

修士論文

T2K 実験において用いられる
半導体光検出器 MPPC の大量測定

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
永井 直樹

平成 21 年 1 月 29 日

概要

T2K 実験は 2009 年 4 月開始予定の次世代長基線ニュートリノ振動実験であり、茨城県東海村に位置する J-PARC の 50GeV シンクロトロンにおいて生成された世界最高の強度を持つミュオンニュートリノビームを、295km 離れた岐阜県飛騨市に位置する世界最大の規模である 50000t 水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデにおいて観測する。T2K 実験はミュオンニュートリノ消滅モードにおける振動パラメータの精密測定と、未発見である電子ニュートリノ出現モードの発見を主目的としている。またニュートリノ振動実験としては初の試みである Off-Axis 法を採用しており、ニュートリノビームはその振動確率が観測点において最大となるように調節されている。

T2K 実験においては、ニュートリノ振動によってフレーバー毎の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の測定を、また Off-Axis 角の精密なモニタリングを行う必要があるため、様々な前置検出器を用いている。それらの前置検出器の大部分においてはシンチレーターを用いており、その光信号は波長変換ファイバーを用いて光検出器に送られる。ここで、実験における要請から、これらの光検出器には、磁場に対する耐性を持つこと、コンパクトであること、安価であること、かつ高い光子検出効率を持つことが求められる。我々はこれらの条件を満たす光検出器として Multi-Pixel Photon Counter(MPPC)を浜松ホトニクスと共同で開発してきた。本論文では、その中でも特に T2K 実験に採用した $1.3 \times 1.3\text{mm}^2$ の光電面面積を有する MPPC 約 17500 個において、ゲイン、ブレイクダウン電圧、キャパシタンス、ノイズレート、クロストーク、アフターパルス、光子検出効率、などの MPPC を特徴付ける性能の測定結果について述べる。

T2K 実験には非常に多くの読み出しチャンネルが存在する。その中で、我々は、前置検出器の一種である INGRID 検出器及び FGD にインストールされる MPPC のうち、約 17500 個の性能測定を行った。これらの大量の MPPC の性能測定を約 6 カ月で行う必要があったため、測定の効率化は必須であった。そこで、我々は複数の MPPC が同時測定可能であるような測定環境をハードウェアとソフトウェアの両側面から構築し、世界的にも類を見ない大量測定に成功した。現在、これらのテストされた MPPC はそれぞれの検出器にインストールされている。本論文においては、用いた性能評価システム、大量測定の結果について報告する。

目次

第1章	ニュートリノ振動	11
1.1	ニュートリノ	11
1.2	ニュートリノ振動	11
第2章	T2K 実験	14
2.1	T2K 実験の概略	14
2.2	T2K 実験の目的	14
2.3	Off-Axis 法	15
2.4	前置検出器: ND280	15
2.4.1	On-Axis 検出器: INGRID 検出器	17
2.4.2	Off-Axis 検出器	17
2.4.3	前置検出器で用いられる光検出器への要請	18
2.5	後置検出器:スーパーカミオカンデ	19
第3章	MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)	20
3.1	PPD(Pixelated Photon Detector)	20
3.2	APD(Avalanche Photodiode)	20
3.3	MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)	23
3.4	T2K 実験用 MPPC	24
第4章	MPPC の基礎特性	28
4.1	ゲイン	28
4.2	ブレイクダウン電圧	28
4.3	キャパシタンス	29
4.4	ノイズレート	29
4.5	クロストーク・アフターパルス率	29
4.6	PDE (Photon Detection Efficiency)	30
4.7	リニアリティ	31
4.7.1	リニアリティの測定方法	31
4.7.2	リニアリティの測定結果	32
4.8	T2K 実験における MPPC への要請	33

第 5 章	MPPC 複数同時測定システム	36
5.1	測定項目	36
5.2	測定装置	38
5.3	Trip-t	41
5.4	Trip-t ボード	41
5.5	DAQ 用 PC	42
5.6	LabView PC	44
5.7	VME モジュール	45
5.8	恒温槽と光源	47
5.9	温度のモニタリング	47
5.10	MPPC 電源	48
5.11	GOMI コネクタ	49
5.12	測定方法	49
5.12.1	測定前	51
5.12.2	データ取得	51
5.12.3	測定後	52
第 6 章	MPPC 大量測定結果	53
6.1	解析方法	53
6.2	ゲイン	55
6.2.1	ゲインの算出方法	55
6.2.2	ゲインの測定結果-1MPPC-	55
6.2.3	ゲインの測定結果-17686MPPCs-	55
6.3	ブレイクダウン電圧	57
6.3.1	ブレイクダウン電圧の算出方法	57
6.3.2	ブレイクダウン電圧の測定結果 -17686MPPCs-	57
6.4	キャパシタンス	58
6.4.1	キャパシタンスの算出方法	58
6.4.2	キャパシタンスの測定結果 -17686MPPCs-	58
6.5	ノイズレート	59
6.5.1	ノイズレートの算出方法	60
6.5.2	ノイズレートの測定結果-1MPPC-	60
6.5.3	ノイズレートの測定結果-17686MPPCs-	60
6.5.4	ノイズレートの温度依存性について	62
6.6	クロストーク・アフターパルス率	65
6.6.1	算出方法	65
6.6.2	クロストーク・アフターパルス率の測定結果-1MPPC-	66
6.6.3	クロストーク・アフターパルス率の測定結果-17686MPPCs-	66
6.7	relative PDE(Photon Ditection Efficiency)	69
6.7.1	relative PDE の算出方法	69

6.7.2	relative PDE の測定方法	69
6.7.3	波長変換ファイバー	71
6.7.4	relative PDE の測定結果-1MPPC-	72
6.7.5	relative PDE の測定結果-17686MPPCs-	72
6.8	故障率	74
6.9	INGRID 検出器および FGD での使用値	74
6.10	考察	76
6.10.1	測定結果におけるばらつき	76
6.10.2	誤差に対するまとめ	76
6.11	各測定量の V_{over} 依存性	77
6.11.1	結果	77
6.11.2	各測定量の平均値の V_{over} 依存性	80
6.11.3	考察	80
第 7 章	結論	84
付録 A	系統誤差の算出過程	87
A.1	ゲイン	87
A.2	ノイズレート	87
A.3	クロストーク・アフターパルス率	88
A.4	relative PDE	89
A.4.1	relative PDE の系統誤差について	89
付録 B	Trip-t の読み出し	92
B.1	Trip-t の読み出しシーケンス	92
B.2	Trip-t の A.OUT シグナル	92
付録 C	Trip-t ボード回路図	94
	参考文献	100

目次

2.1	T2K 実験の概念図	14
2.2	Off-Axis 法の概念図	15
2.3	Off-Axis 角ごとの π 中間子の運動量に対するニュートリノエネルギーの変化	16
2.4	$\theta_{oa} = 2^\circ, 2.5^\circ, 3^\circ$ のときの後置検出器におけるニュートリノのフラックス	16
2.5	INGRID 検出器の概念図	17
2.6	INGRID の各モジュールの概念図	17
2.7	Off-Axis 検出器	18
2.8	スーパーカミオカンデ	19
3.1	T2K 実験用 MPPC	21
3.2	受光面の拡大写真:各 APD ピクセルが見えている	21
3.3	APD ピクセルの概念図	21
3.4	逆電圧をかけた際のフォトダイオードの反応	21
3.5	APD 内の電界	22
3.6	APD の一連の動作	22
3.7	T2K 用 MPPC 表面の拡大写真	23
3.8	ADC ピクセル一つの等価回路	24
3.9	MPPC の等価回路	24
3.10	MPPC シグナルの ADC 分布	25
3.11	MPPC の 1p.e. シグナルのオシロスコープ波形	25
3.12	MPPC シグナルのオシロスコープ波形:一定時間で波形を重ねている	25
3.13	MPPC のパッケージの種類:左側が缶パッケージ、右側がセラミックパッケージ。浜松ホトニクス社のカタログより引用	26
3.14	MPPC と波長変換ファイバーの接続の概念図	26
3.15	T2K 実験用 MPPC の設計図	27
4.1	クロストークとアフターパルスの波形	30
4.2	リニアリティ測定用セッティング	32
4.3	出力電荷に対応する光量ごとのオシロスコープでの波形	33
4.4	入射光量 (~ 1600 フォトン) に対する MPPC の出力	34
4.5	線形フィッティングからのずれ	34
4.6	入射光量 (~ 100 フォトン) に対する MPPC の出力	34

5.1	ADC 分布 (光源有り)	37
5.2	ADC 分布 (光源無し)	37
5.3	セットアップ 1	38
5.4	セットアップ 2	38
5.5	システム概念図	40
5.6	Trip-t チップ	42
5.7	Trip-t ボード	43
5.8	MPPC ボード	43
5.9	Trip-t ボード概念図	43
5.10	Trip-t のブロックダイアグラム	44
5.11	LabView PC	45
5.12	LabView による制御概略	46
5.13	VME モジュール	46
5.14	SciBar DAQ ボード	46
5.15	恒温槽内部の様子	47
5.16	光源概念図	47
5.17	測定におけるタイムテーブル	48
5.18	恒温槽内の温度変化	48
5.19	MPPC とファイバーの接続前の様子	50
5.20	MPPC とファイバーの接続後の様子	50
6.1	ADC 分布の解析 1/4	54
6.2	ADC 分布の解析 2/4	54
6.3	ADC 分布の解析 3/4	54
6.4	ADC 分布の解析 4/4	54
6.5	ゲインのバイアス電圧依存性-1MPPC-	55
6.6	ゲインの V_{over} 依存性-1MPPC-	55
6.7	ゲインの V_{over} 依存性 -17686MPPCs-	56
6.8	ゲインの $V_{over} = 1.0V$ でのスライス (20)	57
6.9	ゲインの $V_{over} = 1.4V$ でのスライス (20)	57
6.10	シリアル番号に対するブレイクダウン電圧の分布	58
6.11	ブレイクダウン電圧の分布 (20)	59
6.12	キャパシタンスの分布 (20)	59
6.13	ノイズレートのバイアス電圧依存性-1MPPC-	61
6.14	ノイズレートの V_{over} 依存性-1MPPC-	61
6.15	ノイズレートの V_{over} 依存性 -17686MPPCs-	61
6.16	ノイズレートのスライス:左側が $V_{over} = 1.0V$, 右側が $V_{over} = 1.4V$, 青色が 15、緑色が 20、赤色が 25	63
6.17	各 V_{over} におけるノイズレートの温度依存性	64

6.18	各 V_{over} におけるノイズレートの温度依存性:式 (6.3) においてノイズレートが 1MHz になる点	64
6.19	各 V_{over} において、ノイズレートの平均値が 1MHz になる温度	65
6.20	各 V_{over} におけるノイズレートの温度係数	66
6.21	クロストーク・アフターパルス率のバイアス電圧依存性-1MPPC-	67
6.22	クロストーク・アフターパルス率の V_{over} 依存性-1MPPC-	67
6.23	クロストーク・アフターパルス率の V_{over} 依存性 -17686MPPCs-	68
6.24	クロストーク・アフターパルス率の $V_{over} = 1.0V$ でのスライス (20)	68
6.25	クロストーク・アフターパルス率の $V_{over} = 1.4V$ でのスライス (20)	68
6.26	relative PDE 測定セットアップの概念図	70
6.27	光量モニタリング用 MPPC ボード	70
6.28	光量モニタリング用 MPPC ボードの回路図	70
6.29	用いた LED の波長:NICHIA 社のカタログより引用	71
6.30	波長変換ファイバーの吸収再発光の波長域:クラレ社のカタログより引用	71
6.31	用いた PMT の量子効率の波長依存性:浜松ホトニクス社のカタログより引用	72
6.32	relative PDE のバイアス電圧依存性-1MPPC-	73
6.33	relative PDE の V_{over} 依存性-1MPPC-	73
6.34	relative PDE の V_{over} 依存性 -17686MPPCs-	73
6.35	relative PDE の $V_{over} = 1.0V$ でのスライス (20)	74
6.36	relative PDE の $V_{over} = 1.4V$ でのスライス (20)	74
6.37	ゲインの各 V_{over} におけるスライシングの様子	77
6.38	25 におけるゲインの各 V_{over} におけるスライシングの結果	78
6.39	ゲインの V_{over} 依存性	81
6.40	ノイズレートの V_{over} 依存性	81
6.41	クロストーク・アフターパルス率の V_{over} 依存性	82
6.42	relative PDE の V_{over} 依存性	82
A.1	ファイバーファクターの測定 (1 回目)	90
A.2	ファイバーファクターの測定 (2 回目)	90
A.3	ファイバーファクターの測定 (1 回目と 2 回目の相関)	90
A.4	測定状況の再現性	91
B.1	Trip-t の読み出しシーケンス	93
B.2	2 枚の Trip-t の出力 A_OUT からのシグナル	93
C.1	Trip-t ボード回路図 1	95
C.2	Trip-t ボード回路図 2	96
C.3	Trip-t ボード回路図 3	97
C.4	Trip-t ボード回路図 4	98
C.5	Trip-t ボード回路図 5	99

表目次

3.1	MPPC と PMT の性能比較	21
3.2	ノーマルモードとガイガーモードの特徴比較	22
4.1	各検出器における光検出器への要請	35
5.1	各項目の測定における光源の有無	37
5.2	MPPC に負荷される電圧	50
6.1	$V_{over} = 1.0V, 1.4V$ における 15、20、25 でのゲインの平均値 \pm RMS	56
6.2	15、20、25 でのブレイクダウン電圧の平均値 \pm RMS	58
6.3	15、20、25 でのキャパシタンスの平均値 \pm RMS	60
6.4	$V_{over} = 1.0V, 1.4V$ における 15、20、25 でのノイズレートの平均値 \pm RMS	62
6.5	$V_{over} = 1.0V, 1.4V$ における 15、20、25 でのクロストーク・アフターパルス率の平均値 \pm RMS	67
6.6	$V_{over} = 1.0V, 1.4V$ における 15、20、25 での relative PDE の平均値 \pm RMS	73
6.7	$V_{over} = 1.0V, 1.4V$ における 15、20、25 での全測定項目の平均値 \pm RMS	75
6.8	$V_{over} = 1.4V$ における 20 での各測定量の平均値、RMS、RMS/平均値	76
6.9	$V_{over} = 1.4V$ における 20 での各測定量の RMS/平均値、系統誤差、系統誤差以外のばらつき	76
6.10	ゲインの平均値 \pm RMS	78
6.11	ノイズレートの平均値 \pm RMS	79
6.12	クロストーク・アフターパルス率の平均値 \pm RMS	79
6.13	relative PDE の平均値 \pm RMS	80

第1章 ニュートリノ振動

T2K 実験は 2009 年開始予定の次世代長基線ニュートリノ振動実験であり、茨城県東海村に位置する J-PARC の 50GeV シンクロトロンにおいて生成された世界最高の強度を持つミューオンニュートリノビームを、295km 離れた岐阜県飛騨市に位置する 50000t 水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデにおいて観測する。また、T2K 実験はミューオンニュートリノ消滅モードにおける振動パラメータの精密測定と、未発見である電子ニュートリノ出現モードの発見を主目的としている。この章では、ニュートリノ振動の基礎について述べる。

1.1 ニュートリノ

ニュートリノとは、素粒子の一種であり、重力相互作用を除き、弱い相互作用のみを行う中性のレプトンである。1930 年に Pauli によって、崩壊で放出される粒子のエネルギースペクトルの連続性を説明するために導入され、1934 年に Fermi によって、放射性崩壊の理論に組み込まれた。また、1956 年に Reines と Cowan が、原子炉からの反電子ニュートリノを逆崩壊過程によって捕まえたことで、その存在が初めて実験的に観測された。

続いて、1962 年には中間子の崩壊過程において生じたニュートリノビームを標的に当てることでミューニュートリノの存在が確認された。2000 年にはテバトロンで生成されたニュートリノビームを写真乾板に当てる実験でタウニュートリノが検出され、1995 年の LEP 実験では Z ボソンの崩壊幅測定からニュートリノが 3 世代であることが確認された。

現在の素粒子理論の主流となっている標準理論ではニュートリノの質量が 0 とされており、また、各世代ごとにレプトン数が保存されるという仮定を置いていた。しかし、1998 年にスーパーカミオカンデグループによって、宇宙線が大気と衝突する際に生じる大気ニュートリノの観測 [1] からニュートリノ振動が存在するという報告がなされることで、初めてニュートリノに質量が存在することが示唆され、T2K 実験の基となった長基線ニュートリノ実験である K2K 実験 [2] によって、ニュートリノ振動は確立された。

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは、あるフレーバーを持ったニュートリノが、その時間発展において、別のフレーバーのニュートリノへと変化していく現象のことである。この現象が起こるためには以下の 2 つの条件を満たす必要がある。

1. ニュートリノに質量が存在する。
2. 弱い相互作用の固有状態 (ν_e, ν_μ, ν_τ) と質量の固有状態 (ν_1, ν_2, ν_3) の混合角が有限の値を持つ。

この条件下で、弱い相互作用の固有状態は質量固有状態の混合状態となっており、以下の式によって表わされる。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (\alpha = e, \mu, \tau, i = 1, 2, 3) \quad (1.1)$$

上式の行列 $U_{\alpha i}$ は、ニュートリノのフレーバー間の混合を表しており、クォークセクターにおける KM(Kobayashi-Masukawa) 行列に対応して、MNS(Maki-Nakagawa-Sakata) 行列と呼ばれ、以下の形で表わされる。

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

ここで、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ であり、 θ_{ij} は各フレーバー間での混合角である。また、 δ は CP 非保存による有限の位相である。

ニュートリノ振動の確率を求めるにあたって、ある時刻において質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ にあるニュートリノの時間発展を考えると、Schrödinger 方程式からニュートリノの静止系の時刻 τ_i と、質量 m_i を用いて、以下の式で表わされる。

$$|\nu_i(\tau_i)\rangle = e^{-im_i\tau_i} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.3)$$

実験室系でのエネルギー E_i 、時刻 t 、運動量 p_i 、位置 l を用いると、

$$e^{-im_i\tau_i} = e^{-i(E_i t - p_i l)} \quad (1.4)$$

と書ける。ニュートリノは超相対論的な粒子であるので、 $m_i \ll E_i$ と考え、以下の近似を行う。

$$t \cong l \quad (1.5)$$

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \cong p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \quad (1.6)$$

このとき、式 (1.3) は

$$|\nu_i(l)\rangle \cong e^{-i\frac{m_i^2 l}{2p_i}} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.7)$$

と書ける。よって、時刻 $t = 0$ 、距離 $l = 0$ において弱い相互作用の固有状態 ν_α で生成されたニュートリノが、時刻 t 、距離 l において、弱い相互作用の固有状態 ν_β に変化している確率は、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta | \nu(t) \rangle|^2 \quad (1.8)$$

$$= \left| \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-ip_i l} e^{-i \frac{m_i^2 l}{2p_i}} \right| \quad (1.9)$$

$$= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \frac{\Delta m_{ij}^2 l}{4E_\nu} \\ + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \frac{\Delta m_{ij}^2 l}{4E_\nu} \quad (1.10)$$

と表わされる。ここで、 $\Delta m_{ij}^2 = m_j^2 - m_i^2$ はニュートリノ間の質量二乗差であり、 E_ν はニュートリノのエネルギーである。反ニュートリノに関しては、式 (1.10) の第三項の符号が反転する。

以下、簡単のためニュートリノが2世代と仮定した場合の、フレーバーの混合を考える。このとき、時刻 $t = 0$ において弱い相互作用の固有状態 ν_α で生成されたニュートリノが、時刻 t 、距離 l において、弱い相互作用の固有状態 ν_β に変化している確率 P は、 θ を混合角とすると、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 (eV^2) l (km)}{E_\nu (GeV)} \right) \quad (1.11)$$

となり、距離 l とエネルギー E_ν の変化に伴って振動する。

この式から、単フレーバーで生成されたニュートリノが飛行したのものに対し、ある距離のところで、もとのフレーバーが消滅するか、別のフレーバーが生成されるのを観測することで、混合角 θ 、質量二乗差 Δm^2 を求めることができる。

現在までに、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の振動に関しては、大気ニュートリノを用いたスーパーカミオカンデグループの成果と、加速器ニュートリノを用いた K2K 実験及び MINOS 実験 [3] によって確認されている。また、 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ 、 $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ の振動モードについても、太陽ニュートリノを用いたスーパーカミオカンデ [4] や SNO 実験 [5]、原子炉ニュートリノを用いた KamLand 実験 [6] により測定された。一方、加速器長基線ニュートリノ実験において θ_{13} を測定するためには、 ν_e への振動モードである ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) を確認する必要があり、これは、T2K 実験によってなされることが期待されている。また、同時に CP 非保存パラメータ δ をニュートリノを用いて測定することも目標の一つである。

第2章 T2K実験

本章においては、T2K実験の目的と特色、及び実験装置について述べる。また、ニュートリノビームの生成直後のフラックスとエネルギー分布を測定するために設置された前置検出器において用いられる光検出器への要請についても言及する。

2.1 T2K実験の概略

本実験では、茨城県東海村にある世界最大強度であるJ-PARCの50GeV陽子シンクロトロン加速器によって加速された陽子(ビーム強度は0.75MW)と、グラファイトターゲットとの相互作用によって生じた π 粒子が崩壊することで生成されるミュニュートリノビームを用いる。このビームを約295km離れた岐阜県の神岡町にある世界最大級の水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデへ照射する。この後置検出器であるスーパーカミオカンデでのニュートリノイベント数とエネルギースペクトルを、グラファイトターゲットから280mの地点に置かれた前置検出器での測定から予想されたものと比較することで、ニュートリノ振動を検出し、そのパラメータを測定する。

2.2 T2K実験の目的

T2K実験の目的を以下に挙げる。

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ モードの探索

今までのニュートリノ振動実験では $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ モードは、観測されていない。本実験



図 2.1: T2K 実験の概念図

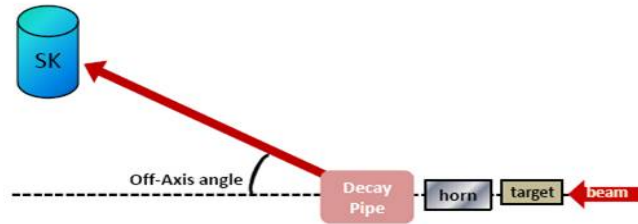


図 2.2: Off-Axis 法 の概念図

では、 $\sin^2 2\theta_{13} \approx 0.006$ の感度に達すると考えられており、これは従来の上限値の約 20 倍である。

- ミューニュートリノの消失モードの精密測定

本実験の前身である K2K 実験や MINOS 実験から、 $\sin^2 2\theta_{23} > 0.9, 2.5 \times 10^{-3} eV^2 < \Delta m_{23}^2 < 3.0 \times 10^{-3} eV^2$ であることが、90%の信頼度で確認されているが、これらをより高い精度で測定する。

2.3 Off-Axis 法

T2K 実験では、ニュートリノ振動実験としては世界初の試みである Off-Axis 法を採用する。Off-Axis 法とは、図 (2.2) に示したように、後置検出器の方向に対し、ビーム軸の方向を意図的にずらすことにより、後置検出器方向への、ニュートリノのエネルギースペクトルに幅の狭い高いピークを持たせる方法である。この角度を、Off-Axis 角 (θ_{oa}) と言う。

具体的には、図 (2.3) に示したように、適当な Off-Axis 角では、親粒子である π 中間子の運動量に対するニュートリノエネルギーの変化率があるエネルギー領域において小さくなり、この領域を Off-Axis 角を調節して観測したいエネルギー領域に合わせることで、観測されるニュートリノのエネルギーのばらつきが小さくなることによる。

本実験では、過去の実験の結果を用いて予想した、振動確率が最大となるエネルギーピーク (約 650MeV) を持つようなフラックスを実現する Off-Axis 角として、 2.5° を採用する (図 (2.4))。

Off-Axis 角の変化に対し、エネルギースペクトルは大きく影響を受けるため、Off-Axis 角の高精度でのモニタリングは本実験において非常に重要な部分である。

2.4 前置検出器: ND280

本実験では、グラフィットターゲットから 280m の地点に前置検出器 (ND280) を置く。前置検出器は、ビーム軸上に存在する On-Axis 検出器と、スーパーカミオカンデ方向に存在する Off-Axis 検出器から構成される。

