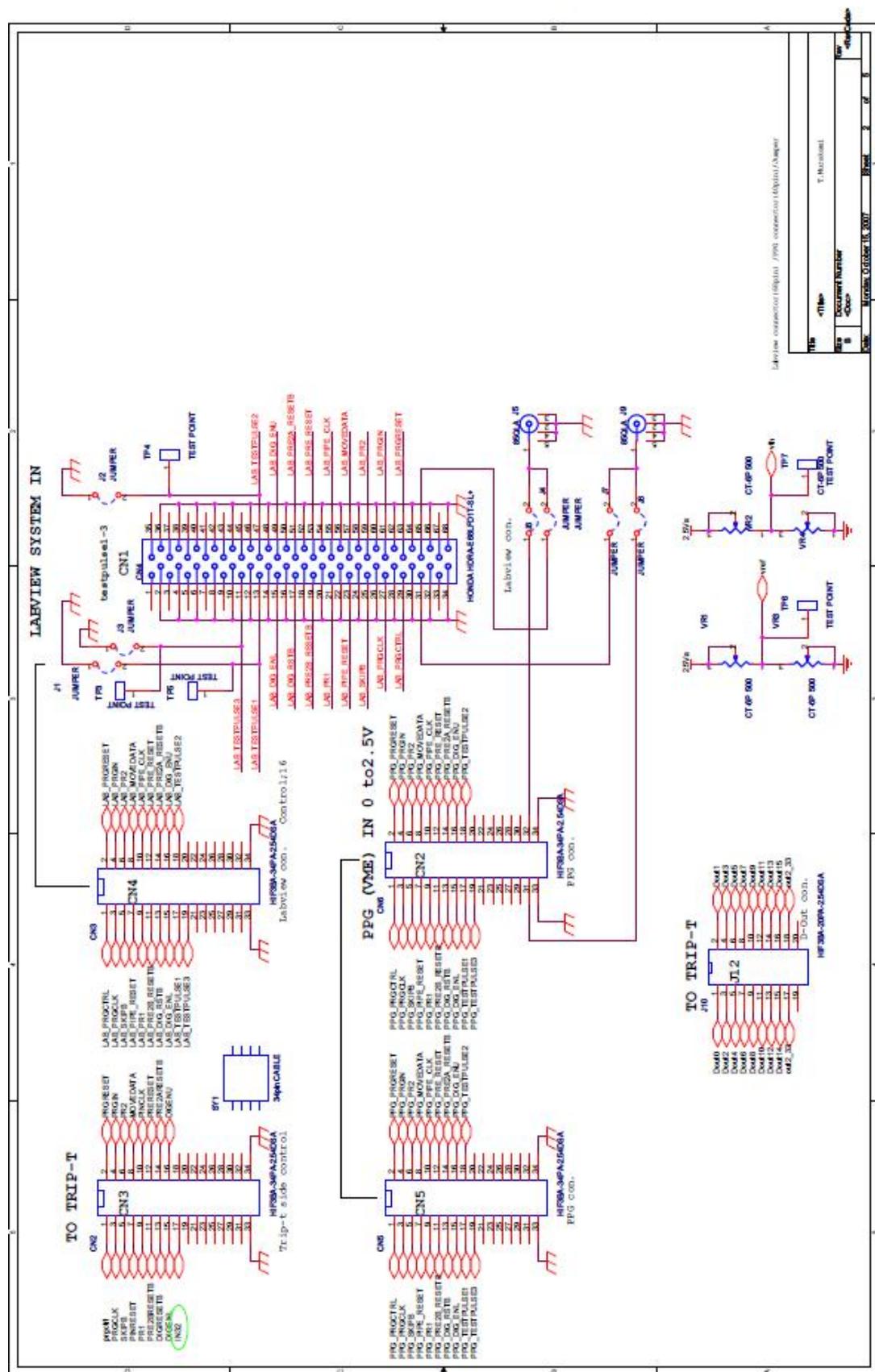


図 G.2: 32チャンネル Trip-t ボード回路図 (2/5)