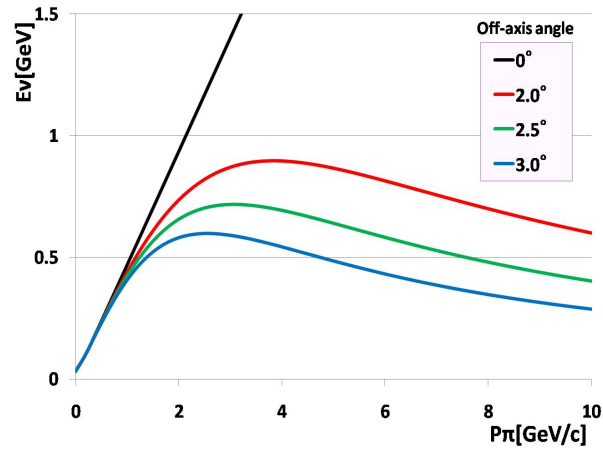


図 2.3: Off-Axis 角ごとの π 中間子の運動量に対するニュートリノエネルギーの変化



図 2.4: $\theta_{oa} = 2^\circ, 2.5^\circ, 3^\circ$ のときの後置検出器におけるニュートリノのフラックス

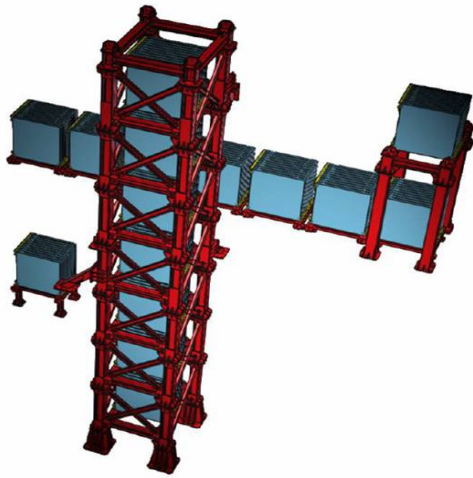


図 2.5: INGRID 検出器の概念図

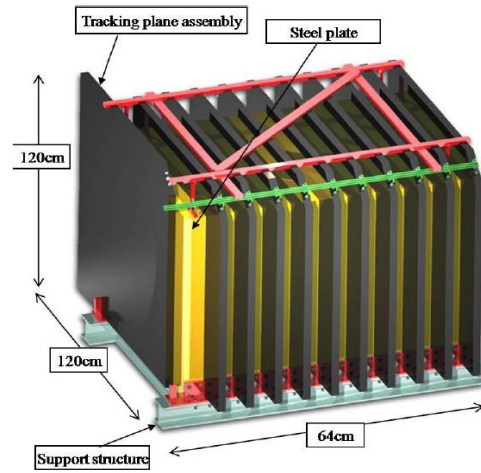


図 2.6: INGRID の各モジュールの概念図

2.4.1 On-Axis 検出器: INGRID 検出器

INGRID 検出器は、図 (2.5) に示すように、16 個のモジュールから成る。各モジュールは、図 (2.6) のように、鉄 9 層と、プラスチックシンチレータで構成されたトラッキングプレーン 11 層の、サンドイッチ構造をとっている。

INGRID 検出器では、ニュートリノと鉄原子核との荷電カレント反応によって生じた荷電粒子がシンチレータを通過する際に生じる光を、波長変換ファイバーで吸収および再発光し、その光を後述する新型の半導体光検出器である Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) によって読み出す。INGRID 検出器モジュールのシンチレータは水平方向、垂直方向にセグメント化されており、荷電粒子の飛跡の再構成を行うことができる。

こうして、直接ニュートリノ反応を観測し、ニュートリノの飛跡の再構成を行うことで、ニュートリノビームの方向を 1mrad 以上の精度でモニタリングする。

ニュートリノの反応断面積は極めて小さいが、本実験のニュートリノビームは非常に高強度であるため、1 日ごとのモニタリングが可能であり、INGRID 検出器は 10^5 events/day 以上のイベントレートを満たすように設計されている。

2.4.2 Off-Axis 検出器

Off-Axis 検出器は、スーパーカミオカンデ方向にあり、ニュートリノビーム生成直後のフラックスおよびエネルギースペクトルを測定するものである。Off-Axis 検出器は、図 (2.7) に示すように、Magnet、TPC(Time Projection Chambers)、FGD(Fine Grained Scintillator Detectors)、POD(π_0 Detector)、SMRD(Side Muon Range Detector)、ECAL(Electromagnetic Calorimeter)、から構成される。

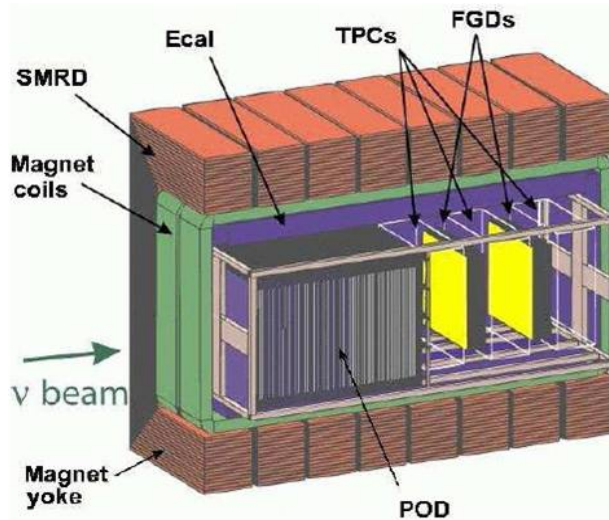


図 2.7: Off-Axis 検出器

2.4.3 前置検出器で用いられる光検出器への要請

前置検出器である INGRID 検出器、また Off-Axis 検出器の FGD, POD, SMRD, ECAL, においては、セグメント化された細い棒状のシンチレーターを読み出しに用いる。そこで、以下の要請がなされる。

- 磁場内で正しく動作すること。
Off-Axis 検出器は磁場内に置かれているため、この条件は必ず満たさなければならない。また、磁場に耐性の無い PMT を用いることは望ましくない。
- サイズが小さいこと。
光検出器のためのスペースが検出器によっては厳しく限られるため。
- 安価であること。
読み出しチャンネルの総数は前置検出器で約 60000 にのぼるため。
- 低バイアスで動作すること。
電圧供給装置の扱いやすさのため。
- 高い光子検出効率をもつこと。

こうした要求に沿うものとして、本実験では、半導体光検出器 MPPC が採用された。本論文では、その性能の大量測定について述べる。京都では、INGRID 検出器、FGD にインストールされる約 17500 個の MPPC の解析および測定を行った。

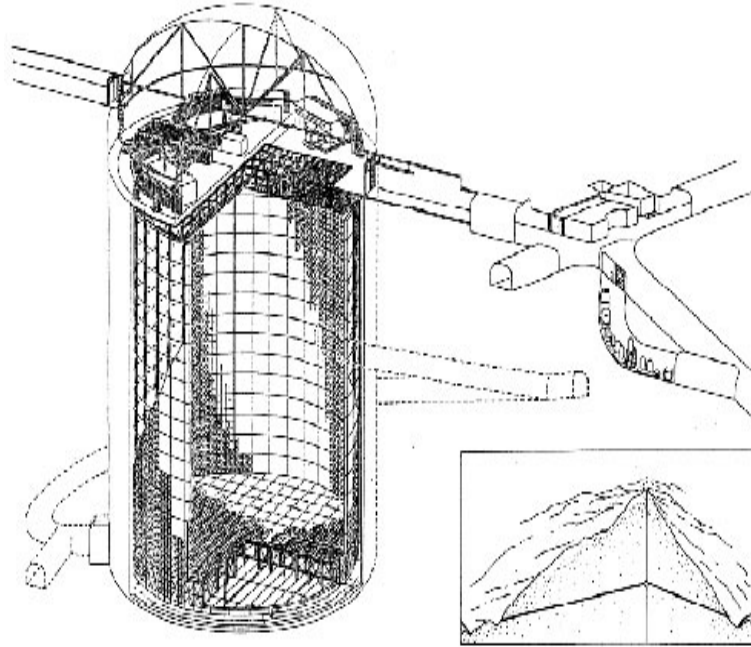


図 2.8: スーパーカミオカンデ

2.5 後置検出器:スーパーカミオカンデ

本実験では後置検出器として、岐阜県の神岡町の地下 1000m に設置されているスーパーカミオカンデを用いる。検出器を地下深くに作ることで、宇宙線ミュオンは $1/10^5$ の強度まで遮蔽されている。

スーパーカミオカンデは、約 50000 トンの純水で満たされた円柱形のタンク、光電子増倍管、水および空気の純化システムなどから構成されている。ここで観測されたニュートリノイベント数とエネルギースペクトルと、前置検出器での測定結果との比較から、最終的なニュートリノ振動パラメータを得る。

図 (2.8) にその概念図を示す。

第3章 MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)

本章においては、近年開発が進み、その優れた性能が注目されている光検出器 PPD(Pixelated Photon Detector) の一種である MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) について、その動作原理および特性について述べる。

3.1 PPD(Pixelated Photon Detector)

PPD とは、多数の APD ピクセルを内部に持つ半導体光検出器の総称であり、高性能、安価、かつ磁場の影響を受けないといった特徴を持つ。また、通常の APD の光電子増倍率が数十倍であるのに対し、PPD は後述するガイガーモードによって動作し、 $10^5 \sim 10^6$ の増倍率を持つ。この増倍率は PMT に匹敵する。また、その量子効率の高さから、PMT の 2 倍程度の光子検出効率を持っている。

一方、各ピクセルの増倍領域において、熱励起によってシリコンのエネルギーバンドギャップを超えて電子・ホール対が作られることにより、ノイズが生じるが、これらは正しいシングルと区別することは原理上不可能であり、そのノイズレートが、通常の動作環境において $10^5 \sim 10^6$ (Hz) であることは PPD の欠点と言える。

本論文においては、PPD の中でも特に T2K 実験用に開発された 1.3×1.3 mm の MPPC(図 3.1) について述べる。大型実験において、光検出器として MPPC を用いるのは本実験が初の試みである。

MPPC と PMT の性能差については表 (3.1) にまとめた。

3.2 APD(Avalanche Photodiode)

図 (3.2) のように MPPC は多数の APD ピクセルからなる。APD は、図 (3.3) のような PN 接合型のダイオードに強い逆電圧を印可することで動作する。図 (3.4) のように、ダイオードに逆電圧を付加すると、電子およびホールは外向きに動き、結果として PN 接合の空乏層が拡大する。この際、APD 内の電界は図 (3.5) のように分布する。図 (3.5) における absorption region (吸収層) に光子が入射することで電子・ホール対が生まれる。この電子が弱い電場によって multiplication region (増倍層) まで運ばれる。この領域には高電場がかかっており、アバランシェ増幅を起こし、光電流を生み出す。この電流はシリコンの抵抗 (クエンチング抵抗) を通じ、アルミ電極によって出力される。

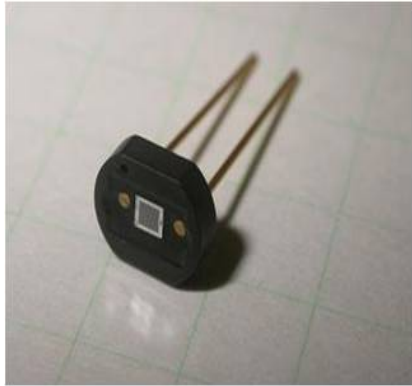


図 3.1: T2K 実験用 MPPC

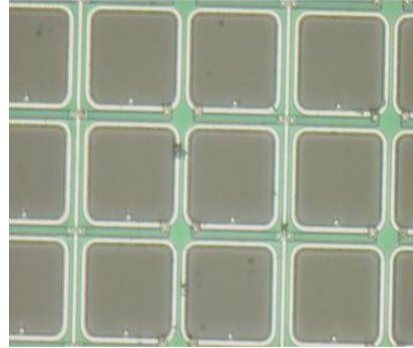


図 3.2: 受光面の拡大写真:各 APD ピクセルが見えている

表 3.1: MPPC と PMT の性能比較

種類	MPPC	PMT
ゲイン	$10^5 \sim 10^6$	$10^6 \sim 10^7$
光子検出効率	30 ~ 50%	15 ~ 30%
ノイズレート	$10^5 \sim 10^6$ (Hz)	$\sim 10^3$ (Hz)
動作電圧	$\sim 70V$	1000 ~ 2000V
時間分解能	$\sim 200psec$	100psec ~ 1nsec
有感領域	$\sim 1mm^2$	$10cm^2 \sim 100cm^2$
磁場耐性	有	無

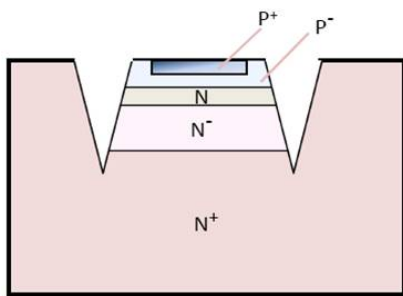


図 3.3: APD ピクセルの概念図

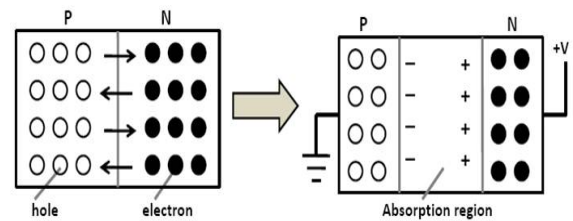


図 3.4: 逆電圧をかけた際のフォトダイオードの反応

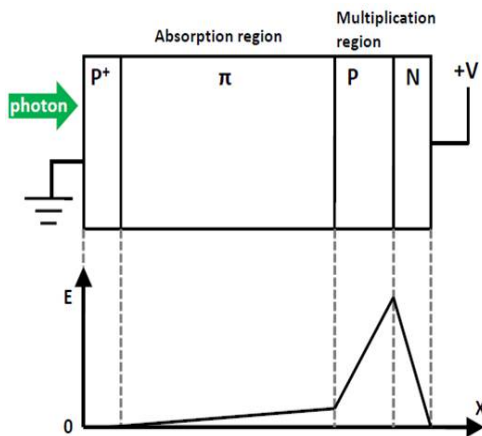


図 3.5: APD 内の電界

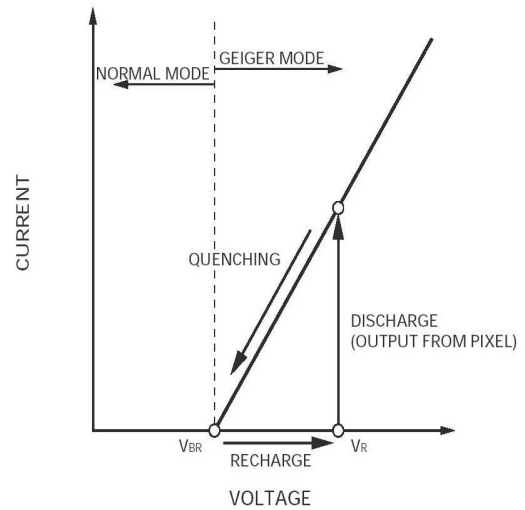


図 3.6: APD の一連の動作

表 3.2: ノーマルモードとガイガーモードの特徴比較

モード	ノーマル	ガイガー
動作電圧	ブレイクダウン電圧以下	ブレイクダウン電圧以上
ゲイン	10 ~ 100	$10^5 \sim 10^6$
出力シグナル	入射光子数に比例	入射光子数に関わらず一定

APD には、ノーマルモードとガイガーモード 2 通りの動作がある。これらの特徴を表 (3.2) にまとめる。

MPPC はガイガーモードにおいて用いられる。ガイガーモードでは、APD ピクセルからの出力は以下の式で表わされる。

$$Q = C(V_{bias} - V_{bd}) \quad (3.1)$$

ここで V_{bd} はノーマルモードからガイガーモードに切り替わる印加電圧であるブレイクダウン電圧のことを表す。また、 Q は出力される電荷量、 C は APD ピクセルのキャパシタンス、 V_{bias} は印加電圧である。一般的に式 (3.1) における $(V_{bias} - V_{bd})$ は $1V \sim 2V$ であり、このとき Q の値は、 $10^{-14} \sim 10^{-13}C$ 程度である。この Q の値は 1 つの光電子が何倍に増幅されたかを示すゲインの値と素電荷を掛け合わせたものであるため、MPPC における典型的なゲインの値は $10^5 \sim 10^6$ 程度となる。

一旦、放電が起きると、クエンチング抵抗において電圧降下が起こり、APD ピクセルは固有の時定数の間、クエンチされる。この時定数はキャパシタンスの値 C とクエンチング抵

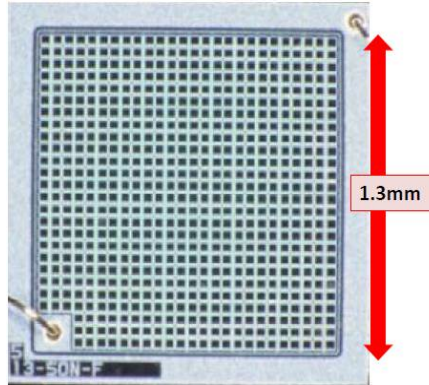


図 3.7: T2K 用 MPPC 表面の拡大写真

抗 R の積、 $C \times R$ に比例している。こうして、APD ピクセルはガイガー放電前の状態に戻る。これらのサイクルを図 (3.6) に示す。

3.3 MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)

図 (3.7) は次節において詳説する T2K 実験用 MPPC の表面を拡大したものである。T2K 実験用 MPPC には 667 個の APD ピクセルが存在し、一般の MPPC も同様に 100 ~ 1000 個の APD ピクセルの集合体となっている。また、MPPC の各ピクセル及び光電面の大きさには様々な種類が存在する。

図 (3.8) は ADC ピクセル 1 つの等価回路である。MPPC では、全ての ADC ピクセルにおいて、電圧供給および読み出しは共通の電極によって成される。つまり 100 ~ 1000 個の ADC ピクセルが、図 (3.9) のように、並列に並んでいる。

MPPC のシグナルは式 (3.1) に示した Q の値によって量子化されており、出力される合計の電荷 Q_{total} は、光子が入射したピクセル数に Q の値をかけることで得られ、式 (3.2) のように表わされる。

$$Q_{total} = \text{光子が入射したピクセル数} \times Q \quad (3.2)$$

仮に、複数の光子がある一つのピクセルにほぼ同時に入射した場合は、APD が有限の応答時間を持っているために、出力されるシグナルの入射光子数に対する線形性が保たれない可能性があり、その線形性は MPPC が持つ全ピクセル数に依存する。4.7 節において述べるように、特に T2K 実験用 MPPC においては、我々の使用する範囲 ($\sim 100p.e.$) の入射光子数に対しては、その応答は線形である。

また、MPPC は高いフォトンカウンティング能力を持っており、図 (3.10) の MPPC の典型的な ADC 分布に示すように、入射光子数が十分小さい時は、それらの数を数えることが可能である。図において、それぞれのピークは左からペDESTAL、1p.e. イベント (1 光電子の増幅に対応するイベント)、2p.e. イベント (2 光電子の増幅に対応するイベント) を

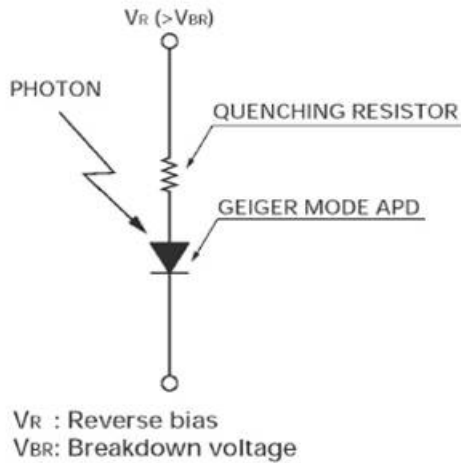


図 3.8: ADC ピクセル一つの等価回路

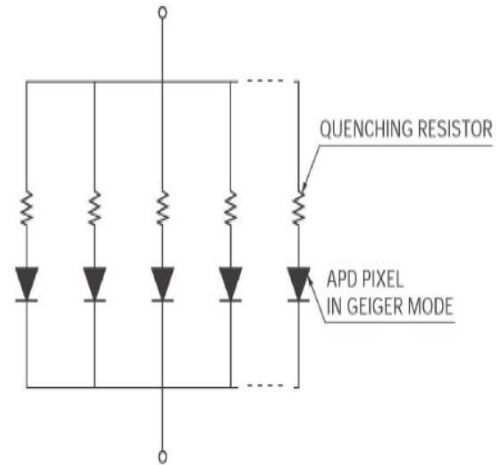


図 3.9: MPPC の等価回路

示している。観測された光電子数が増えるに従い、ピークの形は崩れていくが、これは後の章において述べるアフターパルスの効果である。

図 (3.11) はオシロスコープによって観測された 1p.e. イベントの波形であり、図 (3.12) はオシロスコープでの波形をある一定時間で重ねたものである。こちらにおいても、入射光子数を数えることが可能であることを見てとれる。また、シグナル光電流の立ち上がりからクエンチまでの時間は MPPC の種類によって異なるが、典型的には数 10nsec~ 数 100nsec 程度である。

3.4 T2K 実験用 MPPC

T2K 実験用に開発された MPPC は、各ピクセルの面積が $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ であり、光電面積は $1.3 \times 1.3 \text{mm}^2$ である。電圧供給のパッドに 9 ピクセル分のスペースが使われており、総ピクセル数は $26 \times 26 - 9 = 667$ である。また、現在 MPPC のパッケージについては、図 (3.13) に示す缶パッケージとセラミックパッケージの 2 通りがある。T2K 実験においては、アライメント精度の高さから、セラミックパッケージを採用する。

1.3mm×1.3mm 角である理由は、波長変換ファイバーからの光量の損失を防ぐためである。T2K 実験において用いられる波長変換ファイバーの直径は 1.0mm である。また、MPPC の光電面はそれを保護するためにセラミックパッケージから約 $500 \mu\text{m}$ 窪んだ位置に置かれている。MPPC と波長変換ファイバーは、本研究室が設計した GOMI (General Optical MPPC Injection) コネクタによって接続されるが、図 (3.14) のように MPPC のセラミック表面と波長変換ファイバー端面が押し付けられる構造になっており、図における赤矢印の分だけファイバーと MPPC との間は離れることになる。この隙間のために波長変換ファイバーによって運ばれた光は拡散する。そのため、本実験においては、1.3mm×1.3mm 角

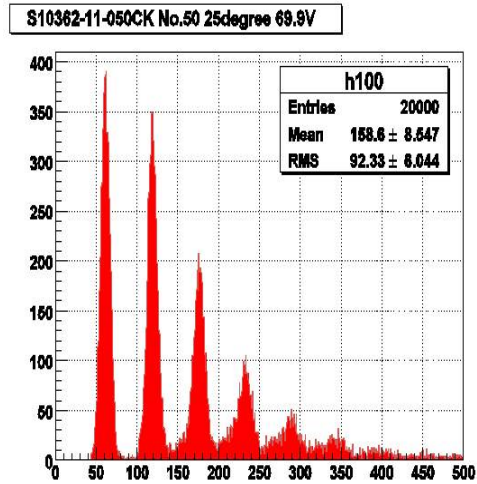


図 3.10: MPPC シグナルの ADC 分布

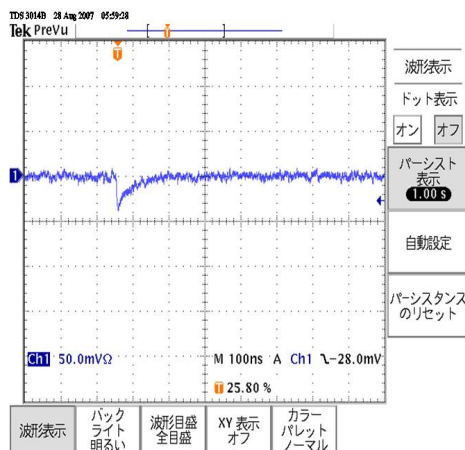


図 3.11: MPPC の 1p.e. シグナルのオシロスコープ波形

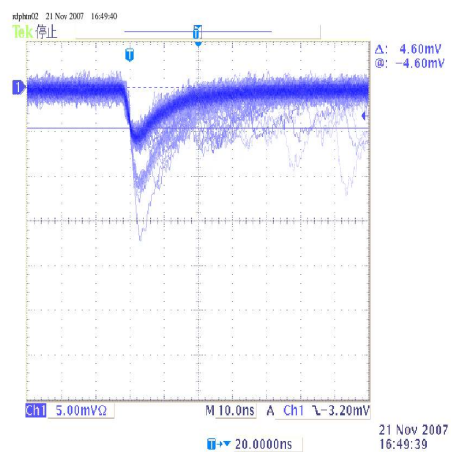


図 3.12: MPPC シグナルのオシロスコープ波形:一定時間で波形を重ねている

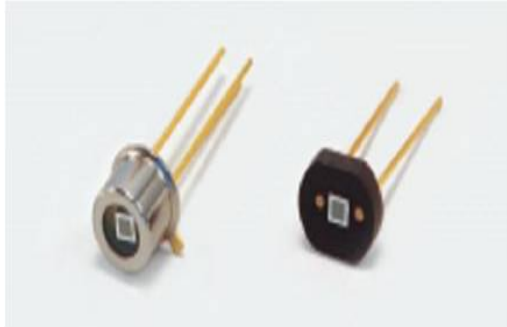


図 3.13: MPPC のパッケージの種類:左側が缶パッケージ、右側がセラミックパッケージ。
 浜松ホトニクス社のカタログより引用

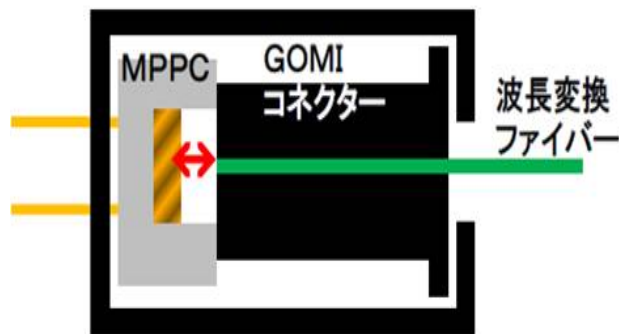


図 3.14: MPPC と波長変換ファイバーの接続の概念図

の MPPC を採用した。図 (3.15) は T2K 実験用 MPPC の設計図であり、図の斜線部が光電面である。

ピクセルピッチに関して一般には、 $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ の三種類の素子が存在している。光電面面積が一定であるとする、ピクセルピッチが小さいほどピクセル数が増え、入射光量に対する出力信号の線形性に優れる。一方、ピクセルピッチが大きいと、開口率（光電面面積のうち配線部などを除いた、受光可能部分が占める面積の割合）が増えるため光子検出効率が増加する。T2K 実験においては、両者のバランスと生産実績の豊富さから、 $50\mu\text{m}$ のピクセルピッチを採用した。

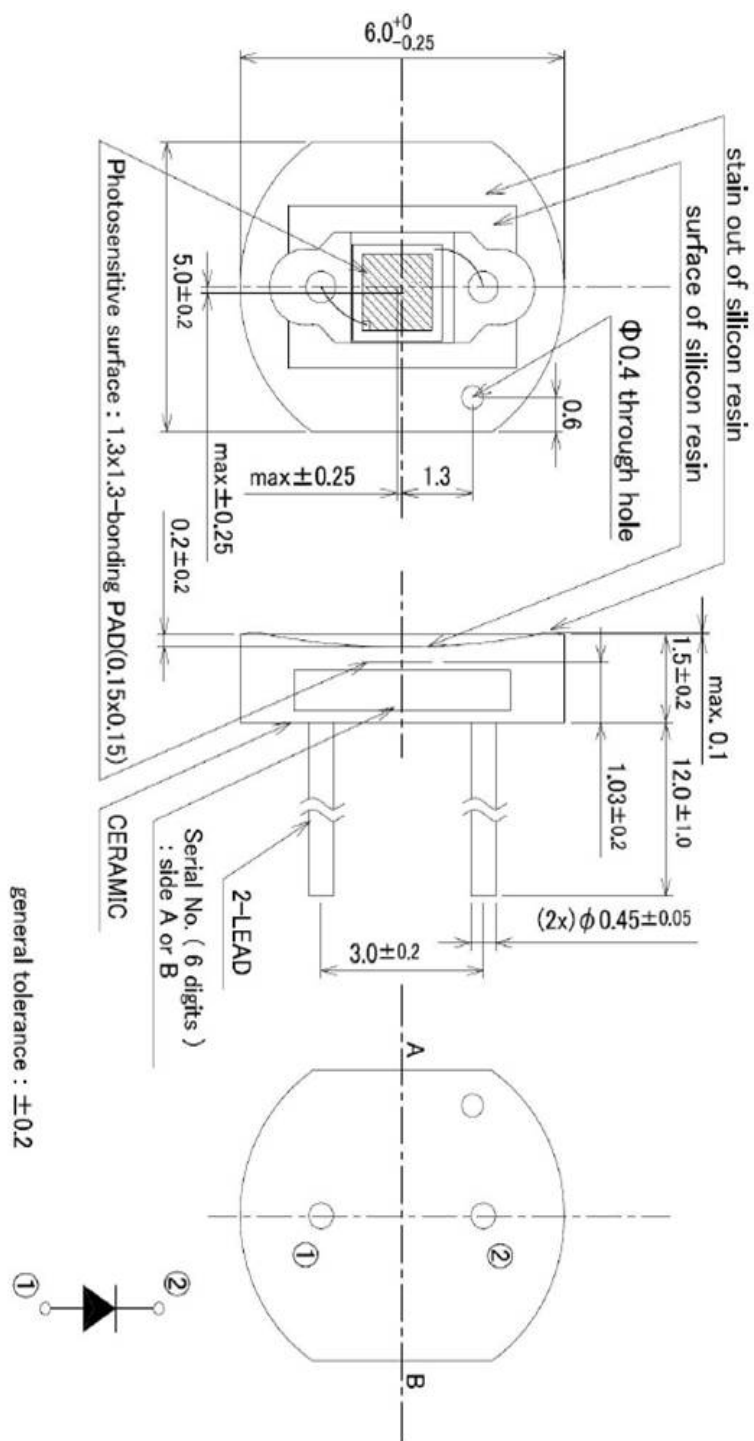


図 3.15: T2K 実験用 MPPC の設計図

第4章 MPPCの基礎特性

本章においては、MPPCの基礎特性である、ゲイン、ノイズレート、クロストーク、アフターパルス、PDE(Photon Detection Efficiency)について述べる。次に、大量測定とは別のシステムにおいて測定したリニアリティについてその測定結果を示す。また、最後に T2K 実験における MPPC への要請についてまとめた。

4.1 ゲイン

ゲインは、APD ピクセルにおいて生まれた電子ホール対がどの程度増幅されたかを示しており、以下の式によって表わされる。

$$\text{ゲイン} = \frac{Q(1 \text{ ピクセルにおいて出力される電荷数})}{e(\text{素電荷})} \quad (4.1)$$

上式は、式 (3.1) を用いることにより、以下のように書ける。

$$\text{ゲイン} = \frac{C}{e}(V_{bias} - V_{bd}) = \frac{C}{e}V_{over} \quad (4.2)$$

ここで、 C は ADC ピクセルのキャパシタンス、 V_{bias} は負荷電圧、 V_{bd} はブレイクダウン電圧である。また、 V_{over} を以下のように定義した。

$$V_{over} \equiv V_{bias} - V_{bd} \quad (4.3)$$

このようにゲインは温度に関わらず、 V_{over} とキャパシタンスのみに依存する。

4.2 ブレイクダウン電圧

ブレイクダウン電圧は、ADC ピクセルがガイガーモードに突入する際の負荷電圧であり、式 (4.2) からわかるようにブレイクダウン電圧はゲインが 0 となるときの V_{bias} として定義される。

また、高い温度に置かれた MPPC ほど、ブレイクダウン電圧が高い(ガイガーモードになりにくい)ことが以前の測定から知られている。これは、温度が高いほど、結晶の格子振動が激しくなり、キャリアが十分に加速される前に結晶と衝突し、そのエネルギーを失うことによる。

4.3 キャパシタンス

式 (4.2) から、ゲインを V_{over} に対してプロットしたときの傾きは、キャパシタンスを素電荷で割ったものとなる。キャパシタンスの値は、一般に APD ピクセルの光電面面積が大きいものほど、高い値を持つ。よって、同一種の MPPC においては、キャパシタンスの値は一定である。

4.4 ノイズレート

MPPC のノイズの原因には、以下の 2 つが考えられており、これらは正しいシグナルと区別できないアウトプットを生む。

- 熱電子

光が入射していなくても、熱電子が約 1.1eV のエネルギーバンドギャップを超えるエネルギーを持つとき、電子・ホール対が生成される。この効果によって、ノイズレートは温度に顕著な影響を受け、温度が高いほど高くなる。そのため、MPPC は常温程度もしくはそれ以下で用いられるのが望ましい。常温の範囲においては、この熱電子ノイズが優勢である。

- トンネル効果

PN 接合に、十分な強さの逆電圧をかけることで、p 型半導体の価電子帯より、n 型半導体の伝導帯のほうがエネルギーレベルが低くなる。このとき、半導体価電子はトンネル効果により、n 型半導体の伝導帯に入り、新たな自由なキャリアを作る可能性がある。この効果は、温度には依存しない。常温における測定では、このトンネル効果によるノイズの寄与は熱電子ノイズと比べ、はるかに小さい。

トンネル効果によるノイズの影響は 77K 程度の極低温において顕著になることが知られている [12]。T2K 実験においては MPPC を、20 付近の室温程度で扱うために、熱電子によるノイズが大きく寄与する。

ノイズレートは V_{over} と温度に依存しており、それぞれに対し単調に増加する。これは、 V_{over} が高いほどガイガー放電を起こす確率が高く、温度が高いほど熱電子がエネルギーギャップを超える確率が高いことによる。

4.5 クロストーク・アフターパルス率

MPPC には、クロストーク及びアフターパルスという現象が観測される。これらは、共にアウトプットシグナルを増加させる効果がある。大量測定においては、これらを個別に測定するのは困難であるため、これらの起こる確率をまとめて、クロストーク・アフターパルス率として定義した。以下、個々の説明を行う。ここで、クロストークイベントとアフターパルスイベントの典型的な波形を図 (4.1) に示した。

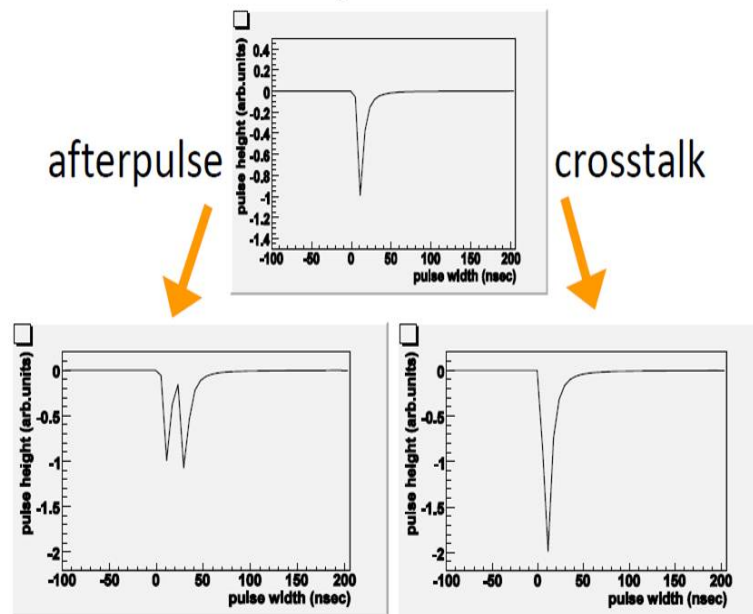


図 4.1: クロストークとアフターパルスの波形

- クロストーク

クロストークとは、ある APD ピクセルにおけるガイガー放電において生まれた二次的光子が、他のピクセルへ移動して新たなガイガー放電を起こす現象である。ガイガー放電自体は数 psec で終了するため、これらのシグナルはほぼ同時に出力される。クロストークは、入射光子数より多い光電子数に対応するシグナルを出力するためにリニアリティに影響を及ぼす。

- アフターパルス

アフターパルスとは、ある APD ピクセルにおけるガイガー放電の過程において生じた電子が、半導体中の格子欠陥に捕えられ、これが再放出されることで新たなガイガー放電を引き起こす現象である。アフターパルスの電子の再放出時定数は数 10nsec である [15]。今回の測定では、ゲート幅が 200nsec に設定されているので、アフターパルスの効果は全て含んでいる。

クロストーク・アフターパルス率は以前の測定から、 V_{over} のみに依存することが知られている。

4.6 PDE (Photon Detection Efficiency)

MPPC における PDE は以下の式で表わされる。

$$PDE = QE \times \epsilon_{geometrical} \times \epsilon_{Geiger} \quad (4.4)$$

それぞれの部分の意味は以下のとおりである。

- QE

APD の量子効率、すなわち入射光子 1 つに対し、電子・ホール対の生成される確率であり、光子の波長の関数である。

- $\epsilon_{\text{geometrical}}$

MPPC 表面全体に対する有感領域の占める割合であり、開口率と呼ばれる。開口率は、MPPC の各アパランシェフォトダイオードのピッチに依存しており、ピッチが長くなるほどその割合は大きくなる。T2K 実験用に開発された、 $50\mu\text{m}$ ピッチの MPPC においては 61.5% であることが知られている [11]。

- ϵ_{Geiger}

生成された電子が、ガイガー放電を起こす確率であり、 V_{over} の関数である。

入射光子が単一の波長をもつとき、同一種の MPPC においては、 $QE, \epsilon_{\text{geometrical}}$ は一定であるので、PDE は V_{over} にも依存すると考えられ、実際に以前の測定においてこのことは確認されている。

4.7 リニアリティ

T2K 実験用の MPPC は 667 ピクセルであり、それぞれの APD ピクセルは有限の時間をもってクエンチングする。このクエンチングの際に同一ピクセルに入射した 2 個目以降の光子は観測されない。そのため、入って来た光子数に対する出力シグナルの大きさは光量が多いと線形とはならず、どの程度の入射光子数までが線形に応答するかを調べることはピクセルピッチの長さを決定するにあたり重要であった。また、MPPC ではアフターパルスの効果により、ピクセル数以上の出力が可能である。

4.7.1 リニアリティの測定方法

図 (4.2) は本測定に用いたセッティングである。LED からの光を波長変換ファイバーの中心付近にあて、そのファイバーの両端に MPPC と PMT をセットし、PMT をリファレンスに用いている。また、両端での光量が同程度であることは、前もって PMT によって確認されている。

使用した装置は以下である。恒温槽の温度は 20°C に設定した。 V_{over} は 1.4V である。LED は 120nsec 程度の時間、光を発するように設定した。

- PMT

浜松フォトニクス社製、光電子増倍管アセンブリ H7415 (R6427 内蔵アセンブリ)。

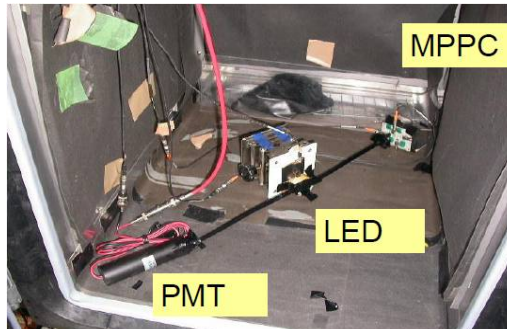


図 4.2: リニアリティ測定用セッティング

- 青色 LED
NICHIA 社製 NSPB500S。出力波長域は 450~480nm(FWHM)。
- CAMAC ADC
LeCroy 2249A 12ch ADC。
- PMT AMP
2 段使用しており、1 段の増倍率は 10 倍。
- MPPC 電源
横河電機製、電圧電流発生器 GS610。最大出力電圧 110V、最大許容電流 3.2A であり、0.0001V 単位での電圧操作が可能。
- 恒温槽
楠本化学株式会社エタック事業部、HIFLEX FL211C。-20 ~+100 の温度領域が設定可能であり、0.1 単位で制御可能。

4.7.2 リニアリティの測定結果

図 (4.3) は、出力された電荷に対応する光量ごとのオシロスコープでの波形である。本測定で使用した MPPC のピクセル数は 667 ピクセルであるが、そのピクセル数以上の光量が出力可能であることがわかる。これは、アフターパルスの効果である。

図 (4.4) は、約 1600 フォトンまでの入射光量に対する MPPC の出力信号を光電子数に直したものである。図 (4.6) は線形からのずれである。入射光量 0~240p.e. の範囲で線形フィッティングを行ったものを用いており、以下の式によって、ずれを定義した。

$$\text{直線からのずれ} = \frac{(\text{データ点}) - (\text{直線フィット上の点})}{(\text{直線フィット上の点})} \quad (4.5)$$

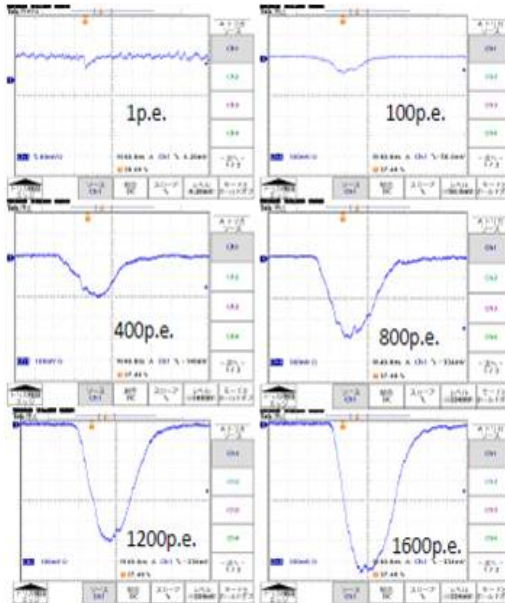


図 4.3: 出力電荷に対応する光量ごとのオシロスコープでの波形

250 フォトン程度以上の光量においては、線形フィッティングからのずれは 10% 以上になる。予想されたように、入射光子数が増えるに従って、同じピクセルに入る光子が増えるために線形性は悪化する。

図 (4.6) は、T2K 実験で使用される範囲 (~ 100 フォトン) での入射光量に対する MPPC シグナルの応答である。この範囲では MPPC のリニアリティは十分である。

4.8 T2K 実験における MPPC への要請

各検出器における MPPC への要請を以下の表 (4.1) にまとめた。

ここで、ピクセル数への要請は、ダイナミックレンジによるものである。INGRID 検出器、SMRD ではミュオン (~ 20 p.e.) を見るのが主であるため、ダイナミックレンジは狭くてもよい。一方、FGD、P0D、ECAL では、高エネルギーの γ 線やプロトンのエネルギーを測定するために広いダイナミックレンジが要求される。

このうち京都での測定分は INGRID 検出器、FGD にインストールされるものであり、それぞれからの詳しい要請について、以下で述べる。

INGRID 検出器では、主にミュオンを観測し、高い検出効率を維持することによって検出率に対する不定性を下げる必要がある。そのため、 V_{over} を大きくする必要がある。一方、 V_{over} を上げ過ぎることは高いノイズレートを招き、MPPC の動作が正しくなくなる。これらのバランスから、 $V_{over} = 1.4V$ で用いられる。

FGD では主な観測粒子は高エネルギーのプロトンであり、このエネルギー測定が目的である。そのため、ダイナミックレンジが広いこと、ノイズレートが低いこと、クロストレー

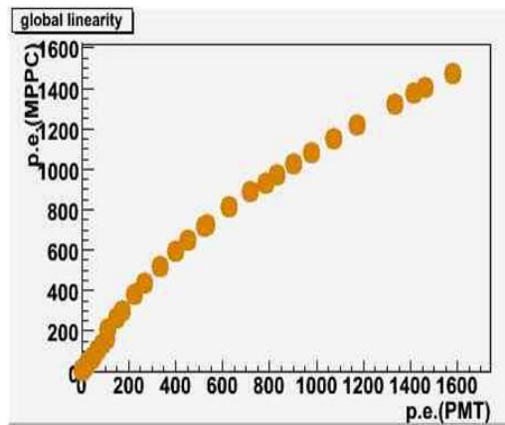


図 4.4: 入射光量 (~ 1600 フォトン) に対する MPPC の出力

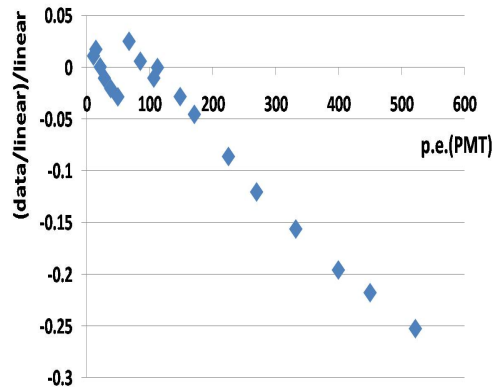


図 4.5: 線形フィッティングからのずれ

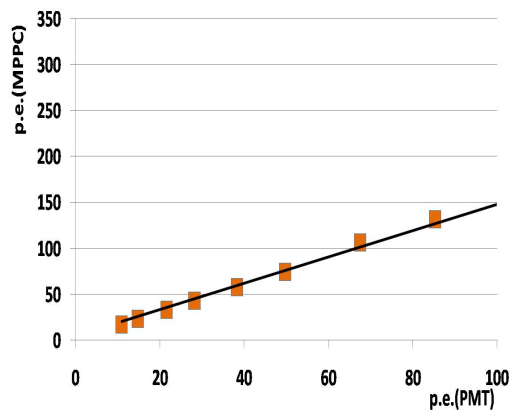


図 4.6: 入射光量 (~ 100 フォトン) に対する MPPC の出力

表 4.1: 各検出器における光検出器への要請

検出器	INGRID	FGD	POD	SMRD	ECAL
ピクセル数	> 100	> 400	> 400	> 400	> 400
ゲイン	$> 5 \times 10^5$	$\sim 10^6$	$\sim 10^6$	$\sim 10^6$	$\sim 10^6$
ノイズレート	$< 1500kHz$	$< 1500kHz$	$< 1500kHz$	$< 1500kHz$	$< 1500kHz$
光子検出効率	> 10%	> 10%	> 10%	> 10%	> 10%
チャンネル数	10000	9216	12000	8000	20000

ク・アフターパルス率が低いことが要求される。そのため、 V_{over} は低い方が良い。また、INGRID 検出器に用いられるシンチレーターと比べると FGD に用いられるシンチレーターのほうが、5 倍程度断面積が小さく、内部での光の散乱が減るため観測されるシンチレーション光が多く、検出効率への要請は INGRID 検出器よりは弱い。ところが、 V_{over} を低く設定しすぎることによって検出効率が小さくなり過ぎることは避けなければならない。これらの理由の兼ね合いにより、 $V_{over} = 1.0V$ で用いられる。

この章では、MPPC の基礎特性について述べた。次の章からは、我々が大量測定を行う際に用いたシステム、およびその測定結果について述べる。

第5章 MPPC複数同時測定システム

MPPCの性能評価として、15、20、25のそれぞれの温度において、その重要な特性であるゲイン、ブレイクダウン電圧、キャパシタンス、ノイズレート、クロストーク・アフターパルス率、relative PDE(Photon Ditection Efficiency)を測定する。

T2K実験において用いられるMPPCの京都での測定数は前置検出器であるINGRID検出器およびFGDに用いられる約17500個であり、これらをおよそ半年で測定する必要があったため、複数のMPPCが同時測定可能であるようなシステムの構築は必須であった。

このシステムでは、フェルミ国立加速器研究所が開発したTrip-tチップを利用している。Trip-tチップは32チャンネル分の入力シグナルをシリアル化することで、1つのシグナルとして扱うことを可能としている。京都の測定システムでは、このTrip-tチップ、および周辺の回路が載ったボードを2枚用いることで、64個のMPPCの同時測定を可能にした。

5.1 測定項目

本性能評価システムでは、以下の特性を測定する。

- ゲイン
- ブレイクダウン電圧
- キャパシタンス
- ノイズレート
- クロストーク・アフターパルス率
- relative PDE(Photon Ditection Efficiency)

それぞれの特性において電圧依存性を測定する。また、15、20、25において全ての測定を繰り返すことで、各特性の室温程度の温度における温度依存性も測定する。

relative PDEの測定には後述するその定義から光源が必要である一方、ノイズレートの測定時には光源が光ってはいけい。今回、光源としてはLEDを用いる。また、図(5.1)はLEDが光っているときのADC分布、図(5.2)はLEDが消えているときのADC分布である。各ADC分布のピークは左から、0p.e.,1p.e.,2p.e.に対応しており、LEDが光っているときのほうが1p.e.に立つピークが確認しやすいことがわかる。よってノイズレート以外の測定には表(5.1)に示したようにLEDが光っているときのデータを用いる。また、LEDの光量のモニタリングは固定した基準のMPPCによって行われる。

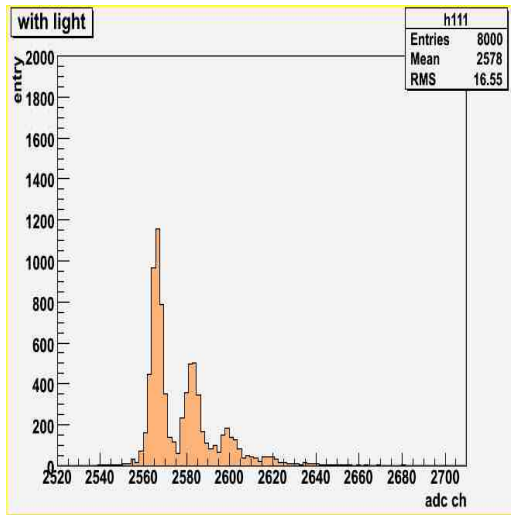


図 5.1: ADC 分布 (光源有り)

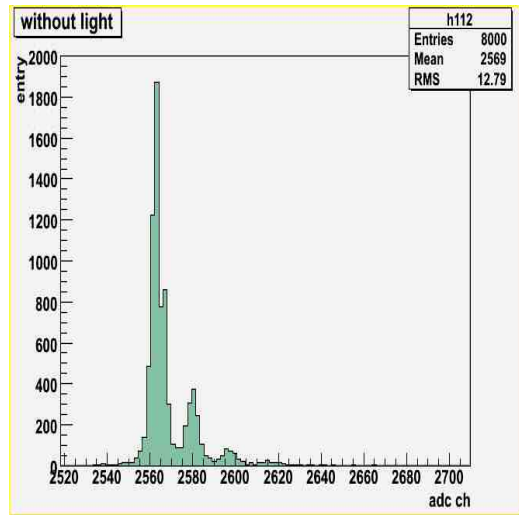


図 5.2: ADC 分布 (光源無し)

表 5.1: 各項目の測定における光源の有無

測定項目	光源
ゲイン	有
ブレイクダウン電圧	有
キャパシタンス	有
ノイズレート	無
クロストーク・アフターパルス率	有
relative PDE	有

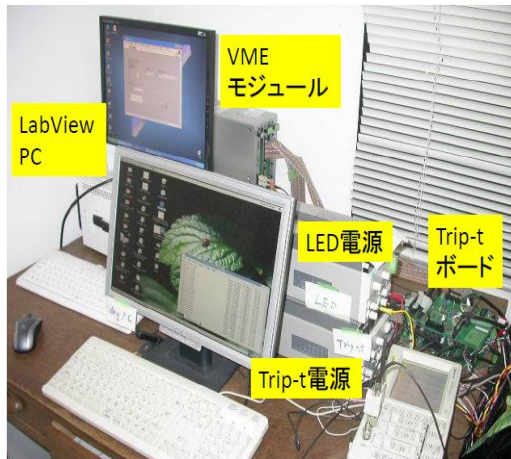


図 5.3: セットアップ 1

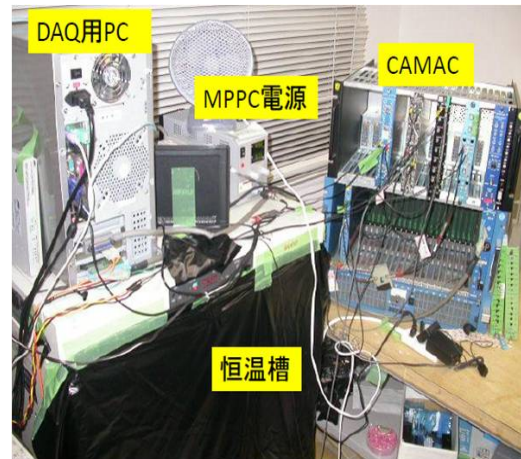


図 5.4: セットアップ 2

5.2 測定装置

今回用いる測定システムの目的を以下に示す。

- 複数の MPPC の同時測定
- MPPC に負荷する電圧設定の自動化
- 光源の ON・OFF の設定の自動化
- 電源と LED の設定に同期させた VME モジュールによるデータ取得
- 恒温槽のプログラム運転 (25 20 15)