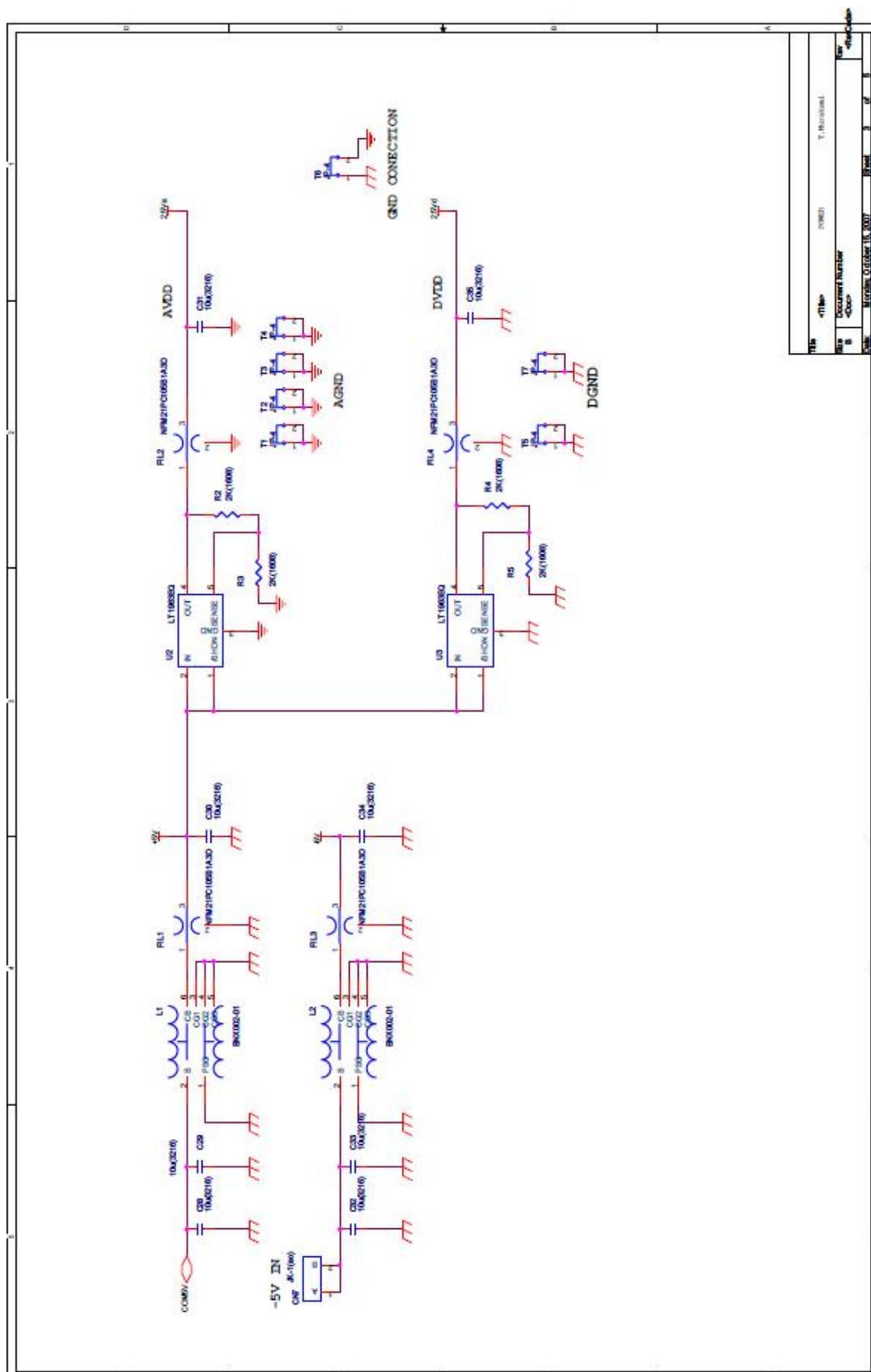


図 G.3: 32チャンネル Trip-t ボード回路図 (3/5)