ただし、恒温槽はその他のシステムから独立して運転する。自動化システムはその温度変化を考慮して設計されている。

図 (5.3) 及び図 (5.4) は実験室内のセットアップの写真である。以下にこれらを構成するモジュールを示す。

- Trip-t ボード
Trip-t ASIC チップをマウントしたボード。1 枚につき 32 個の MPPC が同時測定可能である。今回はこのボードを 2 枚使用し、同時に 64 個の MPPC を測定した。Trip-t のプログラミングは Lab view PC からの論理信号によって行われる。この論理信号はデジチェーンにより、2 枚のボードにおいて共有されている。
- DAQ 用 PC
本システムの制御を行う PC である。この PC により、LabView PC、VME、MPPC 電源、CAMAC システムへの制御信号が送られる。測定データはこの PC に蓄積される。

- LabView PC

National Instruments 社製 PXI-1042Q。Trip-t チップのゲイン、シグナルのゲート幅、VME モジュールへのトリガーシグナル、LED トリガーの制御を行う。

- VME モジュール

VME6U DAQ ボード。K2K 実験の SciBar 検出器用に開発されたものを用いており、本実験においては、2 枚の DAQ ボードを使用し、合計 64 個の MPPC のデータを取得する。また、2 枚の Trip-t ボードからフラットケーブルによりシグナルを取得する。

- 恒温槽

三洋電機製 インキュベータ (冷凍機付) MIR-153。3 ステップでのプログラム運転機能を持つ。温度制御範囲は (-10~+50) である。

- 温度モニタ (恒温槽内)

T & D 社製、温度データロガー (USB 接続タイプ) TR-71U。USB 接続によって、データの取得が可能であり、-40~110 の温度領域で使用可能である。

- CAMAC

LED の光量のモニタリングを行うためのシステムである。LeCroy 社製 2249A 12ch ADC を用い、光量モニタリング用 MPPC のデータ取得を行う。データは、DAQ 用 PC に送られる。

- MPPC 電源

松定プレジジョン社製、PL-120-0.6。0~120V 直流電圧が出力可能である。恒温槽内の MPPC ボードに接続されており、測定される MPPC に共通の電圧を供給する。GP-IB 接続によって DAQ 用 PC によって制御される。GP-IB 制御には、同社の GP-32 モジュール、GP-PL モジュールを用いている。

図 (5.5) は、システム概念図である。図の番号に対応して、各部分での役割を以下に記す。

1. LabView PC と DAQ 用 PC はネットワークハブを通じ、接続されている。
2. LabView PC からのシグナルは、フラットケーブルにより、Trip-t ボードに送られる。
3. DAQ 用 PC からの信号は、GP-IB 接続により MPPC 電源に送られる。
4. MPPC 電源の出力電圧は、2 枚の MPPC ボードと光量モニタ用 MPPC に等しく出力される。
5. Trip-t ボードにおける VME モジュール用トリガーは、TTL 規格から NIM 規格に変換され、GATE GENERATOR で 2 つに分けられ、それぞれが VME モジュールのトリガーに入力される。

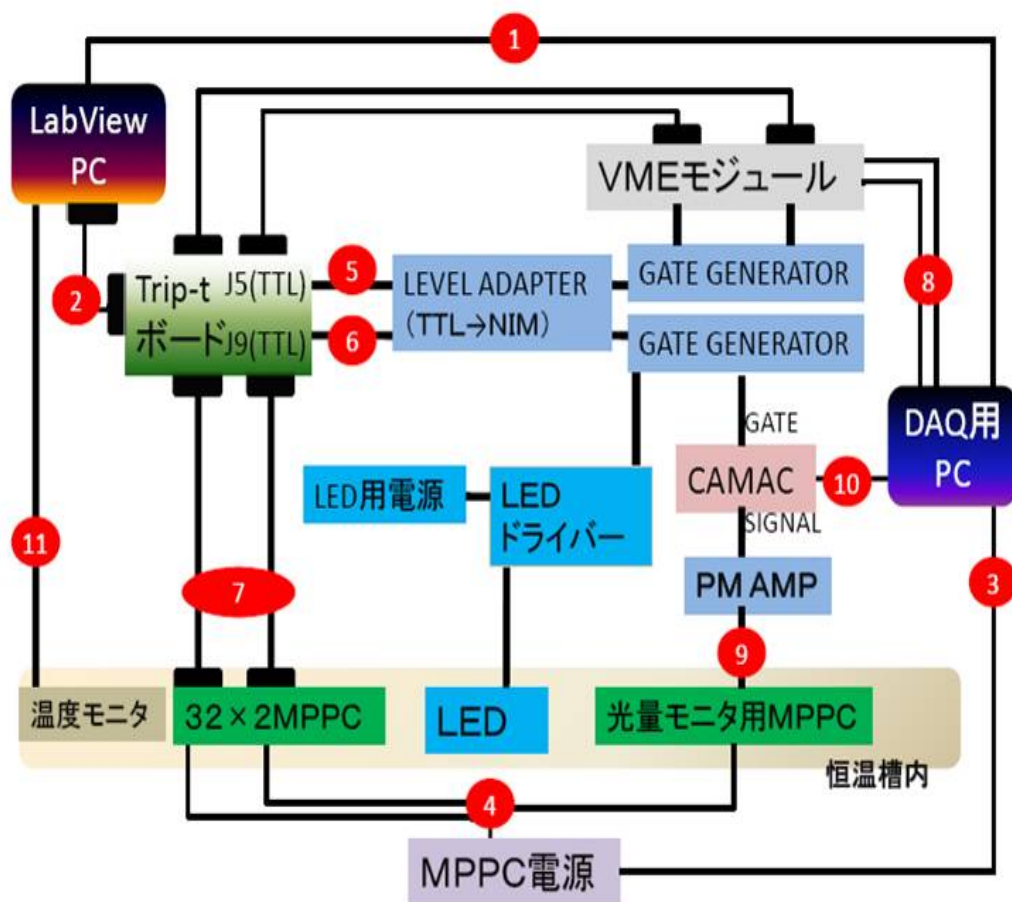


図 5.5: システムの概念図

6. Trip-t ボードにおける LED 及び光量モニタ用 MPPC のトリガーは、TTL 規格から NIM 規格に変換され、GATE GENERATOR により 2 つに分けられる。1 つは、LED ドライバーに接続され、LED のトリガーとなる。もう 1 つは、CAMAC の ADC モジュールに接続され、光量モニタ用 MPPC のゲートトリガーとなる。
7. $32 \times 2 = 64$ 個の MPPC のシグナルは Trip-t チップによってシリアル化され、VME モジュールに送信される。
8. DAQ 用 PC によって、64 個の MPPC のデータが取得される。
9. 光量モニタ用 MPPC の信号は NIM モジュールの一種である PM AMP によって 10 倍増幅され、CAMAC の ADC モジュールに送られる。
10. DAQ 用 PC によって、光量モニタ用 MPPC のデータが取得される。
11. 温度モニタは、USB 接続により、Lab View PC によって制御される。

5.3 Trip-t

T2K 実験では、読み出しにおいて、Trip-t(Trigger and Pipeline with Timing) が用いられることが決定しており、本測定においてもこれを用いた。図 (5.6) は Trip-t チップの写真である。

Trip-t とは、フェルミ国立加速器研究所によって開発されたマルチプレクサ機能のある ASIC(Application Specific Integrated Circuit) である。Trip-t には 32 個の入力チャンネルが存在し、入力されたシグナルはアンプによって増幅される。それらのシグナルに、バッファ付きパイプライン処理を行う。パイプラインの深さは 1~48 のレベルに設定することができる。この 32 チャンネル分のシグナルを MPPC の出力部分にあるマルチプレクサによって 1 チャンネルのシグナルへとシリアル化する。Trip-t には以下の 3 種類の出力が存在する。

- A_OUT: 入力電荷量に比例した 32 チャンネル分のシグナルをシリアル化したもの。
- T_OUT: シグナルがディスクリミネーターで設定された値を超えた時から、ゲートが閉じたときまでの時間に比例した量のシグナルを 32 チャンネル分シリアル化したもの。
- D_OUT: それぞれのチャンネルにおけるディスクリミネーターの出力信号。

5.4 Trip-t ボード

Trip-t チップは、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で開発された Trip-t ボードにマウントされる。図 (5.7) はこのボードの写真である。一方、MPPC は図 (5.8) の MPPC ボードにマウントされ、これらの間は、 $100k\Omega$ の抵抗と $100nF$ のコンデンサにより、DC ブロッキングされている。



図 5.6: Trip-t チップ

図 (5.9) は Trip-t ボードの概念図である。図の右上部分の LabViewPC からは制御用信号が入力され、図の中央下部分の VME module には測定済みアナログ信号が出力される。測定中は MPPC ボードは後述する恒温槽内にあり、Trip-t ボードはその外に設置されている。

MPPC ボードには、32 個の MPPC をインストールすることが可能であり、MPPC を動作させるために 69 ~ 71V 程度の直流電圧を掛ける必要がある。各 MPPC からのシグナルはフラットケーブルを通じて、Trip-t ボードに送られる。

Trip-t チップを動作させるには +2.5V の電圧が必要であり、Trip-t とデータ取得用の VME モジュールのインピーダンス接合用のオペアンプには $\pm 5.0V$ の電圧が必要である。これらの電圧は Trip-t ボード上に印加された $\pm 5.0V$ の電圧をレギュレーターによって調整することで供給されている。

本測定においては、Trip-t ボードと MPPC ボードのペアを 2 組使うことで $32 \times 2 = 64$ 個の MPPC を同時測定可能にしている。この際 Labview PC からのシグナルはデジタイゼーションによって送られ、2 枚の Trip-t ボードにおいて、共通のものとなっている。

図 (5.10) は Trip-t チップのブロックダイアグラムである。Trip-t のフロントエンドにはアンプが置かれており、入力された信号は増幅される。また、ディスクリミネータの値をここで設定する。次に 2 種類の 32 チャンルのパイプラインのそれぞれにおいて、各チャンネルに対応する MPPC からの電荷に比例した大きさのシグナルと、時間情報を示すシグナルが蓄積される。各パイプラインは 1~48 の深さに設定可能である。最後にマルチプレクサによってこれらのシグナルはそれぞれ上記の A_OUT シグナル、T_OUT シグナルとしてシリアル化され、出力される。

Trip-t の読み出しについては、付録 B で述べる。

5.5 DAQ 用 PC

本システムの制御を行う核となる PC である。この PC により、LabView PC、VME、MPPC 電源、CAMAC システムへ制御信号を送る。また、測定済みデータはこの PC に蓄



図 5.7: Trip-t ボード



図 5.8: MPPC ボード

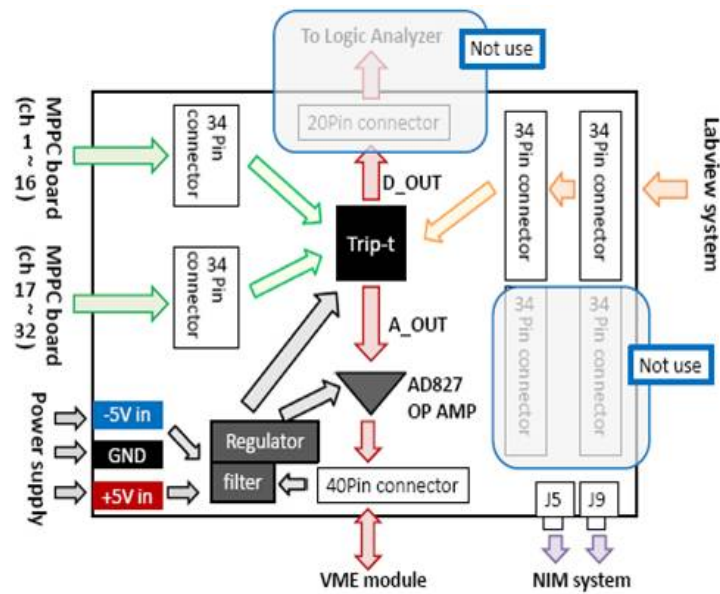


図 5.9: Trip-t ボードの概念図

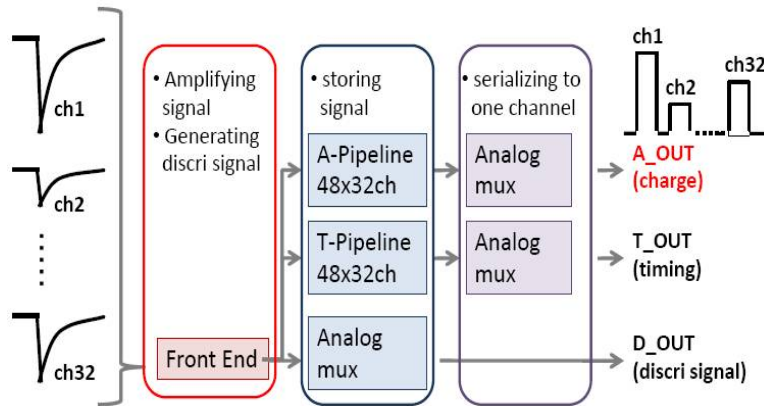


図 5.10: Trip-t のブロックダイアグラム

積される。

5.6 LabView PC

図 (5.11) は、National Instruments 社製、PXI-1042Q であり、本測定において、LabView PC と呼ばれているモジュールである。Trip-t チップ制御用のシグナル発信および、温度モニタの制御に用いており、DAQ 用 PC とネットワークハブを通じ接続されている。Trip-t チップについては、ゲインの設定、ゲート幅の設定を行い、また LED 用トリガー VME モジュール用のトリガーも発信する。

このプログラムの概略を図 (5.12) に示す。DAQ 用 PC は、Light, Noise, Stop の 3 通りの命令を出力することができる。それぞれの場合に対する動作を以下に示す。

- Light -光源有りでの測定-
 1. "PrgReset.hws"
Trip-t の設定をリセットする。
 2. "latency.hws"
Trip-t をダイナミックレンジを広げるために低ゲインに設定した上で、読み取りモードに設定する。
 3. "MPPC2.hws"
Trip-t のゲート幅を 200nsec に設定し、LED トリガーを ON にする。また、VME モジュール用トリガーを発信する。
- Noise -光源無しでの測定-
 1. "PrgReset.hws"
Trip-t の設定をリセットする。



図 5.11: LabView PC

2. "latency2.hws"

Trip-t をペDESTALと 1p.e. イベントに焦点を合わせるために高ゲインに設定した上で、読み取りモードに設定する。

3. "noise2.hws"

Trip-t のゲート幅を 800nsec に設定し、LED トリガーを OFF にする。また、VME モジュール用トリガーを発信する。光源無しでのランダムトリガーでの測定となるため、十分な 1p.e. イベント数を獲得するためにゲート幅を広げている。

- stop -測定の停止-

5.7 VME モジュール

本測定で使用した DAQ ボードは、K2K 実験の SciBar 検出器用に開発された図 (5.13) の VME モジュールを用いている。SciBar 実験においては、多チャンネル読み出し LSI の一種である VA チップによってシリアル化されたシグナルの読み出しに用いられていた。

今回は、Trip-t の A_ OUT アナログシグナルのデジタル化に用いる。ここで、A_ OUT は DC+1.0V のオフセットに乗っているため、DAQ ボードにもこの電圧をかけ、オフセットを消去している。

本測定のトリガーレートは DAQ ボードにより決まっており、約 1kHz である。

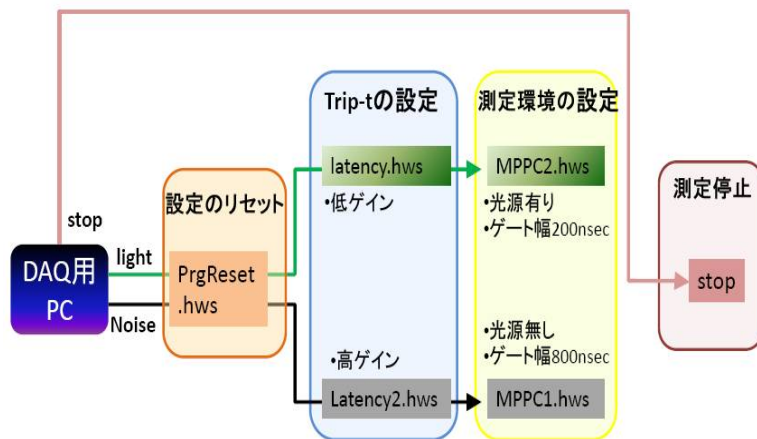


図 5.12: LabView による制御の概略



図 5.13: VME モジュール



図 5.14: SciBar DAQ ボード



図 5.15: 恒温槽内部の様子

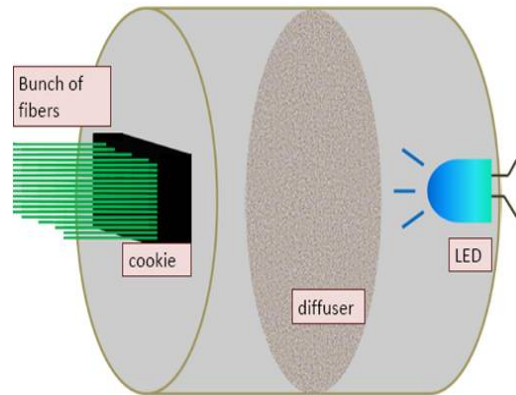


図 5.16: 光源の概念図

5.8 恒温槽と光源

本測定においては、30分ごとの温度変化が設定可能である恒温槽を用いた。恒温槽はDAQシステムとは、完全に独立して運転しており、この温度変化を考慮して、DAQプログラムを組む必要がある。

恒温槽の内部には、MPPCボード2枚と光源が置かれている。光源からは予備用のものを含めた、90本のファイバーがクッキーを通じて伸びている。これらのファイバーはGOMIコネクタを通じて、MPPCに光を供給する。図(5.15)に恒温槽内部の様子、図(5.16)に光源の概念図を示す。図(5.15)において、右上に見えるのが、光源であり、ブラケットで遮光されている。

5.9 温度のモニタリング

測定において、電圧変更プログラムと恒温槽の温度変化との間に時間的なずれが生じる可能性があるため、温度のモニタリングが求められる。

温度データロガーは、USB接続によって、LabView PCから操作およびログの獲得を行う。また、記録間隔は1秒に設定し、測定精度は ± 0.3 である。

図(5.17)は、一回の測定のタイムテーブルである。30分ごとに、恒温槽の温度を、25、20、15と変化させているが、設定温度に達するには5分程度の時間が必要である。そのため、余裕を持って各温度の始まり10分間は温度安定化の待ち時間として測定を行わず、残りの20分で測定を行っている。よって、一回の測定には30分 \times 3=90分費やすことになる。また、これらの温度は、T2K実験における検出器が置かれる場所の温度が20度程度と予定されていることから決定した。

時間	状態
0:00~0:10	待ち時間
0:10~0:20	25°C測定
0:20~0:30	待ち時間
0:30~0:40	待ち時間
0:40~0:50	20°C測定
0:50~1:00	待ち時間
1:00~1:10	待ち時間
1:10~1:20	15°C測定
1:20~1:30	待ち時間

図 5.17: 測定におけるタイムテーブル

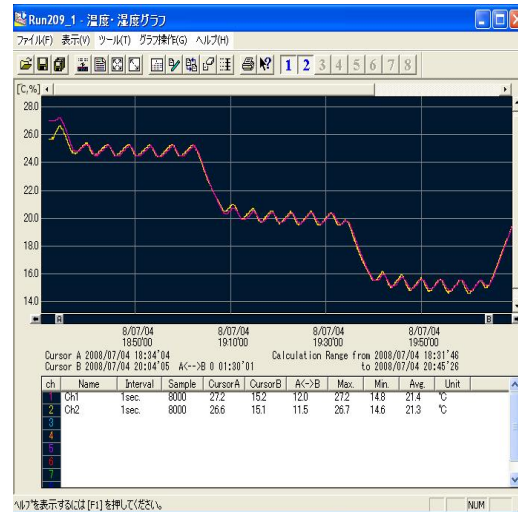


図 5.18: 恒温槽内の温度変化

図 (5.18) は、恒温槽内の温度変化をモニタリングしたものであり、一回の測定における典型的な時間変化である。図において、赤色の曲線と黄色の曲線が確認できるが、これは2つのセンサーを用い、2枚の MPPC ボード付近での温度変化をそれぞれモニタリングしていることに対応している。図から確認できるように両者の温度変化は良く一致している。また、25 から 20、また 20 から 15 の温度変化に、5 分程度の時間が必要であること、各設定温度においても周期の短い ± 0.4 程度の温度振動があることが確認でき、これは恒温槽の温度コントロールによっている。

5.10 MPPC 電源

MPPC 電源は、PL-120-0.6、GP-PL、GP-32 の 3 つのモジュールから構成されている。GP-PL 及び GP-32 は電源コントローラーである。PL-120-0.6 が直流電源であり、0V~120V の電圧を出力することができる。電圧範囲は 65536 のセクターに分割されており、約 0.0018V 単位での設定が可能である。

DAQ 用 PC による遠隔操作は、GP-IB 接続によって実現されている。DAQ 用 PC からの信号は、GP-IB インタフェースにより GP-32 に送られ、専用の光ファイバーによりさらに GP-PL に送られ、専用のコントロールケーブルにより最終的には PL-120-0.6 の電圧を設定する。

5.11 GOMI コネクタ

ファイバーと MPPC の接続においては、GOMI コネクタを用いる。GOMI コネクタは MPPC 側パーツとファイバー側パーツの 2 つで 1 組となっている。このコネクタは T2K 実験の INGRID 検出器および FGD において用いられる。

このコネクタには以下の様な特徴がある。

- 光量の損失を防ぐために、波長変換ファイバーの端面が MPPC に接近している。
- 検出器の構造上の理由からくる大きさの制限を満たす程度に小型である。
- ファイバー端面と MPPC 受光面の中心軸が一致する。
- MPPC 側パーツとファイバー側パーツの接続は、MPPC 側パーツのツメ型構造による。
- 弾性が高く、耐摩擦消耗性に優れているポリアセタール樹脂を使用している。
- 遮光のため、黒色である。
- MPPC 側パーツには、電極の向きを確認するための小さな目印がある。

上記の特徴の最後の項目について説明を行う。MPPC には、電圧印加用電極とシグナル読み出し用電極の 2 つの電極がある。しかし、コネクタに MPPC をインストールすると、外部から 2 本の電極の区別がつかなくなる。これを防ぐためにこの目印を導入した。

図 (5.19) は、MPPC 側パーツに MPPC を、ファイバー側パーツに波長変換ファイバーを取り付けたときの様子である。ファイバーの取り付けには、光学セメントを用いている。また写真で確認できるように、MPPC 側パーツには、シリアルナンバーが印刷されたシールを張り付けられており、一目でコネクタ内部の MPPC のシリアルナンバーが確認可能である。このシールは、MPPC 側パーツにおける電極向き確認用の目印と常に一定の向きで貼られており、このシールによっても電極の向きは確認可能である。図 (5.20) は、接続後のコネクタの様子である。

また、MPPC をコネクタに入れるために、専用の治具を開発した。

5.12 測定方法

本測定においては、前述したように 1 回の測定あたり、64 個の MPPC を約 90 分かけて測定する。各 MPPC に対して、0.1V 刻みで 20 点、温度については 15、20、25 の 3 点を測定する。そのため、これらの測定点は $20 \times 3 = 60$ 点となる。さらにこれに加えて、LED からの光量をモニタリングするために用意された MPPC に対して、各温度において、あらかじめ定められた電圧 1 点での測定を行う。よって、合計の測定点は $60 + 3 = 63$ 点となる。また、各測定点において、8000 イベントをとる。

表 (5.2) は、MPPC に負荷される電圧をまとめたものである。今回測定する MPPC は、そのブレイクダウン電圧が 3V 強のばらつきを持っていることが浜松ホトニクス社での出荷

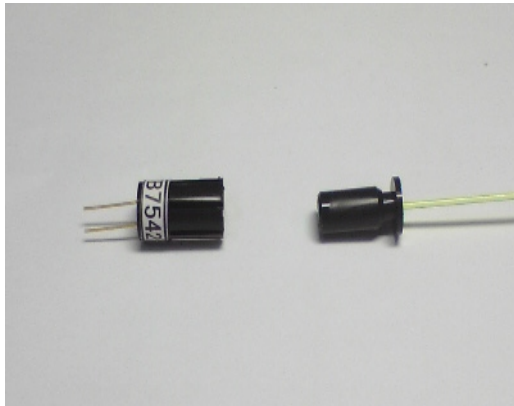


図 5.19: MPPC とファイバーの接続前の様子

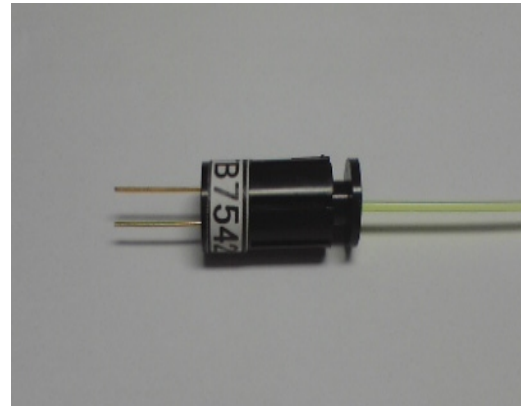


図 5.20: MPPC とファイバーの接続後の様子

表 5.2: MPPC に負荷される電圧

モード	測定準備用	本測定 (15)	本測定 (20)	本測定 (25)
high	71.0volt	68.9~70.8volt	69.2~71.1volt	69.5~71.4volt
middle	70.3volt	68.2~70.1volt	68.5~70.4volt	68.8~70.7volt
low	69.5volt	67.4~69.3volt	67.7~69.6volt	68.0~69.9volt

前テストにて確認されていた。MPPC に適正負荷電圧の範囲は約 1volt であるが、0.1volt 刻みで 20 点測定しても 2volt しかカバーできず、全ての MPPC の適性電圧をカバーすることはできない。また、ブレイクダウン電圧の低い MPPC に、高い負荷電圧をかけることも避けたい。

そのため、本測定においては 3 つの電圧モードを設定した。この表において、測定準備用の電圧とは、本測定前に、MPPC の適性負荷電圧を調べるためのプログラムにおいて使用される電圧である。また、高い温度での測定時ほど、高い電圧を負荷しているのは、ブレイクダウン電圧が温度の増加関数であることによる。

1 回の測定における手順は、測定前、データ取得、測定後の 3 つに大きく分けられる。以下ではそれらについて述べる。測定前の準備と測定後の後片付けには、合わせて約 30 分程度が必要である。

5.12.1 測定前

この作業には約 20 分の時間を要する。

- 64 個の MPPC とファイバーを GOMI コネクタを用いて繋ぎ、MPPC ボードにマウントする。
- MPPC のシグナルを確認する。

各 MPPC の ADC 分布を確認するプログラムを走らせる。この際、負荷される電圧値が表 (5.2) における測定準備用の電圧値である。このプログラムには、MPPC が正しい向きにインストールされており実際にシグナルが確認できるか、また負荷電圧が妥当なものであり 1p.e. イベントのピークが確認できるかを確かめるという二つの意義がある。

5.12.2 データ取得

この作業には約 90 分の時間を要する。

- 温度のモニタリングを開始する。
- 恒温槽のプログラム開始。
- 25 で光源無し of データを獲得する。
- 25 で光源有りのデータを獲得する。
- 上と同じ手順で 20、15 において、それぞれ光源無し、有りのデータを獲得する。

5.12.3 測定後

この作業には約 10 分の時間を要する。

- 温度のモニタリングを終了する。
- MPPC からファイバーを取り外し、測定した MPPC は MPPC ボードからはずし、保管用のプラスチックケースに入れる。

第6章 MPPC大量測定結果

本測定では、前の章において述べたシステムを用い、約 17500 個という大量の MPPC の性能測定を行った。本章においては、これらの結果について述べる。

6.1 解析方法

5.1 節の測定項目の算出にあたっては、以下の量が必要となる。

- ADC 分布における 0p.e. に立つピーク (ペDESTAL) の ADC チャンネルの平均値
- ADC 分布における 1p.e. に立つピークの ADC チャンネルの平均値
- 0p.e. イベント数
- 1p.e. イベント数

これらを ADC 分布から以下の手順により求める。

1. 解析用アプリケーション Root のピークサーチ機能を用いて、0p.e. イベント及び 1p.e. イベントのピークを探す。… 図 (6.1)
2. ピークサーチの結果得た、ピークの ADC チャンネルの値を初期パラメータとして、ダブルガウシアンによって仮フィットを行い、計 6 つのパラメータを得る。… 図 (6.2)
3. 仮フィットの結果得た 6 つのパラメータを初期パラメータとして、再びダブルガウシアンによってフィットを行う。その結果、0p.e. イベントと 1p.e. イベントにおいて、分布の ADC チャンネルの平均値と σ を得る。この時点で、求めるべき量のうち、0p.e. イベントの分布における ADC チャンネルの平均値 1p.e. イベントの分布における ADC チャンネルの平均値を得たことになる。… 図 (6.3)
4. 前の過程で求めた、0p.e. イベントと 1p.e. イベントにおける分布の ADC チャンネルの平均値と σ を用いて、 $\pm 3\sigma$ の範囲においてそれぞれのフィット関数のガウシアンを積分し、0p.e. イベント数及び 1p.e. イベント数を得る。ただし、この方法では 0p.e. イベントの左側のテール部分のイベントを取り逃す可能性があり、実際には上記の積分後にこのテールのイベント数を加えている。… 図 (6.4)

これらの得られた量を用いて、以下の節において述べる各測定量の定義に基づき、計算を行う。

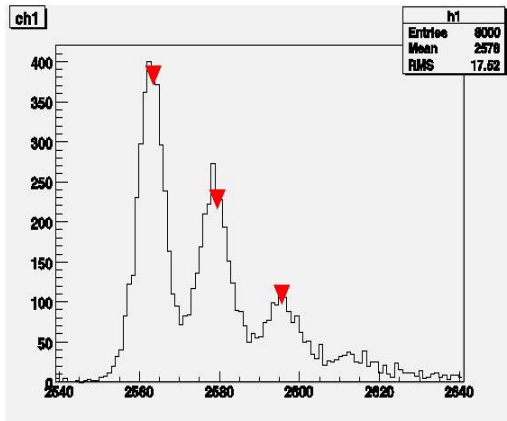


図 6.1: ADC 分布の解析 1/4

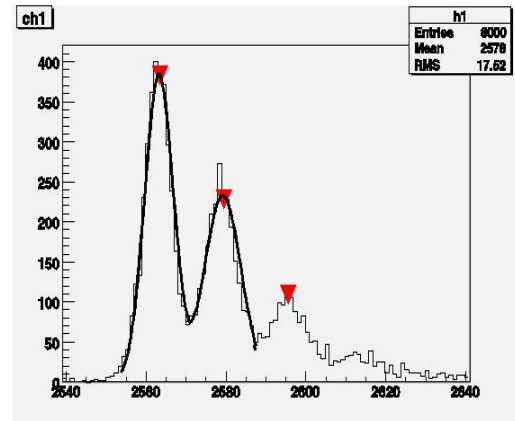


図 6.2: ADC 分布の解析 2/4

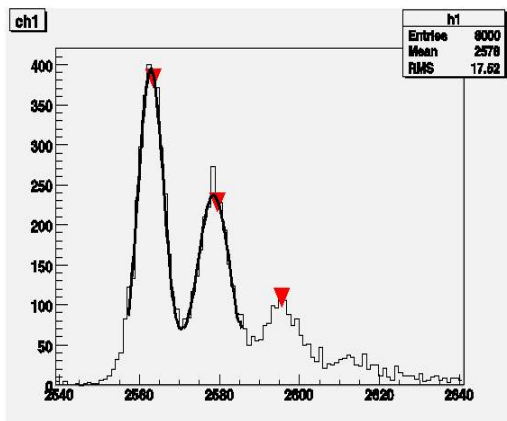


図 6.3: ADC 分布の解析 3/4

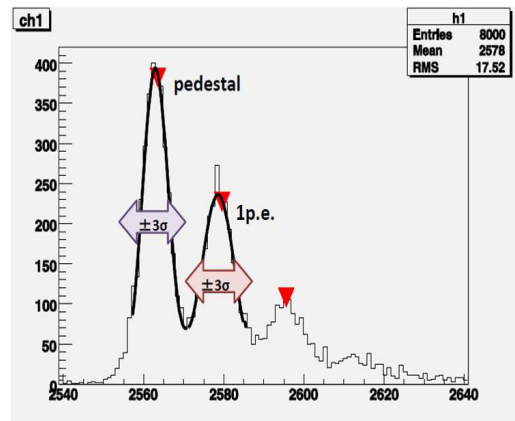


図 6.4: ADC 分布の解析 4/4

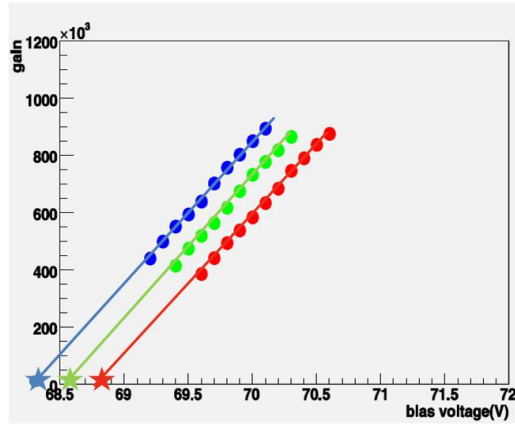


図 6.5: ゲインのバイアス電圧依存性-1MPPC-

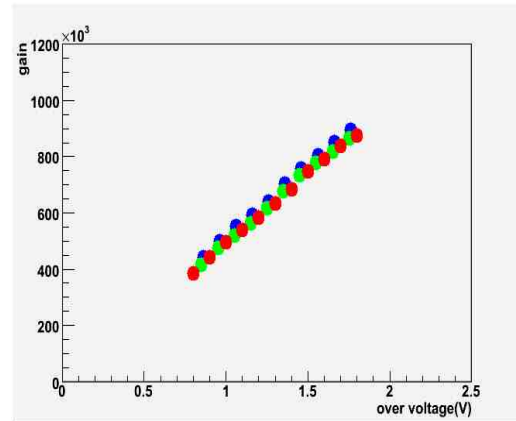


図 6.6: ゲインの V_{over} 依存性-1MPPC-

6.2 ゲイン

6.2.1 ゲインの算出方法

ゲインは、ADC 分布を用い以下のように定義した。

$$\text{ゲイン} = \frac{Q(1p.e.) - Q(\text{pedestal})}{e} \quad (6.1)$$

ここで、 $Q(1p.e.)$ は 1p.e. イベントに対応する電荷量、 $Q(\text{pedestal})$ はペDESTALに対応する電荷量、 e は素電荷である。

6.2.2 ゲインの測定結果-1MPPC-

図 (6.5) は、ゲインの電圧依存性を 1 つの MPPC についてプロットしたものである。青の点が 15、緑の点が 20、赤の点が 25 での測定結果であり、以下の図でも同様である。前述のように、ゲインカーブを外挿し、ゲインが 0 になった点の電圧値をブレイクダウン電圧と定める。この図から解るように、ゲインは各温度において、バイアス電圧に対して、線形に変化する。

図 (6.6) は、ゲインの V_{over} に対する依存性である。このように、ゲインは V_{over} のみの単調増加関数になっていることがわかる。

6.2.3 ゲインの測定結果-17686MPPCs-

図 (6.7) は、ゲインの V_{over} 依存性を 17686 個の全ての MPPC についてプロットしたものである。それぞれの温度でのグラフは重なっていることが分かる。一方、各 V_{over} にお

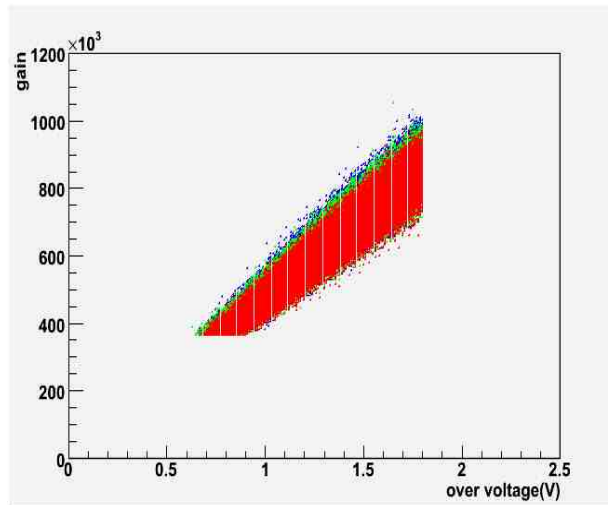


図 6.7: ゲインの V_{over} 依存性 -17686MPPCs-

表 6.1: $V_{over} = 1.0V$ 、 $1.4V$ における 15、20、25 でのゲインの平均値 \pm RMS

temperature	$V_{over} = 1.0V$	$V_{over} = 1.4V$
ゲイン 15	$4.907 \times 10^5 \pm 2.600 \times 10^4$	$6.939 \times 10^5 \pm 3.730 \times 10^4$
20	$4.851 \times 10^5 \pm 2.588 \times 10^4$	$6.832 \times 10^5 \pm 3.694 \times 10^4$
25	$4.750 \times 10^5 \pm 2.380 \times 10^4$	$6.690 \times 10^5 \pm 3.378 \times 10^4$

るゲインの値は幅を持つことがわかる。この点については 6.10 節において考察する。

図 (6.8) および図 (6.9) は、図 (6.7) を、20、 $V_{over} = 1.0V$ 、 $1.4V$ においてスライスしたヒストグラムである。ここで、 $V_{over} = 1.0V$ は FGD における動作電圧を、 $V_{over} = 1.4V$ は INGRID 検出器における動作電圧を意味している。

表 (6.1) に、 $V_{over} = 1.0V$ 、 $1.4V$ 、それぞれにおいて、15、20、25 でのゲインの平均値 \pm RMS をまとめた。ゲインの値は異なる温度においても V_{over} が等しければほぼ一定であることがわかる。しかし、詳しくみると、温度毎のゲインの値に数%の変化がみられ、低い温度ほど高くなっていることがわかる。この点については、今回の測定の系統誤差である可能性が高いが、現段階では理由はわかっていない。この程度の値のずれによる実用上の問題は特に無いと考えられる。

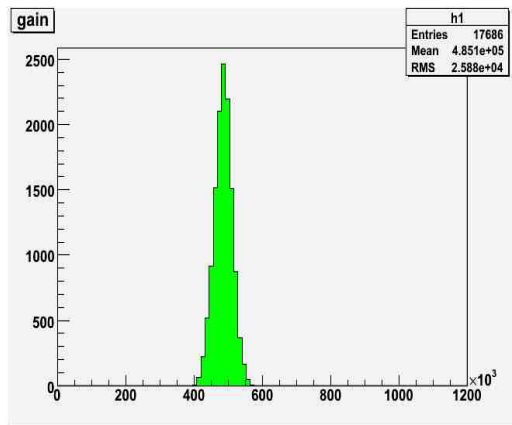


図 6.8: ゲインの $V_{over} = 1.0V$ でのスライス (20)

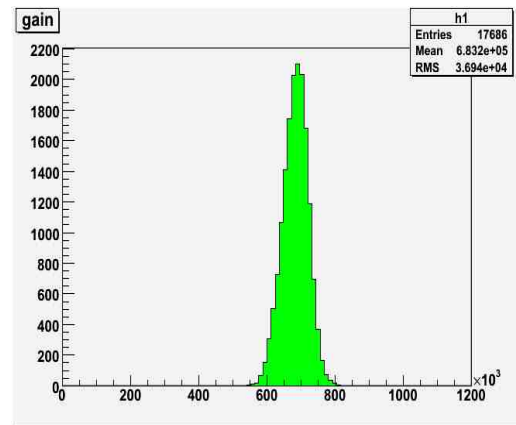


図 6.9: ゲインの $V_{over} = 1.4V$ でのスライス (20)

6.3 ブレイクダウン電圧

17686 個のサンプルにおいて、浜松ホトニクス社での出荷前テストからブレイクダウン電圧の最大値と最小値の差は約 3V であることがわかった。一方、ある MPPC において通常付加される電圧は 1V 程度の範囲と狭い。そのため、前もってそれぞれの MPPC のブレイクダウン電圧を調べて置くことは重要である。

6.3.1 ブレイクダウン電圧の算出方法

ブレイクダウン電圧は図 (6.5) のようにゲインカーブを外挿することで、この直線と“ゲイン=0”の直線が交わる点の電圧値として定義される。

6.3.2 ブレイクダウン電圧の測定結果 -17686MPPCs-

図 (6.10) は、シリアル番号に対するブレイクダウン電圧の分布である。青色の点が 15 、緑色の点が 20 、赤色の点が 25 を意味している。シリアル番号に飛びがあるのは、便宜上の理由である。全ての MPPC において、温度が 5 増加するに従い、0.2 ~0.3 程度、ブレイクダウン電圧が増加していることがわかる。さらに、シリアルナンバーにして 500 程度毎のセクターでブレイクダウン電圧が不連続に変化しており、各セクターにおいては、ブレイクダウン電圧のばらつきは 1V 程度である。これは、MPPC の各半導体素子は、1 枚のウエハから 500 程度が繰り抜かれることで製造されており、各ウエハの性質が現れているためである。

図 (6.11) はブレイクダウン電圧の 20 での個数分布である。ブレイクダウン電圧の高い MPPC がやや多く存在していることが確認できる。

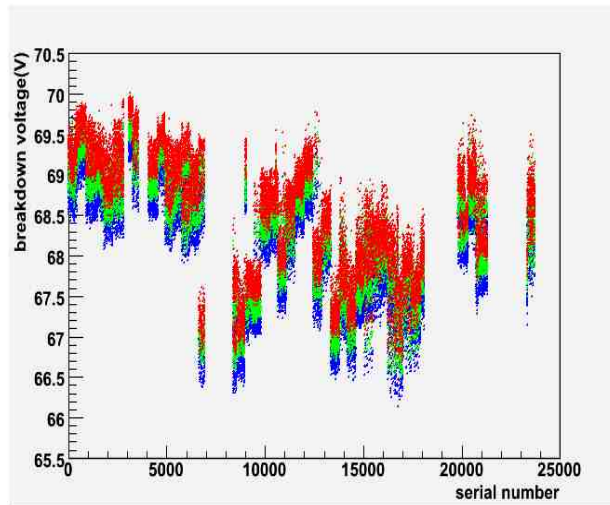


図 6.10: シリアル番号に対するブレイクダウン電圧の分布

表 6.2: 15、20、25 でのブレイクダウン電圧の平均値 ± RMS

	temperature	
ブレイクダウン電圧 (V)	15	68.05 ± 0.7255
	20	68.29 ± 0.7292
	25	68.53 ± 0.7267

それぞれの温度での平均値 ±RMS をまとめたものを表 (6.2) にのせた。

6.4 キャパシタンス

6.4.1 キャパシタンスの算出方法

式 (4.2) の関係から V_{over} に対してゲインをプロットしたグラフの傾きから、キャパシタンスを定義する。

6.4.2 キャパシタンスの測定結果 -17686MPPCs-

図 (6.12) に 20 での (キャパシタンス/e) の分布を示す。分布の幅については、6.10 節で考察する。

また、表 (6.3) に、それぞれの温度での、平均値と RMS をまとめた。キャパシタンスの値は、ほぼ温度によらず一定であるが、ゲインと同様に低い温度での値の方が数%高くなっ

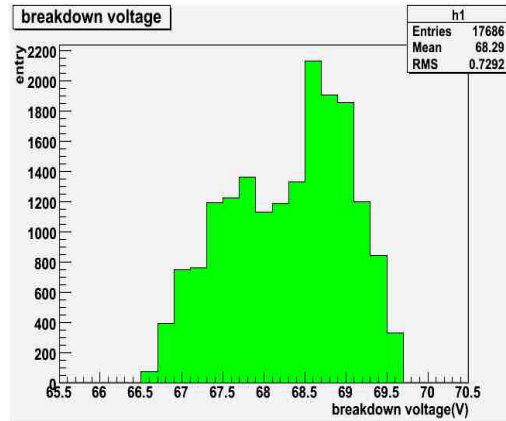


図 6.11: ブレイクダウン電圧の分布 (20)

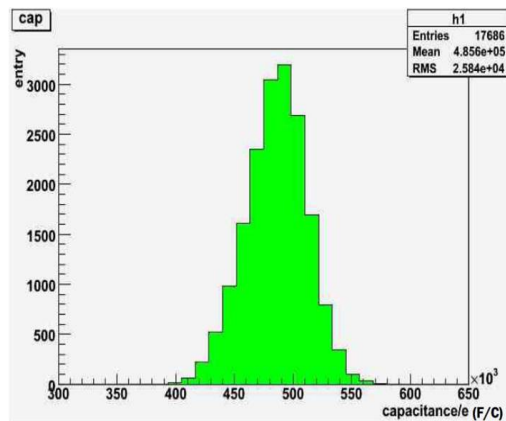


図 6.12: キャパシタンスの分布 (20)

ていることがわかる。この理由は解明していないが、実用上の問題は特に無い。

6.5 ノイズレート

ノイズレートが T2K 実験の要請を超えるほどに高すぎるものは、本実験に使用できない。また、ノイズレートは個体差による影響が大きいことが以前の測定において確認されており、各 MPPC において測定することは必須である。

表 6.3: 15 、 20 、 25 でのキャパシタンスの平均値 ± RMS

		temperature
キャパシタンス/e (F/C)	15	$4.929 \times 10^5 \pm 2.600 \times 10^4$
	20	$4.856 \times 10^5 \pm 2.584 \times 10^4$
	25	$4.750 \times 10^5 \pm 2.381 \times 10^4$

6.5.1 ノイズレートの算出方法

本測定では、ノイズレートを ADC 分布から計算する。具体的には、測定時間中 (=ゲート幅 × 全イベント数) に生じた全てのノイズイベントを測定時間で割ることにより求めた。以下ではポワソン分布を仮定している。

$$\begin{aligned}
 \text{ノイズレート} &= \frac{\sum_{i=0}^{\infty} i \times \text{Noise}_i}{\text{GateWidth} \times \text{TotalEvents}} \\
 &= \frac{\text{TotalEvents} \times \mu}{\text{GateWidth} \times \text{TotalEvents}} \\
 &= \frac{\text{TotalEvents} \times -\ln(\text{Noise}_0 / \text{TotalEvents})}{\text{GateWidth} \times \text{TotalEvents}} \\
 &= \frac{-\ln(\text{Noise}_0 / \text{TotalEvents})}{\text{GateWidth}} \tag{6.2}
 \end{aligned}$$

ここで、 Noise_i は i 個の光電子が観測されたイベント数 (Noise_0 はペDESTALピークの積分値)、 μ は一つのイベントにおいて観測される光電子数の平均値を表す。また、本測定において、ゲート幅 (上式の GateWidth) は 800nsec に設定した。観測イベント数 (上式の TotalEvents) は 8000 である。

6.5.2 ノイズレートの測定結果-1MPPC-

図 (6.13) は、ノイズレートの電圧依存性を 1 つの MPPC についてプロットしたものである。青の点が 15 、緑の点が 20 、赤の点が 25 での測定結果を意味しており、以下の図でも同様である。図 (6.14) は、ノイズレートの V_{over} に対する依存性である。このように、ノイズレートは V_{over} と温度の関数になっており、両者に対し、単調に増加する。この温度に対する依存性がノイズレートの特徴である。

6.5.3 ノイズレートの測定結果-17686MPPCs-

図 (6.15) は、ノイズレートの V_{over} 依存性を 17686 個の全ての MPPC についてプロットしたものである。

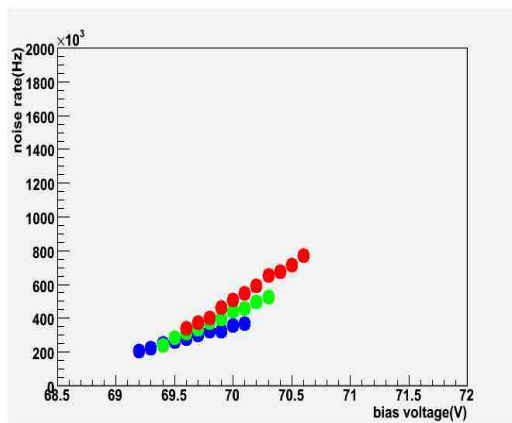


図 6.13: ノイズレートのバイアス電圧依存性-1MPPC-

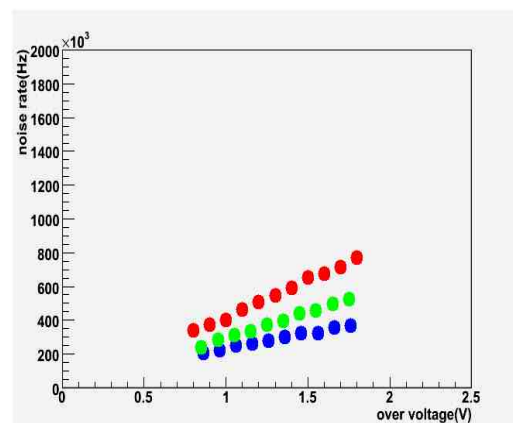


図 6.14: ノイズレートの V_{over} 依存性-1MPPC-

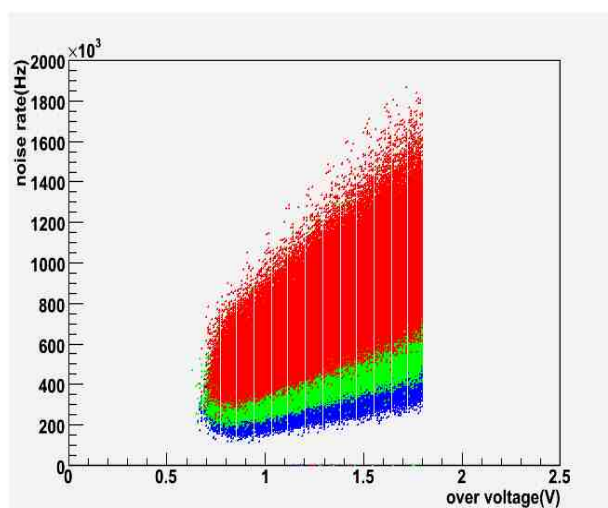


図 6.15: ノイズレートの V_{over} 依存性 -17686MPPCs-

表 6.4: $V_{over} = 1.0V, 1.4V$ における 15 、 20 、 25 でのノイズレートの平均値 \pm RMS

	temperature	$V_{over} = 1.0V$	$V_{over} = 1.4V$
ノイズレート (Hz)	15	$3.371 \times 10^5 \pm 8.535 \times 10^4$	$4.496 \times 10^5 \pm 1.132 \times 10^5$
	20	$4.471 \times 10^5 \pm 1.020 \times 10^5$	$6.129 \times 10^5 \pm 1.367 \times 10^5$
	25	$6.025 \times 10^5 \pm 1.213 \times 10^5$	$8.452 \times 10^5 \pm 1.681 \times 10^5$