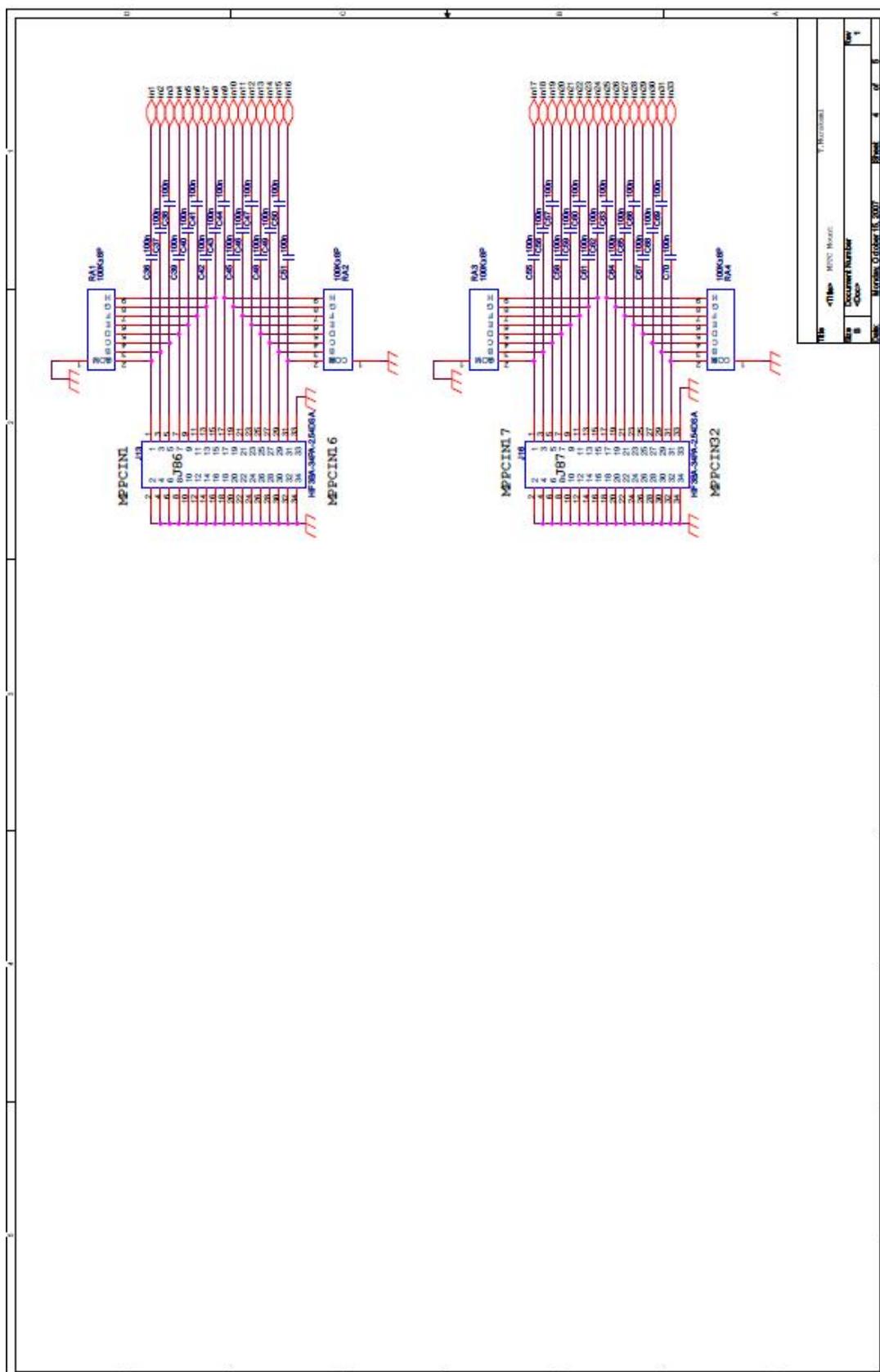


図 G.4: 32チャンネル Trip-t ボード回路図 (4/5)