図 (6.16) に図 (6.15) をスライスした結果を示す。左側が $V_{over} = 1.0V$, 右側が $V_{over} = 1.4V$ であり, 青色が 15 、緑色が 20 、赤色が 25 を表している。図からわかるように、ノイズレートは温度に強く依存する。一方、ノイズレートには個体差が存在することが過去の測定から知られている。この点については、6.10 節において考察する。また、ノイズレートの温度依存性は次節にまとめた。

表 (6.4) に、 $V_{over} = 1.0V, 1.4V$ 、それぞれにおいて、15 、 20 、 25 でのノイズレートの平均値 \pm RMS をあげた。

6.5.4 ノイズレートの温度依存性について

結果

本編における大量測定の結果を用いる。 $V_{over}=1.0V\sim 1.8V$ の 0.1V 刻みの計 9 点において、15 、 20 、 25 それぞれでのノイズレートの値の分布の平均値を用いた。

ここで、ノイズは熱励起によるもののみを考える。このとき、ノイズが生じる確率は、単位体積当たりにおいて、以下の式で表わされる。

$$\text{ノイズレート} \propto T^{(3/2)} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_b T}\right) \quad (6.3)$$

ここで、 T は絶対温度であり、 E_g はエネルギーギャップ、 k_b はボルツマン定数である。

図 (6.17) は $V_{over}=1.0V\sim 1.8V$ の 0.1V 刻みの各 V_{over} におけるノイズレートの温度依存性を式 (6.3) によって、フィッティングしたものである。

また、表 (4.1) において述べたように、全ての検出器においてノイズレートは 1.5MHz 以下と要請されている。ここで、ノイズレートには 6.10 節において述べるように 20% 強の個体差があることを考慮する必要がある。そこで今回は、図 (6.17) に示した式 (6.3) によるフィット関数を用いることで、各電圧においてノイズレートの平均値が 1MHz となる温度を見積もった。このとき、個体差を正規分布と仮定することで、99.4% の MPPC のノイズレートは 1.5MHz 以下におさまる。

その結果を図 (6.18) 及び図 (6.19) に示す。図 (6.19) において、左下に行くほど、ノイズレートは小さくなる。このように MPPC が実用的である環境は温度と V_{over} によって制限されていることがわかる。

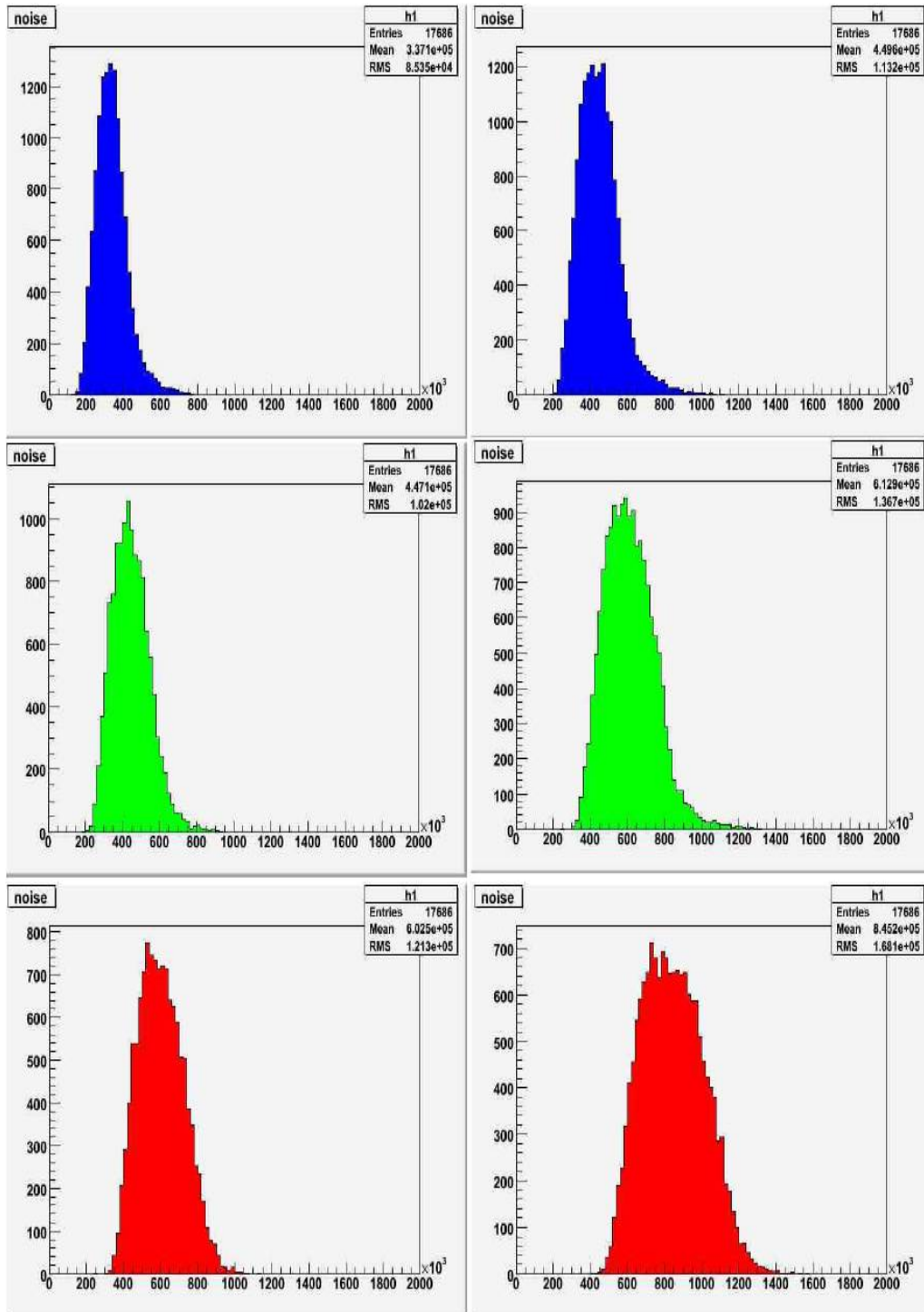


図 6.16: ノイズレートのスライス:左側が $V_{over} = 1.0V$, 右側が $V_{over} = 1.4V$, 青色が 15、
 緑色が 20、赤色が 25

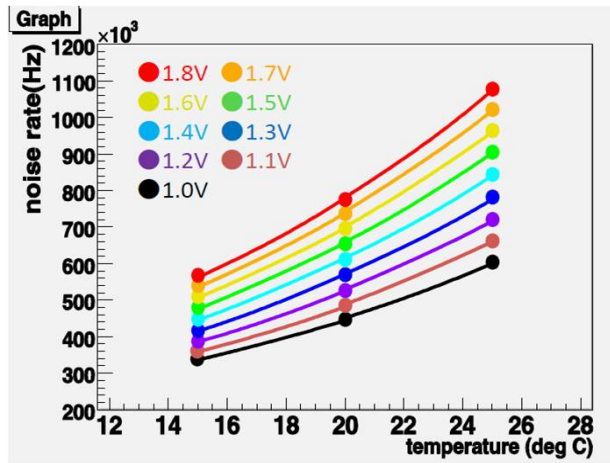


図 6.17: 各 V_{over} におけるノイズレートの温度依存性

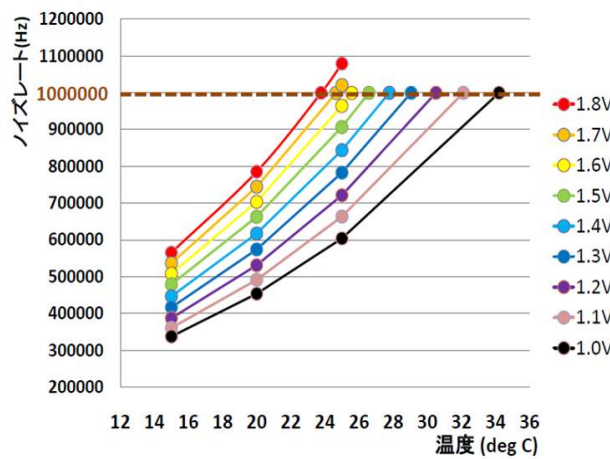


図 6.18: 各 V_{over} におけるノイズレートの温度依存性:式 (6.3) においてノイズレートが 1MHz になる点

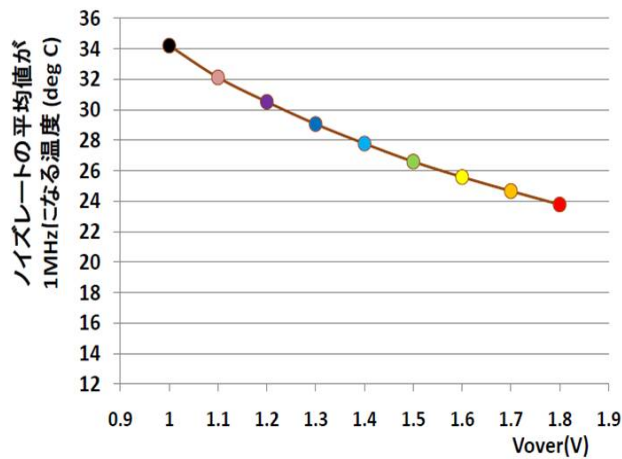


図 6.19: 各 V_{over} において、ノイズレートの平均値が 1MHz になる温度

温度係数

温度上昇に対して、ノイズレートがどの程度増加するかの指標を示すものとして、ノイズレートの温度係数 y を以下で定義する。ここで、 $Noise(T, V)$ は、温度 T 、 $V_{over} = V$ におけるノイズレートを示す。

$$y = \frac{1}{Noise(T, V)} \times \frac{dNoise(T, V)}{dT}$$

$$= \frac{1}{Noise(T, V)} \times \frac{Noise(T + dT, V) - Noise(T, V)}{dT} \quad (6.4)$$

ただし、今回の大量測定において、測定温度は 15、20、25 の三点であり、上式の dT は最小でも 5 に制限される。図 (6.20) は各 V_{over} における温度係数である。図における青色の点は、式 (6.4) において、 $T=15$ 、 $dT=5$ 、 $V=1.0V, 1.1V, \dots, 1.8V$ としたものの、橙色の点は、式 (6.4) において、 $T=20$ 、 $dT=5$ 、 $V=1.0V, 1.1V, \dots, 1.8V$ としたものである。

図 (6.20) における計 18 点における平均値は 7.4%/ (標準偏差は 0.3%/) となり、この値が 1 度あたりのノイズレートの平均的な変化率を与える。

6.6 クロストーク・アフターパルス率

6.6.1 算出方法

図 (4.1) に示したように波形の違いのみを見れば、それぞれのイベントの応答時間からクロストークによるイベントとアフターパルスによるイベントの区別はある程度は可能である。しかし、大量測定においては、測定の効率化の都合上、一定時間のゲート内に入った

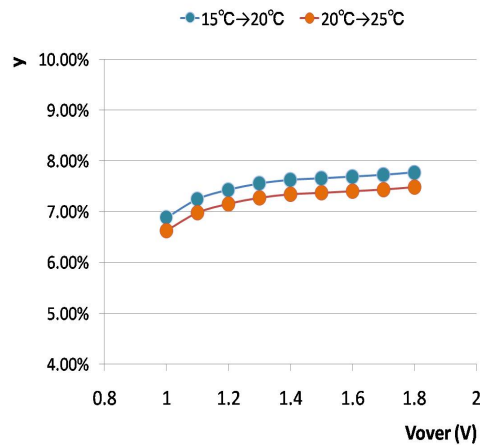


図 6.20: 各 V_{over} におけるノイズレートの温度係数

電荷を積分するという方法をとっているため、クロストークとアフターパルスは、区別できない。

クロストークとアフターパルスによる影響から、0p.e. イベント数からポワソン分布を仮定して見積もられた 1p.e. イベント数と、実際の 1p.e. イベント数の間には違いがある。実際の 1p.e. イベント数は、クロストーク及びアフターパルスの効果から、2p.e. 以上にカウントされたイベント数だけ減ることになる。以下の式によってクロストーク・アフターパルス率を定義する。

$$\text{クロストーク・アフターパルス率} = \frac{\text{expected1p.e.events} - \text{observed1p.e.events}}{\text{expected1p.e.events}} \quad (6.5)$$

式 (6.5) において、expected1p.e. events がポワソン分布を仮定して見積もられた 1p.e. イベント数、observed1p.e. events が実際に観測された 1p.e. イベントを示している。

6.6.2 クロストーク・アフターパルス率の測定結果-1MPPC-

図 (6.21) は、クロストーク・アフターパルス率の電圧依存性を 1 つの MPPC についてプロットしたものである。青の点が 15、緑の点が 20、赤の点が 25 での測定結果を意味しており、以下の図でも同様である。

図 (6.22) は、クロストーク・アフターパルス率の V_{over} に対する依存性である。このように、クロストーク・アフターパルス率は V_{over} のみの増加関数になっている。

6.6.3 クロストーク・アフターパルス率の測定結果-17686MPPCs-

図 (6.23) は、クロストーク・アフターパルス率の V_{over} 依存性を 17686 個の全ての MPPC についてプロットしたものである。図から確認できるように、各温度でのグラフは重なっ

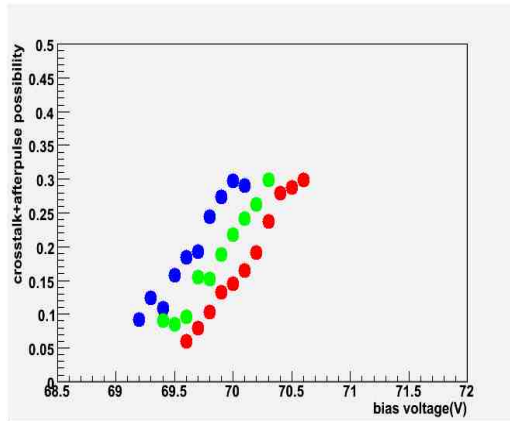


図 6.21: クロストーク・アフターパルス率のバイアス電圧依存性-1MPPC-

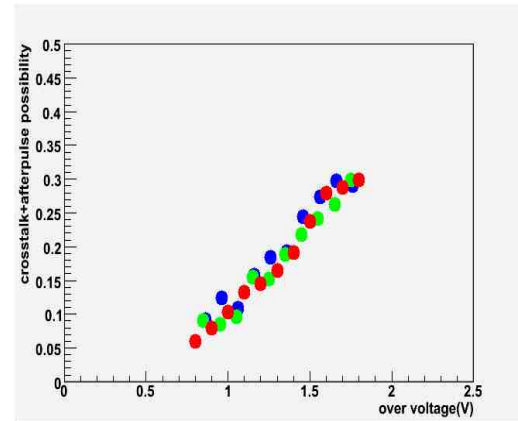


図 6.22: クロストーク・アフターパルス率の V_{over} 依存性-1MPPC-

表 6.5: $V_{over} = 1.0V$ 、 $1.4V$ における 15、20、25 でのクロストーク・アフターパルス率の平均値 \pm RMS

	temperature	$V_{over} = 1.0V$	$V_{over} = 1.4V$
クロストーク・アフターパルス率	15	0.07330 ± 0.03854	0.1597 ± 0.03800
	20	0.07008 ± 0.03587	0.1561 ± 0.03475
	25	0.06618 ± 0.03147	0.1505 ± 0.03220

ている。一方、 V_{over} が $1.5V$ の付近においても、クロストーク・アフターパルス率が 0 程度になる点が存在することが分かる。これは測定誤差によるものと考えられる。この点に関して 6.10 節に考察を与えた。また、これらの測定結果から、6.11 節において述べるように、クロストーク・アフターパルスが V_{over} に関して 2 乗で依存するということがわかった。

図 (6.24) および図 (6.25) は、図 (6.23) を、20、 $V_{over}=1.0V$ 、 $1.4V$ において、スライスしたヒストグラムである。

表 (6.5) に、 $V_{over} = 1.0V$ 、 $1.4V$ 、それぞれにおいて、15、20、25 でのクロストーク・アフターパルス率の平均値 \pm RMS をあげた。

クロストーク・アフターパルス率は V_{over} に強く依存していることが分かる。またここでも、ゲインと同様に低い温度での値ほど数%高くなっていることがわかる。この点においても 6.10 節で考察する。

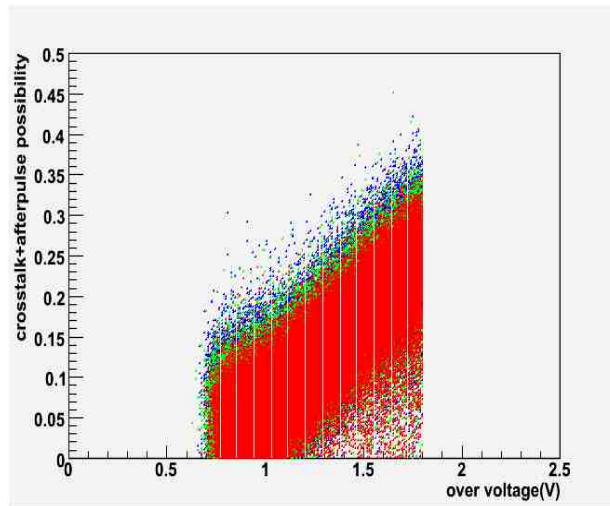


図 6.23: クロストーク・アフターパルス率の V_{over} 依存性 -17686MPPCs-

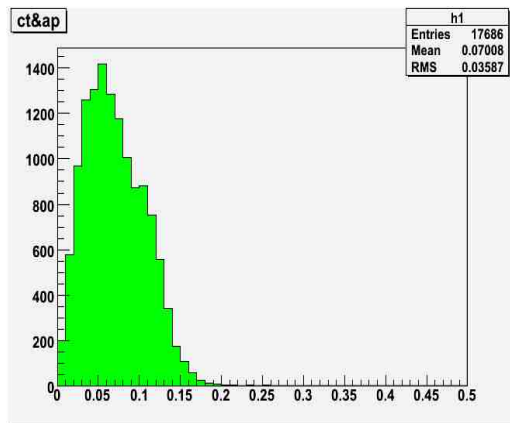


図 6.24: クロストーク・アフターパルス率の $V_{over} = 1.0V$ でのスライス (20)

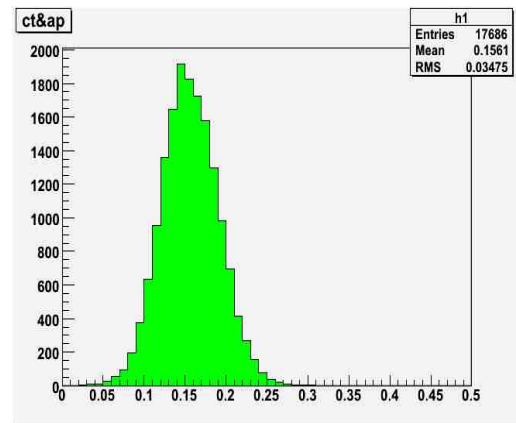


図 6.25: クロストーク・アフターパルス率の $V_{over} = 1.4V$ でのスライス (20)

6.7 relative PDE(Photon Ditection Efficiency)

6.7.1 relative PDE の算出方法

PDE の絶対値を大量測定において求めるのは困難であるため、本測定においては、relative PDE として、PMT との獲得光量比として定義する。このとき、MPPC の PDE の絶対量は以下の式によって、表わされる。

$$\text{MPPC の PDE の絶対値} = \text{MPPC の relativePDE} \times \text{PMT の PDE} \quad (6.6)$$

ただし、セッティングを扱いやすくするために、PMT との獲得光量比がわかっている MPPC を用い、これを 90 番目の波長変換ファイバーに接続し、実際にはこの MPPC との獲得光量比を測定した。式で表現すると以下ようになる。ここで、 $p.e.(i:MPPC)$ は、 i 番目のチャンネルで MPPC により測定された光量、 $p.e.(i:PMT)$ は、 i 番目のチャンネルで PMT により測定された光量である。

$$\begin{aligned} i \text{ チャンネルでの relativePDE} &= \frac{p.e.(i : MPPC)}{p.e.(i : PMT)} \\ &= \frac{p.e.(i : MPPC)}{p.e.(90 : MPPC)} \times \frac{p.e.(90 : MPPC)}{p.e.(i : PMT)} \end{aligned} \quad (6.7)$$

$p.e.(90 : MPPC)/p.e.(i : PMT)$ は前もって測定可能な量であるので、実際の測定においては、 $p.e.(i : MPPC)/p.e.(90 : MPPC)$ が求めるべき量である。

ここで、正しい $p.e.(i : MPPC)$ を求めるためには、クロストークやアフターパルスの効果を除く必要があり、獲得光電子数に対し、ポワソン分布を仮定することで、以下の式により求めた。ここで n は獲得光電子数、 $P(n)$ は獲得光電子数が n になるような確率を示している。

$$p.e. = \sum_{n=0} n \times P(n) = \mu = -\ln(P(0)) \quad (6.8)$$

6.7.2 relative PDE の測定方法

relative PDE 測定セットアップの概念図を図 (6.26) に示す。光量モニタ用 MPPC は独立したボードにマウントされている。また前述のように、この光量モニタ用 MPPC はあらかじめリファレンス用 PMT(浜松ホトニクス社 光電子増倍管アッセンブリ H7415 (R6427 内蔵アッセンブリ)) に対する相対的な光子検出効率を測定している。

図 (6.27) は光量モニタリング用の MPPC をマウントするためのボードであり、図 (6.28) はその回路図である。図の右側が MPPC のシグナル読み出し側、左側が電圧供給側である。コンデンサと抵抗によるハイパスフィルター回路を含んでいる。また、光量モニタリング用 MPPC ボードには、最大 4 つの MPPC がマウント可能であるが、そのうちの 1 チャンネルを使用している。

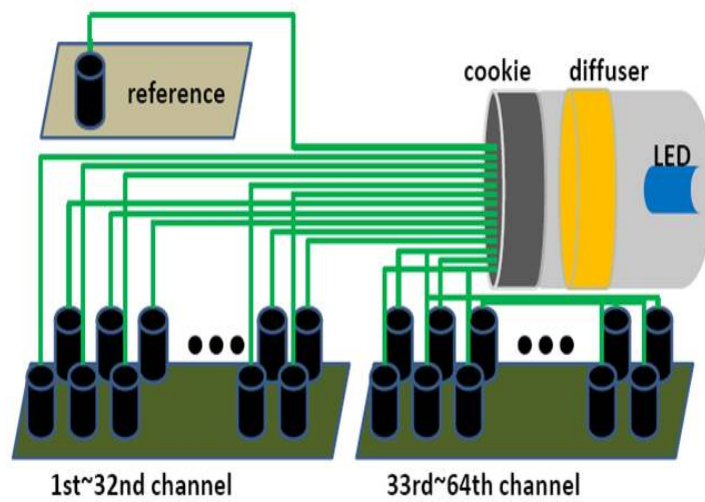


図 6.26: relative PDE 測定セットアップの概念図

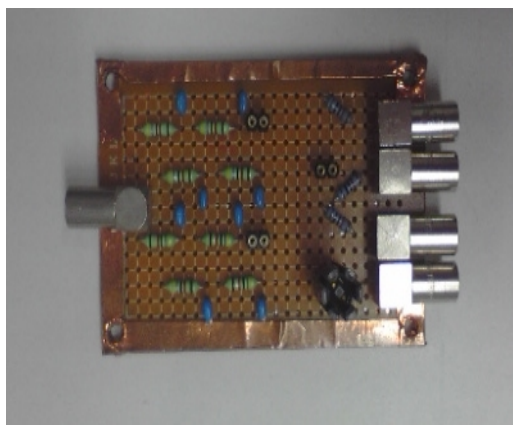


図 6.27: 光量モニタリング用 MPPC ボード

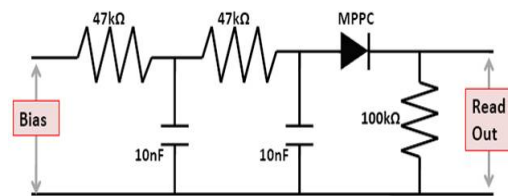


図 6.28: 光量モニタリング用 MPPC ボードの回路図

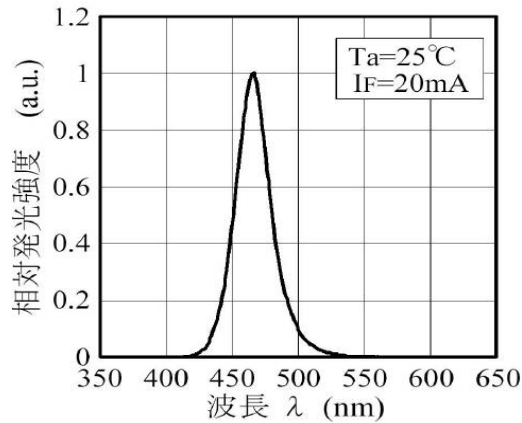


図 6.29: 用いた LED の波長:NICHIA 社のカタログより引用

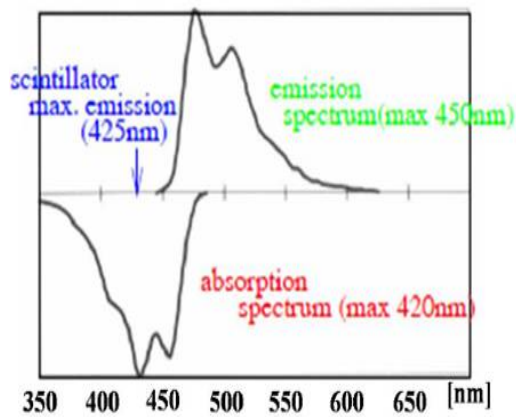


図 6.30: 波長変換ファイバーの吸収再発光の波長域:クラレ社のカタログより引用

また図(6.29)は使用した LED(NICHIA 社製 NSPB500S) の光の波長分布であり、図(6.30)は用いた波長変換ファイバーの吸収波長域、再発光波長域である。この吸収再発光の過程で、LED の光は 470~530nm に変換される。このとき、図(6.31)から解るようにリファレンス用 PMT の量子効率 η は 10% ~ 15% である。

6.7.3 波長変換ファイバー

本測定においては、実際の T2K 実験において用いられる直径 1mm の波長変換ファイバー(クラレ社の Y-11(200)MS)を用いて、LED の光の波長を変換し、MPPC の受光面に送っている。このファイバーの吸収再発光の波長域を図(6.30)に示す。

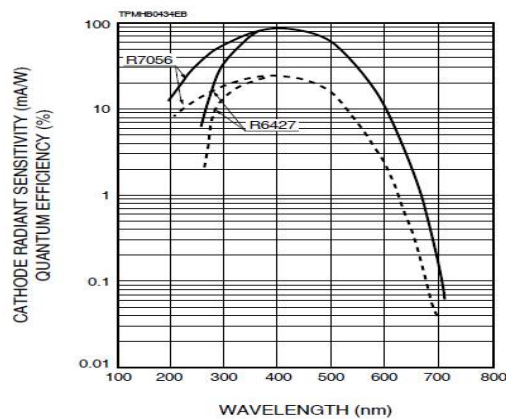


図 6.31: 用いた PMT の量子効率の波長依存性:浜松ホトニクス社のカタログより引用

6.7.4 relative PDE の測定結果-1MPPC-

図 (6.13) は、relative PDE の電圧依存性を 1 つの MPPC についてプロットしたものである。青の点が 15 、緑の点が 20 、赤の点が 25 での測定結果を意味しており、以下の図でも同様である。

図 (6.33) は、relative PDE の V_{over} に対する依存性である。このように、relative PDE は V_{over} のみの増加関数になっている。

6.7.5 relative PDE の測定結果-17686MPPCs-

図 (6.34) は、relative PDE の V_{over} 依存性を 17686 個の全ての MPPC についてプロットしたものである。このように最大で PMT に対し 4.5 倍程度の PDE を持つような測定結果も存在し、この値は 45~60%ほどの PDE に対応する。式 (4.4) において、 $50\mu\text{m}$ ピッチの MPPC では $\epsilon_{geometrical}$ は 61.5%であるから、QE と ϵ_{Geiger} がほぼ 1 である必要があり、この測定結果は原理上の上限値に達しており、非現実的である。一方、64 個のそれぞれの MPPC に入射する光量の正確なモニタリングは困難であり、今回の同時測定では、著しく relative PDE の低い素子 ($\sim \times 0.5$ PMT) を除外するのが主な目的であった。実際に、著しく高い relative PDE は測定誤差から来ている可能性が高い、6.10 節においてこの誤差を考察した。

図 (6.35) および図 (6.36) は、図 (6.34) を、20 、 $V_{over} = 1.0V, 1.4V$ においてスライスしたヒストグラムである。

表 (6.6) に、 $V_{over} = 1.0V, 1.4V$ 、それぞれにおいて、15 、 20 、 25 での relative PDE の平均値 \pm RMS をあげた。relative PDE は V_{over} に強く依存し、また高い温度ほどやや高い relative PDE を示す傾向がある。この温度変化については、ノイズ起源であると考えられるが、今回の大量測定においては、そこまで考慮することができなかった。

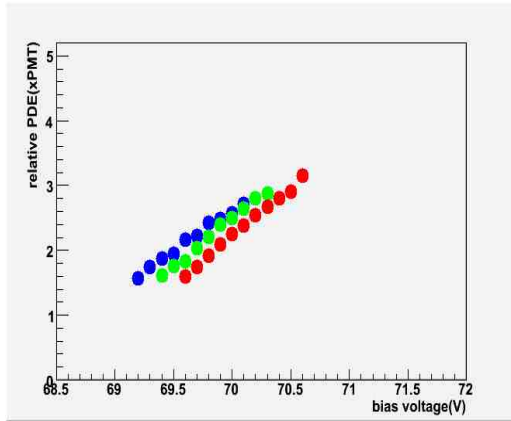


図 6.32: relative PDE のバイアス電圧依存性-1MPPC-

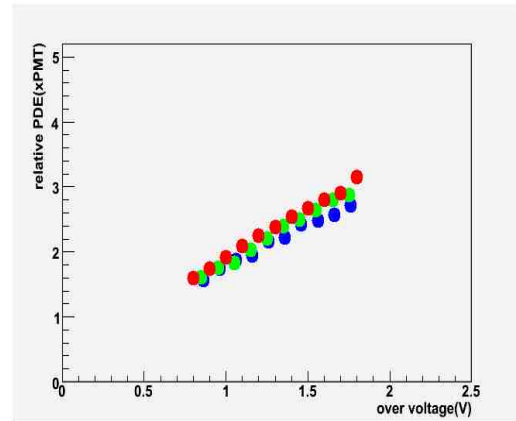


図 6.33: relative PDE の V_{over} 依存性-1MPPC-

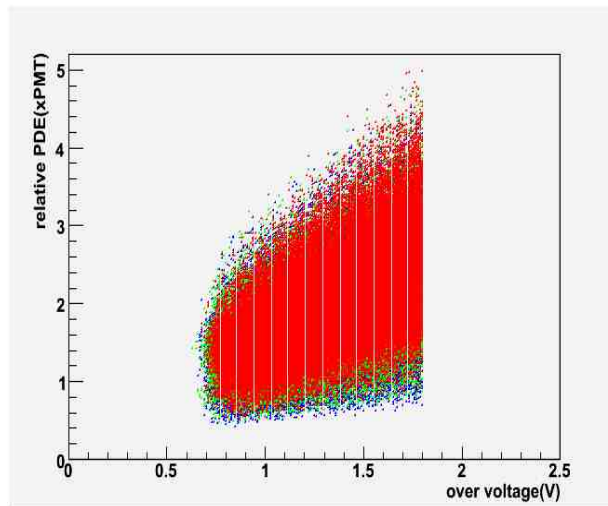


図 6.34: relative PDE の V_{over} 依存性 -17686MPPCs-

表 6.6: $V_{over} = 1.0V$ 、 $1.4V$ における 15、20、25 での relative PDE の平均値 \pm RMS

	temperature	$V_{over} = 1.0V$	$V_{over} = 1.4V$
relative PDE (xPMT)	15	1.450 ± 0.3216	1.861 ± 0.4155
	20	1.528 ± 0.3260	1.985 ± 0.4272
	25	1.620 ± 0.3380	2.142 ± 0.4446

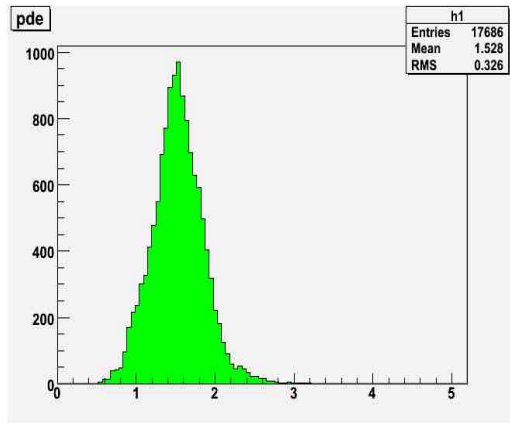


図 6.35: relative PDE の $V_{over} = 1.0V$ でのスライス (20)

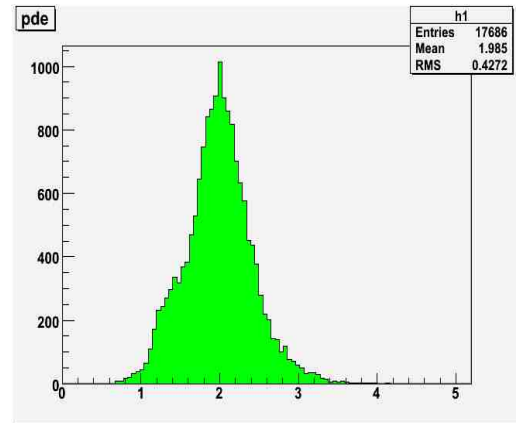


図 6.36: relative PDE の $V_{over} = 1.4V$ でのスライス (20)

6.8 故障率

データを得ることができた MPPC の他に、これらの MPPC はあらゆる負荷電圧に対し全くシグナルの出ない MPPC が計 9 個存在した。よって、本測定での故障率は $9/(17686+9) \approx 0.05\%$ となる。全くシグナルを返さないことから、信号線または電圧負荷用の線が切れていると考えられる。これらの MPPC は出荷当時はシグナルを返していたと考えられ、出荷後の数ヵ月において故障したと思われる。

一方、各測定項目を得た結果、データを得ることができた全ての MPPC については、実用できることがわかった。しかし、これは浜松ホトニクス側において、出荷前テストが行われており、そこで合格したものの中での結果であるため純粋なテスト合格率とは言えない。

6.9 INGRID 検出器および FGD での使用値

ここまでで得られた、ゲイン、ブレイクダウン電圧、キャパシタンス、ノイズレート、クロストーク・アフターパルス率、relative PDE の値に対し、 $V_{over} = 1.0V, 1.4V$ における 15、20、25 の平均値 \pm RMS を表 (6.7) にまとめた。キャパシタンスを除いた全ての量は、 V_{over} の増加関数であること。顕著な温度変化が見てとれる量はブレイクダウン電圧とノイズレートのみであることがわかる。

なお、この章においては、各測定量のスライシングは FGD と INGRID 検出器それぞれに対応する $V_{over} = 1.0V, V_{over} = 1.4V$ の点のみで行った。6.11 節においては、 $V_{over} = 1.0, 1.1 \dots 1.8V$ におけるスライスの結果を示す。

表 6.7: $V_{over} = 1.0V$ 、 $1.4V$ における 15、20、25 での全測定項目の平均値 \pm RMS

	temperature	$V_{over} = 1.0V$	$V_{over} = 1.4V$
ゲイン	15	$4.907 \times 10^5 \pm 2.600 \times 10^4$	$6.939 \times 10^5 \pm 3.730 \times 10^4$
	20	$4.851 \times 10^5 \pm 2.588 \times 10^4$	$6.832 \times 10^5 \pm 3.694 \times 10^4$
	25	$4.750 \times 10^5 \pm 2.380 \times 10^4$	$6.690 \times 10^5 \pm 3.378 \times 10^4$
ブレイクダウン電圧 (V)	15	68.05 ± 0.7255	
	20	68.29 ± 0.7292	
	25	68.53 ± 0.7267	
キャパシタンス/e (F/C)	15	$4.929 \times 10^5 \pm 2.600 \times 10^4$	
	20	$4.856 \times 10^5 \pm 2.584 \times 10^4$	
	25	$4.750 \times 10^5 \pm 2.381 \times 10^4$	
ノイズレート (Hz)	15	$3.371 \times 10^5 \pm 8.535 \times 10^4$	$4.496 \times 10^5 \pm 1.132 \times 10^5$
	20	$4.471 \times 10^5 \pm 1.020 \times 10^5$	$6.129 \times 10^5 \pm 1.367 \times 10^5$
	25	$6.025 \times 10^5 \pm 1.213 \times 10^5$	$8.452 \times 10^5 \pm 1.681 \times 10^5$
クロストーク・ アフターパルス率	15	0.07330 ± 0.03854	0.1597 ± 0.03800
	20	0.07008 ± 0.03587	0.1561 ± 0.03475
	25	0.06618 ± 0.03147	0.1505 ± 0.03220
relative PDE (xPMT)	15	1.450 ± 0.3216	1.861 ± 0.4155
	20	1.528 ± 0.3260	1.985 ± 0.4272
	25	1.621 ± 0.3380	2.142 ± 0.4446

表 6.8: $V_{over} = 1.4V$ における 20 での各測定量の平均値、RMS、RMS/平均値

	誤差	平均値	RMS	RMS/平均値
ゲイン		6.832×10^5	3.694×10^4	5.406%
ノイズレート		6.129×10^5	1.367×10^5	22.30%
クロストーク・アフターパルス率		0.1561	0.03475	22.26%
relative PDE		1.985	0.4272	21.52%

表 6.9: $V_{over} = 1.4V$ における 20 での各測定量の RMS/平均値、系統誤差、系統誤差以外のばらつき

項目	RMS/平均値	系統誤差	系統誤差以外
ゲイン	5.406%	~4.2%	~3.3%
ノイズレート	22.30%	~4.6%	~22%
クロストーク・アフターパルス率	22.26%	~21%	~7.4%
relative PDE	21.52%	~20%	~7.6%

6.10 考察

6.10.1 測定結果におけるばらつき

各測定量のある温度および V_{over} においてスライスした結果のヒストグラムにおいて、それらの値は幅を持っている。この幅がシステム上の問題から生じている系統誤差なのか、そもそも MPPC 自身の個体差によるものなのかを調べることは重要である。実際に過去の測定からノイズレートが個体差を持つことは知られている。以下では、ゲイン、ノイズレート、クロストーク・アフターパルス率、relative PDE の値のばらつきについて考察する。

表 (6.8) に、20、1.4V におけるゲイン、ノイズレート、クロストーク・アフターパルス率、relative PDE の平均値、RMS、RMS/平均値を示す。

6.10.2 誤差に対するまとめ

20、 $V_{over}=1.4V$ のデータについてゲイン、ノイズレート、クロストーク・アフターパルス率、relative PDE の系統誤差と系統誤差以外から来るばらつきを見積もった。その結果を表 (6.9) にまとめる。また、その見積もりの過程は付録 A に示した。

表 (6.9) に、RMS/平均値に対して、ノイズレートを除くと系統誤差の方が、大部分を占めている。一方、ノイズレートにおいては、系統誤差以外のばらつきが大きく、これは個体差によるものであり、それが 20%程を占めていると考えられる。これは、以前の測定と

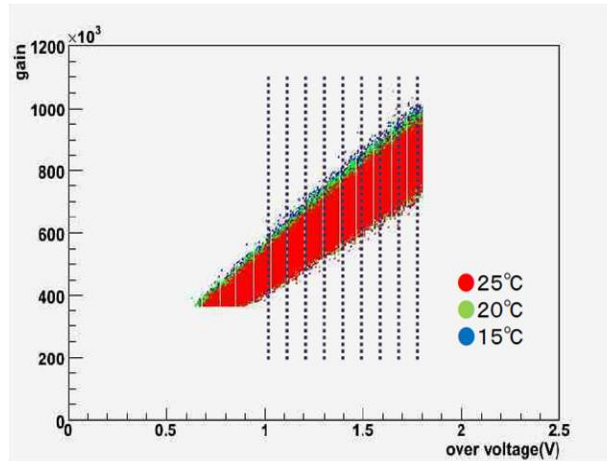


図 6.37: ゲインの各 V_{over} におけるスライシングの様子

比べても整合性がとれている。ゲイン、クロストーク・アフターパルス率、relative PDE における系統誤差以外のばらつきの理由については、さらなる調査が必要である。

クロストーク・アフターパルス率と relative PDE の見積もられた誤差が大きいことがわかる。クロストーク・アフターパルス率に関しては、その定義である式 (6.5) において、分子がわずかな差をみる形になっており、誤差が大きく効くことによる。relative PDE に関しては、システム上の誤差が大きいことによる。この点についても、付録 A に示す。

また、表 (6.9) には示していないが、キャパシタンスはゲインと同程度の、RMS/平均値、系統誤差を持つ。

6.11 各測定量の V_{over} 依存性

この節では、各測定量の $V_{over} = 1.0, 1.1 \dots 1.8V$ におけるスライスの結果を示す。

6.11.1 結果

図 (6.37) は、ゲインの各 V_{over} におけるスライシングの様子である。このように、 $V_{over} = 1.0V, 1.1V, \dots, 1.8V$ において、スライシングを行う。

図 (6.38) は各 V_{over} におけるスライシングの結果である。これにより、測定量の平均値と RMS を求める。

他の温度及び測定量についても同様な手順をとった。その結果を表 (6.10),(6.11),(6.12),(6.13) に示す。

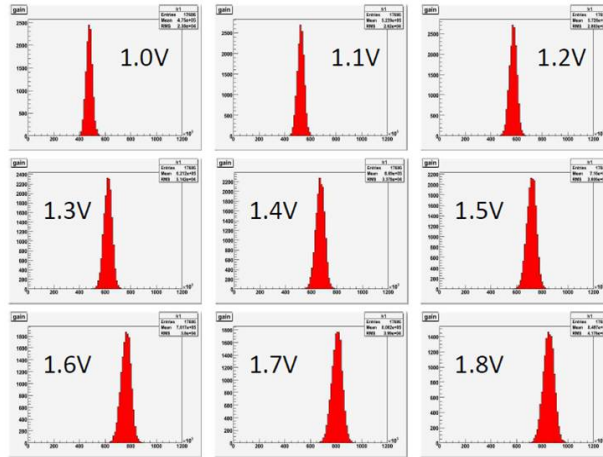


図 6.38: 25 におけるゲインの各 V_{over} におけるスライシングの結果

表 6.10: ゲインの平均値 \pm RMS

$V_{over}(V)$	15	20	25
1.0	$4.907 \times 10^5 \pm 2.600 \times 10^4$	$4.851 \times 10^5 \pm 2.588 \times 10^4$	$4.750 \times 10^5 \pm 2.380 \times 10^4$
1.1	$5.420 \times 10^5 \pm 2.857 \times 10^4$	$5.352 \times 10^5 \pm 2.855 \times 10^4$	$5.239 \times 10^5 \pm 2.620 \times 10^4$
1.2	$5.934 \times 10^5 \pm 3.136 \times 10^4$	$5.850 \times 10^5 \pm 3.142 \times 10^4$	$5.726 \times 10^5 \pm 2.883 \times 10^4$
1.3	$6.441 \times 10^5 \pm 3.438 \times 10^4$	$6.344 \times 10^5 \pm 3.431 \times 10^4$	$6.212 \times 10^5 \pm 3.142 \times 10^4$
1.4	$6.939 \times 10^5 \pm 3.730 \times 10^4$	$6.832 \times 10^5 \pm 3.694 \times 10^4$	$6.690 \times 10^5 \pm 3.378 \times 10^4$
1.5	$7.425 \times 10^5 \pm 3.977 \times 10^4$	$7.307 \times 10^5 \pm 3.936 \times 10^4$	$7.160 \times 10^5 \pm 3.605 \times 10^4$
1.6	$7.905 \times 10^5 \pm 4.187 \times 10^4$	$7.770 \times 10^5 \pm 4.173 \times 10^4$	$7.617 \times 10^5 \pm 3.800 \times 10^4$
1.7	$8.380 \times 10^5 \pm 4.375 \times 10^4$	$8.223 \times 10^5 \pm 4.380 \times 10^4$	$8.062 \times 10^5 \pm 3.990 \times 10^4$
1.8	$8.851 \times 10^5 \pm 4.496 \times 10^4$	$8.670 \times 10^5 \pm 4.606 \times 10^4$	$8.497 \times 10^5 \pm 4.176 \times 10^4$

表 6.11: ノイズレートの平均値 \pm RMS

$V_{over}(V)$	15 (Hz)	20 (Hz)	25 (Hz)
1.0	$3.371 \times 10^5 \pm 8.535 \times 10^4$	$4.471 \times 10^5 \pm 1.020 \times 10^5$	$6.025 \times 10^5 \pm 1.213 \times 10^5$
1.1	$3.612 \times 10^5 \pm 9.139 \times 10^4$	$4.855 \times 10^5 \pm 1.098 \times 10^5$	$6.610 \times 10^5 \pm 1.320 \times 10^5$
1.2	$3.887 \times 10^5 \pm 9.808 \times 10^4$	$5.275 \times 10^5 \pm 1.192 \times 10^5$	$7.213 \times 10^5 \pm 1.440 \times 10^5$
1.3	$4.183 \times 10^5 \pm 1.056 \times 10^5$	$5.705 \times 10^5 \pm 1.279 \times 10^5$	$7.832 \times 10^5 \pm 1.563 \times 10^5$
1.4	$4.496 \times 10^5 \pm 1.132 \times 10^5$	$6.129 \times 10^5 \pm 1.367 \times 10^5$	$8.452 \times 10^5 \pm 1.681 \times 10^5$
1.5	$4.814 \times 10^5 \pm 1.213 \times 10^5$	$6.554 \times 10^5 \pm 1.459 \times 10^5$	$9.062 \times 10^5 \pm 1.794 \times 10^5$
1.6	$5.118 \times 10^5 \pm 1.284 \times 10^5$	$6.972 \times 10^5 \pm 1.550 \times 10^5$	$9.655 \times 10^5 \pm 1.904 \times 10^5$
1.7	$5.410 \times 10^5 \pm 1.349 \times 10^5$	$7.378 \times 10^5 \pm 1.635 \times 10^5$	$1.023 \times 10^6 \pm 2.008 \times 10^5$
1.8	$5.688 \times 10^5 \pm 1.414 \times 10^5$	$7.763 \times 10^5 \pm 1.708 \times 10^5$	$1.079 \times 10^6 \pm 2.092 \times 10^5$

表 6.12: クロストーク・アフターパルス率の平均値 \pm RMS

$V_{over}(V)$	15	20	25
1.0	0.07330 ± 0.03854	0.07008 ± 0.03587	0.06618 ± 0.03147
1.1	0.08805 ± 0.03868	0.08574 ± 0.03601	0.08209 ± 0.03210
1.2	0.1093 ± 0.03903	0.1074 ± 0.03591	0.1038 ± 0.03199
1.3	0.1340 ± 0.03828	0.1317 ± 0.03500	0.1273 ± 0.03140
1.4	0.1597 ± 0.03800	0.1561 ± 0.03475	0.1505 ± 0.03220
1.5	0.1848 ± 0.03745	0.1803 ± 0.03511	0.1738 ± 0.03357
1.6	0.2090 ± 0.03711	0.2034 ± 0.03536	0.1965 ± 0.03467
1.7	0.2329 ± 0.03754	0.2258 ± 0.03679	0.2186 ± 0.03654
1.8	0.2570 ± 0.03770	0.2480 ± 0.03865	0.2402 ± 0.03833

表 6.13: relative PDE の平均値 \pm RMS

$V_{over}(V)$	15 (xPMT)	20 (xPMT)	25 (xPMT)
1.0	1.450 \pm 0.3216	1.528 \pm 0.3260	1.621 \pm 0.3380
1.1	1.549 \pm 0.3491	1.639 \pm 0.3543	1.746 \pm 0.3666
1.2	1.654 \pm 0.3741	1.756 \pm 0.3806	1.880 \pm 0.3934
1.3	1.758 \pm 0.3962	1.872 \pm 0.4042	2.011 \pm 0.4196
1.4	1.861 \pm 0.4155	1.985 \pm 0.4272	2.142 \pm 0.4446
1.5	1.954 \pm 0.4335	2.093 \pm 0.4481	2.267 \pm 0.4692
1.6	2.042 \pm 0.4507	2.194 \pm 0.4684	2.387 \pm 0.4944
1.7	2.127 \pm 0.4663	2.293 \pm 0.4887	2.504 \pm 0.5184
1.8	2.206 \pm 0.4789	2.388 \pm 0.5085	2.617 \pm 0.5427

6.11.2 各測定量の平均値の V_{over} 依存性

1 個の MPPC における各測定量の V_{over} に対する依存性は、統計が少なく、その関数が見えにくい。今回の大量測定を終えて、我々は約 17500 個の MPPC のデータを得ることができた。この大きな統計量を用いることで、各測定量の V_{over} に対する依存性を求める。

前節の各測定量の平均値を用い、 V_{over} 依存性をプロットしたものが図 (6.39)~(6.42) である。特にクロストーク・アフターパルス率については、2 次関数的に電圧依存する様子が確認できる。