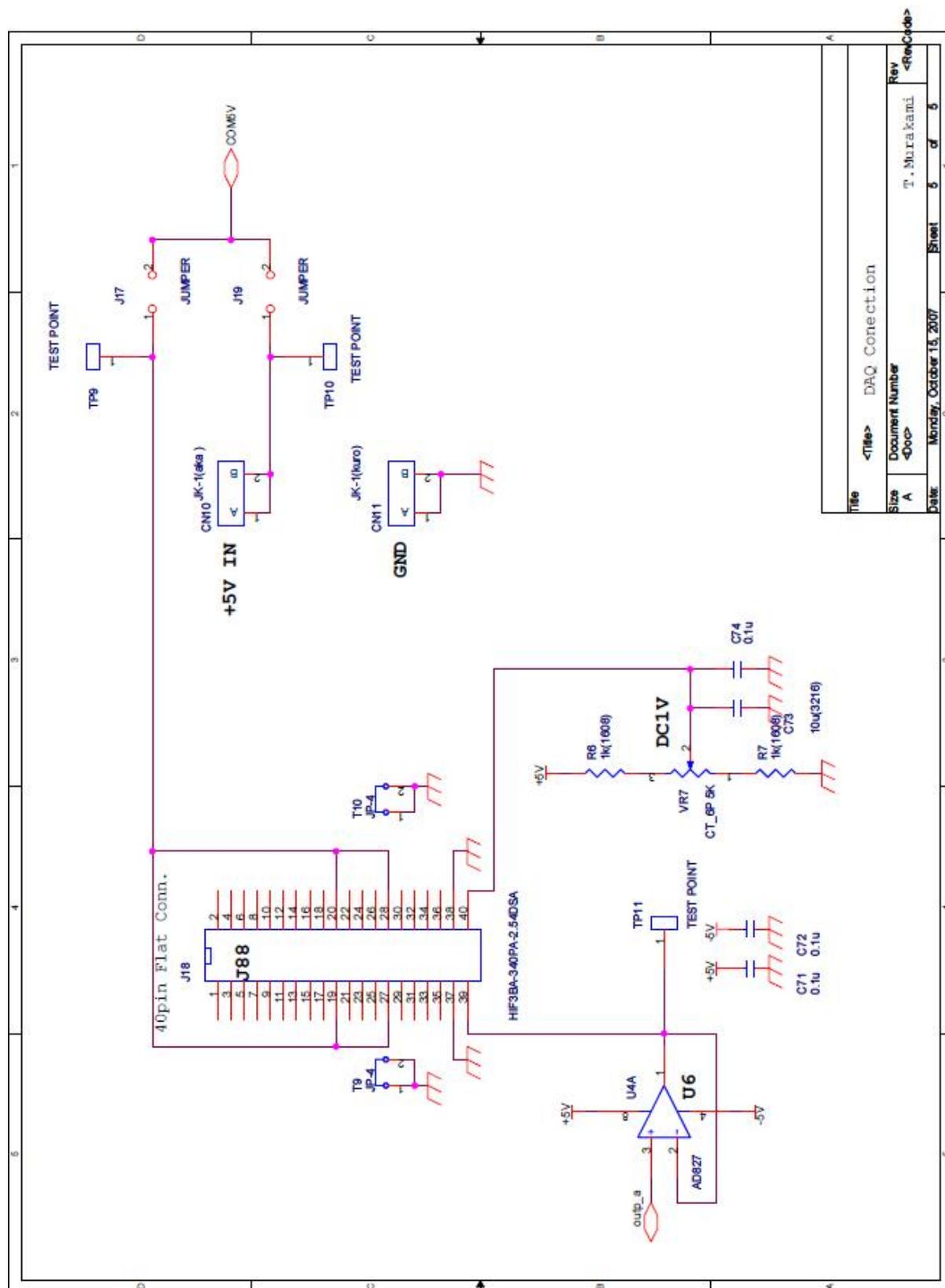


図 G.5: 32チャンネル Trip-t ボード回路図 (5/5)

関連図書

- [1] Y. Ashie et al. [Super-Kamiokande Collaboration], “Evidence for an oscillatory signature in atmospheric neutrino oscillation,” *Phys. Rev. Lett.* 93, 101801 (2004).
- [2] M. H. Ahn et al. [K2K Collaboration], “Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment,” *Phys. Rev. D.* 74, 072003 (2006).
- [3] D. G. Michael et al. [MINOS Collaboration], “Observation of Muon Neutrino Disappearance with the MINOS Detectors in the NUMI Neutrino Beam,” *Phys. Rev. Lett.* 97, 191801 (2006).
- [4] J. Hosaka et al. [Super-Kamiokande Collaboration], “Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-I,” *Phys. Rev. D.* 74, 032002 (2006).
- [5] S. N. Ahmed et al. [SNO Collaboration], “Measurement of the total active B-8 solar neutrino flux at the Sudbury Neutrino Observatory with enhanced neutral current sensitivity,” *Phys. Rev. Lett.* 92, 181301 (2004).
- [6] T. Araki et al. [KamLAND Collaboration], “Measurement of neutrino oscillation with KamLAND: Evidence of Spectral distortion,” *Phys. Rev. Lett.* 94, 081801 (2005).
- [7] M. Apollonio et al. “Search for neutrino oscillations on a long base-line at the CHOOZ nuclear power station,” *Eur. Phys. J. C* 27, 331 (2003).
- [8] Y. Itow et al., “The JHF-Kamioka neutrino project,” arXiv:hep-ex/0106019, <http://neutrino.kek.jp/jhfnu/>.
- [9] 川向 裕之, 修士論文, 京都大学 (2007).
- [10] B. Dolgoshein et al., “Status report on silicon photomultiplier development and its applications,” *Nucl. Instrum. Meth. A* 563, 368 (2006).
- [11] GLD Concept Study Group, “GLD Detector Outline Document,” available online from <http://ilcphys.kek.jp/gld/documents/dod/gliddod/pdf/>.
- [12] N. Otte et al., “The SiPM -A new Photon Detector for PET,” *Nucl. Phys. B (Proc Suppl.)* 150, 417 (2006).
- [13] 田口 誠, 修士論文, 京都大学 (2006).
- [14] KEK 測定器開発室 定例ミーティングにて.
- [15] H. Kressel, “Semiconductor devices for optical communication,” *Topics in applied physics* vol.39, Springer (1982).

- [16] A. L. Lacaíta et al., “On the Bremsstrahlung Origin of Hot-Carrier-Induced Photons in Silicon Devices,” IEEE Transactions on electron devices, vol 40, n^o, 577 (1993).
- [17] O. Mineev et al., “Scintillator counters with multi-pixel avalanche photodiode readout for the ND280 detector of the T2K experiment,” arXiv:physics/0606037/.
- [18] J. Estrada et al., “D0 note” 4009 (2002).
- [19] The MINER ν A Collaboration, “The MINER ν A Technical Design Report,” available online from http://minerva-docdb.fnal.gov/0007/000700/028/TDR_v1.3.pdf/.
- [20] 浜松ホトニクス社 MPPC カタログ資料より
- [21] KEK 測定器開発室, <http://rd.kek.jp/>.