6.11.3 考察

クロストーク・アフターパルス率が V_{over} についてその 2 乗で依存する様子を 17500 個のデータという大きな統計を用いて見ることができたのは、MPPC 内部の物理的現象を明らかにするためにも意義がある。

まず、クロストーク率が V_{over} の 2 乗に依存することについて考察する。クロストークは以下の過程により起きる。

1. ある ADC ピクセルにおいて二次的光子が生まれる
2. 生まれた二次的光子が他のピクセルに移動する
3. 移動した二次的光子がアバランシェ増幅を起こす

ここで、上記の 1. が起こる確率は、生じた電子ホール対の量に比例すると考えられる。電子の量はつまりゲインであるから、この確率は V_{over} に比例する。一方、2. が起こる確率は V_{over} には依存しないと考えられる。よって、クロストークの V_{over} に対する 2 乗の依存性を説明するには、3. の確率、すなわちアバランシェ増幅を起こす確率 (式 (4.4) にお

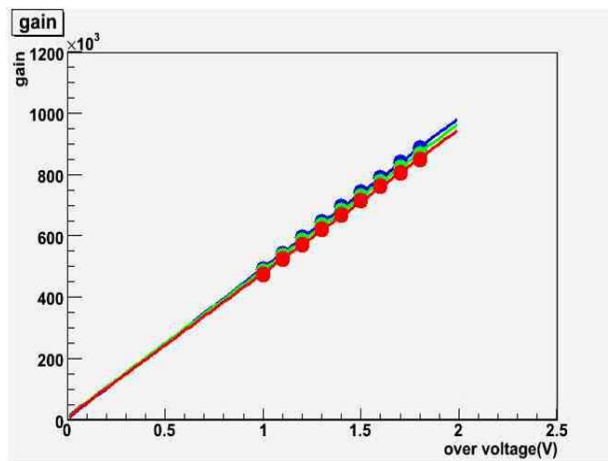


図 6.39: ゲインの V_{over} 依存性

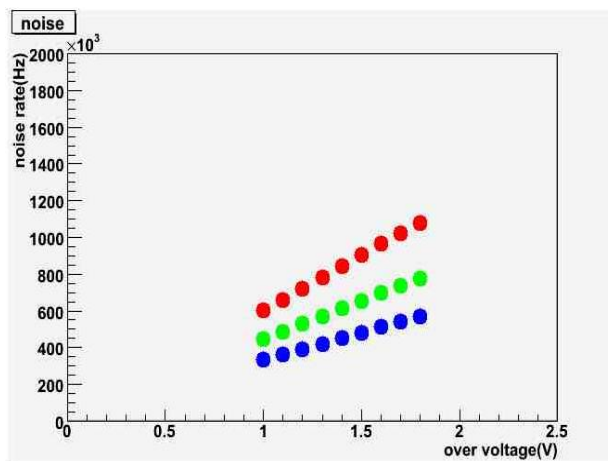


図 6.40: ノイズレートの V_{over} 依存性

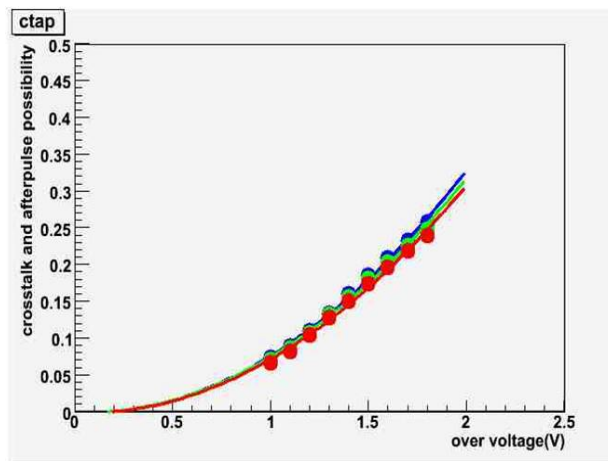


図 6.41: クロストーク・アフターパルス率の V_{over} 依存性

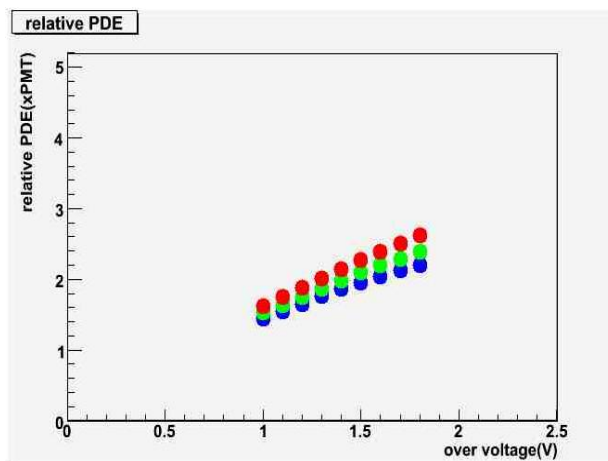


図 6.42: relative PDE の V_{over} 依存性

る ϵ_{Geiger} のファクター) が V_{over} に比例する必要がある。図 6.42 から確認できるように PDE はほぼ線形であることがわかるが、実際には、ホール起源の増幅も考慮する必要がある。現在、ホール起源の増幅を明確に区別する具体的なモデルは確立していない。

次に、アフターパルス率が V_{over} の 2 乗に依存することについて考察する。アフターパルスは以下の過程により起きる。

1. アバランシェ増幅の結果生じたキャリアが半導体中の格子欠陥にトラップされる。
2. トラップされたキャリアが再放出される。
3. 再放出されたキャリアがアバランシェ増幅を起こす

上記の 1. は V_{over} に比例する。また、2. は V_{over} に大きくは依存しないと考えられる。3. はクロストークの考察と同様にやはりアバランシェ増幅を起こす確率 (ϵ_{Geiger}) が V_{over} に比例する必要があることを示している。

このように MPPC の内部現象については、未だ明らかになっていない部分も多い。また、更なる高性能化も可能であると考えられている。そのためにも MPPC の物理的性質を明かしていくことが強く望まれている。

第7章 結論

我々は、T2K 実験において用いる光検出器として、半導体光検出器の一種である Multi-Pixel Photon Counter(MPPC)を採用した。MPPC は実験における光検出器に対する要請である、磁場に対する耐性を持つこと、コンパクトであること、安価であること、かつ高い光子検出能力を持つことといった条件を満たしている。T2K 実験に向けて開発された MPPC は、 1.3×1.3 mm の光電面面積を持ち、 $50 \mu\text{m}$ のピッチで APD ピクセルが敷き詰められている。また、そのピクセル数は 667 ピクセルである。

T2K 実験における読み出しチャンネルは約 60000 に及ぶ。我々は、この中でも INGRID 検出器と FGD にインストールされる約 17500 個の MPPC の大量測定を行った。今回の大量測定では全ての MPPC において、その基礎特性であるゲイン、ブレイクダウン電圧、キャパシタンス、ノイズレート、クロストーク・アフターパルス率、光子検出効率を、15、20、25、の設定温度について測定した。その結果、ほぼ全ての MPPC が T2K 実験において用いられる性能を兼ね備えていることが明らかになった。大量測定中における故障率は 0.05% であり、極めて低いことも示された。

測定システムは恒温槽制御以外は自動化がなされ、また、64 個の MPPC の同時測定を可能にした。このシステムにより、約 6 カ月において、17500 個の MPPC を測定するという世界にも類を見ない短期間で大量測定を実現した。

なお、17500 個のデータという大きな統計を得たことにより、今までの測定から予測されていた各測定項目の温度依存性や V_{over} 依存性を裏付けることができた。ゲイン、クロストーク・アフターパルス率、光子検出効率は V_{over} に強く依存しており、また、有意な個体差は見られないとした。一方、ノイズレートは V_{over} にも依存するものの、温度依存性が高く、また 20% 強の大きな個体差を持つという結果を得た。

さらに、少量の MPPC の測定からは予測が困難であった各測定項目の V_{over} 依存性を求めることを実現した。その結果、クロストーク・アフターパルス率が V_{over} の二次関数として変化することが確認することができ、クロストーク及びアフターパルスの物理的な過程から、アバランシェが起きる確率の V_{over} 依存性について考察した。

T2K 実験において使用される予定の温度範囲において各 MPPC に負荷される電圧をそれぞれのブレイクダウン電圧を測定することにより、決定した。加えて、本測定結果は今後のシュミレーション等において MPPC の基本性能を示すパラメータとして使用することができる。

現在は、これらの MPPC は INGRID 検出器と FGD にインストールされ、2009 年 4 月の T2K 実験開始に向けて、その動作確認および、MPPC を用いた検出器テストがなされている。

謝辞

大学院の2年間において、T2K 実験という非常に大規模な実験に携わる機会を与えてくれ、有難う御座いました。

修士論文執筆に当たっては、中家剛准教授と横山将志助教の的確な指導に縁って、ここまで辿り着くことが出来たのだと思っています。非常に感謝しています。

新田さんや南野さんには、プログラミングについての相談や、MPPC の発送や管理など、いろいろお世話になりました。有難うございました。

五味さんには、素晴らしい実験システムを苦闘の末残して行って下さり感謝しています。稀に言う事を聞かなくなることが在りましたが、それがこのシステムの可愛らしいところでもありました。

また、測定シフトを手伝って戴いた方々の御蔭で、予定期間中に測定を終えることが出来たと思っています。ここに感謝の意を表します。

最後になりましたが、京都大学高エネルギー研究室の皆様、他に研究を通じてお世話になった方々、2年間本当に有難う御座いました。

付録 A 系統誤差の算出過程

ある 1 つの MPPC における 20 、1.4V における ADC 分布を用いて、系統誤差を評価した。

A.1 ゲイン

ゲインの誤差に関しては、以下の値のばらつきから計算した。また、ブレイクダウン電圧に関しては、ゲインの線形性のよさから、誤差が小さく、 $\pm 0.002V$ 程度である。

- Trip-t チップにおけるゲインのゆらぎ [14]... $\sim 4\%$
- ADC 分布の 0p.e. ピーク、1p.e. ピークのそれぞれにおけるフィッティング誤差... $\sim 1\%$
解析用アプリケーション Root のフィッティング結果による。

式 6.1 から ゲインのばらつきは $\sqrt{(0.04^2 + 0.01^2 + 0.01^2)} \simeq 0.042$ となる。

A.2 ノイズレート

ノイズレートの誤差に関しては、以下の値のばらつきから計算した。

- 光源無しときの 0p.e. イベント数 (式 (6.2) における $Noise_0$)... $\sim 2.1\%$

Root によって、積分値に対するそのフィット誤差を見積もった。 $Noise_0$ は 4405, その誤差 $\delta Noise_0$ は 91.86 であった。単純には、 $\delta Noise_0$ は、 $\sqrt{4405} \simeq 66$ の程度と考えられるが、実際の値は、これより大きくなっている。これは図 (6.1) から確認できるように 0p.e. ピークと 1p.e. ピークが重なることにより、ややフィッティングが乱れるためである。

- 温度変化による誤差... $\sim 3.0\%$

恒温槽の温度変化には図 (5.18) に示したように、設定温度に達した後でも、 ± 0.4 程度の小さな変化が見られる。この変化がノイズレートについてはその温度依存性の高さから測定誤差として観測される。ここで、6.5.4 節において求めたノイズレートの温度係数を用いた。すなわち、 $7.4\% / \times 0.4 \simeq 3.0\%$

ノイズレートの誤差を式 (6.2) から見積もる。

式 (6.2) を $Noise_0$ で微分することにより、

$$\begin{aligned}\delta(\text{ノイズレート}) &= \frac{\partial(\text{ノイズレート})}{\partial(Noise_0)} \delta(Noise_0) \\ &= -\frac{1}{GateWidth \times Noise_0} \times \delta(Noise_0)\end{aligned}\quad (A.1)$$

このとき、式 (6.2) より、

$$\frac{\delta(\text{ノイズレート})}{\text{ノイズレート}} = \frac{1}{\ln(Noise_0/TotalEvents)} \times \frac{\delta(Noise_0)}{Noise_0}\quad (A.2)$$

よって、3.0%の温度変化も考慮して、

$$\text{ノイズレートの誤差} = \sqrt{(0p.e. \text{ イベント数のばらつきによる誤差})^2 + (\text{温度変化による誤差})^2}$$

$$= \sqrt{\left\{ \frac{1}{\ln(Noise_0/TotalEvents)} \times \frac{d(Noise_0)}{Noise_0} \right\}^2 + 0.03^2}$$

$Noise_0 = 4405, TotalEvents = 8000, d(Noise_0)/Noise_0 = 2.1\%$ を代入して、

$$\simeq 4.6\% \quad (A.3)$$

A.3 クロストーク・アフターパルス率

クロストーク・アフターパルス率の誤差に関しては、以下の値のばらつきから計算した。

- 光源ありの時の 0p.e. イベント数 (以下における N_0) \cdots 2.6%
Root によるフィット誤差をもちいた。その結果、 $N_0 = 3483, \delta N_0 = 90.82$ であった。
- 光源ありの時の 1p.e. イベント数 (以下における N_1) \cdots 5.0%
同じく、Root によるフィット誤差を用いた。その結果、 $N_1 = 2331, \delta N_1 = 116.5$ であった。

式 (6.5) はポワソン分布を仮定して以下のように変形できる。以下の式においては、簡単のため、クロストーク・アフターパルス率を CT・AP と書く

$$CT \cdot AP = 1 - \frac{N_1}{-N_0 \ln\left(\frac{N_0}{8000}\right)} \quad (A.4)$$

このとき

$$\frac{\partial(CT \cdot AP)}{\partial N_0} = -\frac{N_1 \left\{ 1 + \ln\left(\frac{N_0}{8000}\right) \right\}}{\left\{ N_0 \ln\left(\frac{N_0}{8000}\right) \right\}^2} \quad (A.5)$$

$$\frac{\partial(CT \cdot AP)}{\partial N_1} = \frac{1}{N_0 \ln\left(\frac{N_0}{8000}\right)} \quad (\text{A.6})$$

これらを次式に用いる。

$$\delta(CT \cdot AP) = \sqrt{\left\{ \frac{\partial(CT \cdot AP)}{\partial N_0} \delta N_0 \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial(CT \cdot AP)}{\partial N_1} \delta N_1 \right\}^2} \quad (\text{A.7})$$

$N_0 = 3483, \delta N_0 = 90.82, N_1 = 2331, \delta N_1 = 116.5$ を代入して、

$$\delta(CT \cdot AP) = 0.04045 \quad (\text{A.8})$$

また、このときクロストーク・アフターパルス率は 0.1952 であり、

$$\delta(CT \cdot AP)/(CT \cdot AP) = 0.04045/0.1952 \simeq 21\% \quad (\text{A.9})$$

A.4 relative PDE

relative PDE の誤差に関しては、以下の値のばらつきから計算した。

- 光源ありの時の 0p.e. に相当するイベント数 (N_0) … 2.6%
Root によるフィット誤差を用いており、 $N_0 = 3483, \delta N_0 = 90.82$ であった。
- 光量モニター用 MPPC が接続されているファイバーに対する各ファイバーでの獲得光量比の誤差 (以下で示す。) … ~ 18%
- 測定環境の再現性 (以下で示す。) … ~ 8.9%

A.4.1 relative PDE の系統誤差について

本編で述べたようにファイバーは全てで 90 本存在し、90 番目のファイバーは光量モニタリング用 MPPC に接続されている。90 番目のファイバーに対する各ファイバーでの獲得光量比を、同一の MPPC を用い各ファイバーにおいて観測された光量を 90 番目のファイバーで観測された光量によって割ることで見積もった。この作業を連続して 2 回行った結果を示す。図 (A.1) が 1 回目の結果、図 (A.2) が 2 回目の結果であり、横軸がファイバーの番号、縦軸が 90 番目のファイバーに対する各ファイバーでの獲得光量比である。また、図 (A.3) は、90 番目のファイバーに対する各ファイバーでの獲得光量比について、横軸に 1 回目の結果、縦軸に 2 回目の結果を示している。光量分布が常に一定であり、1 回目の結果と 2 回目の結果に完全な相関があるとする、このグラフは原点を通り、傾きは 1 になるはずである。しかし、実際には相関は見えてとれず、このグラフの広がり程度、獲得光量比に誤差があることがわかる。

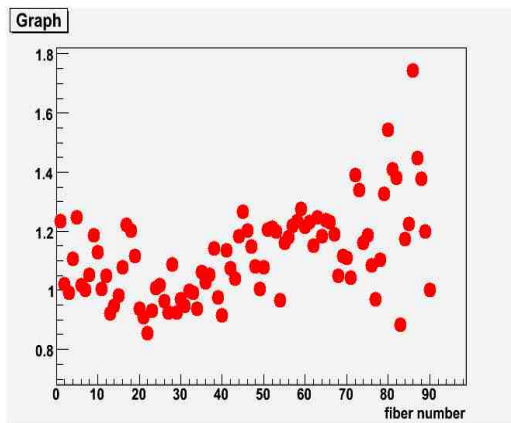


図 A.1: ファイバーファクターの測定 (1回目)

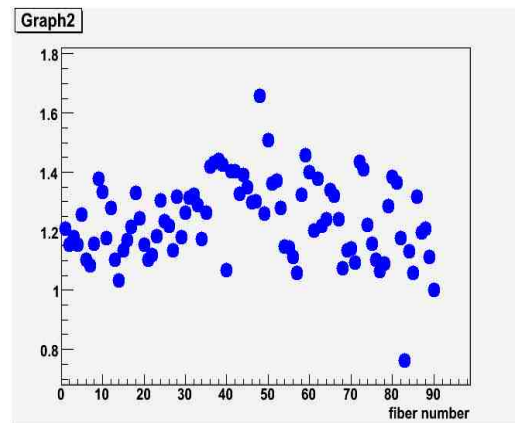


図 A.2: ファイバーファクターの測定 (2回目)

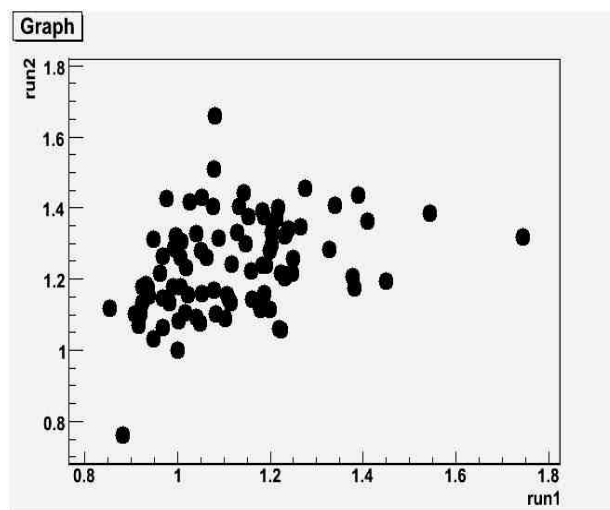


図 A.3: ファイバーファクターの測定 (1回目と2回目の相関)

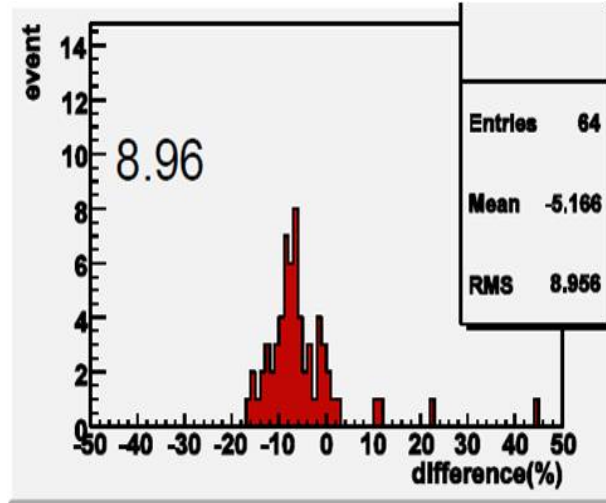


図 A.4: 測定状況の再現性

また、ファイバーとMPPCを抜き差しすることで、測定毎にそれぞれのファイバーの曲率が変わることやMPPCとファイバーとの間隔が変化することにより、最終的にMPPCに入射する光量が変化することがわかった。図(A.4)は、64個のMPPCの獲得光量を求めたあとに、全てのファイバーをMPPCからいったん取り外し、ファイバーの湾曲を取り除いたあとに、再びそれらの64個のMPPCの獲得光量を求め、その獲得光量の変化率をヒストグラムにしたものである。その結果、8.9%程度のばらつきが再現性の面から生じることがわかった。

式(6.7)と式(6.8)より、 N_0 のばらつきによるrelative PDEへの影響は、式(6.8)における $P(0)$ が $N_0/8000$ であることを考慮して、以下のように計算できる。ここで、8000は全イベント数である。

$$\begin{aligned} \frac{\delta(\text{relativePDE})}{\text{relativePDE}} &= \frac{\delta(\text{p.e.}(MPPC))}{\text{p.e.}(MPPC)} \\ &= \frac{\delta N_0}{N_0 \ln\left(\frac{N_0}{8000}\right)} \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

ここで、 $N_0 = 3483, \delta N_0 = 90.82$ を代入して、

$$= -3.1\% \quad (\text{A.11})$$

これと、光量モニター用MPPCが接続されているファイバーに対する各ファイバーでの獲得光量比の誤差18%と、測定環境の再現性による誤差8.9%を用いる。

$$\text{relativePDEの誤差} = \sqrt{0.031^2 + 0.18^2 + 0.089^2} \approx 20\% \quad (\text{A.12})$$

付録B Trip-tの読み出し

この章においては、Trip-tの読み出しについて述べる。

B.1 Trip-tの読み出しシーケンス

図(B.1)は、Trip-tの読み出しシーケンスである。以下でその流れについて述べる。

1. 図の最上段は、MPPCの生信号であり、このシグナルは“PreAmp reset”が出力されている間、アンプによって増幅される。また、同時にディスクリミネータシグナルを得る。
2. 増幅されたシグナルは積分され“PreAmp Output”として出力される。このシグナルがMPPCからのシグナルの電荷情報を示す。
3. 対応するパイプラインの深さを示す“Pipeline clock”が来るのを待つ。この際MPPCからのシグナルの時間情報を取得する。
4. “mux clock”をトリガーとして、パイプラインに蓄積されたシグナルがマルチプレクサによりシリアル化される。
5. 最終的にA_OUT(電荷情報),T_OUT(時間情報),D_OUT(ディスクリミネータ信号)が出力される。

B.2 Trip-tのA_OUTシグナル

図(B.2)は、Trip-tによってシリアル化されたシグナルをオシロスコープでみたものである。上から順にD_OUTシグナル、2枚のTrip-tからのA_OUTシグナルである。A_OUTシグナルは対応したD_OUTに同期している。このようにMPPCからのシグナルはシリアル化されることになり、VMEモジュール内のDAQボードによりデジタル変換される。

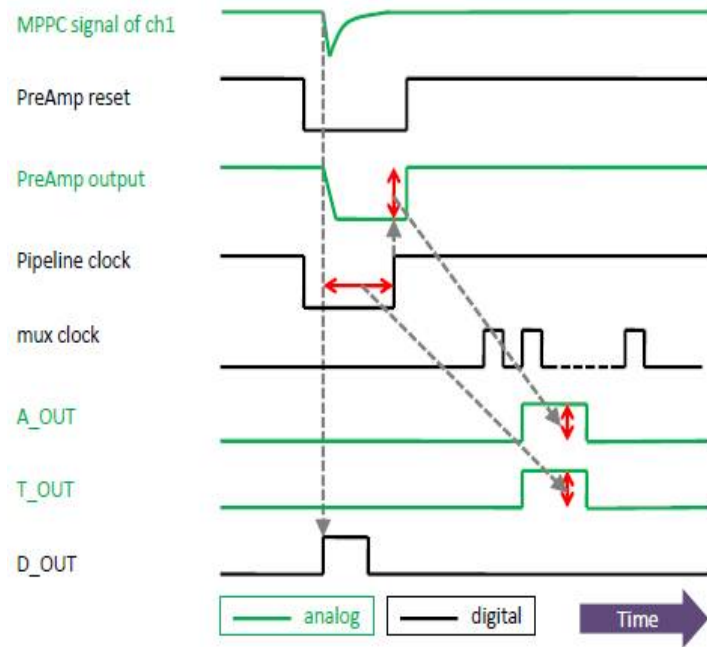


図 B.1: Trip-t の読み出しシーケンス

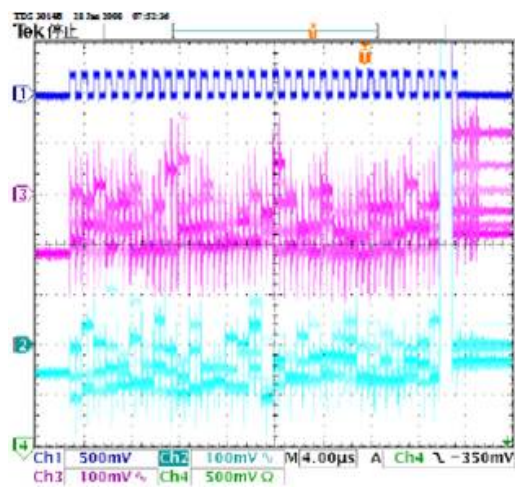


図 B.2: 2 枚の Trip-t の出力 A_OUT からのシグナル

付録C Trip-tボード回路図

図(C.1)~(C.5)に Trip-t ボードの回路図を示す。ここで、各図は順に、Trip-t、制御信号、負電圧の供給、MPPC シグナルの入力、DAQ と正電圧の供給周りの回路を示している。このボードを用いるに当たり、3つのジャンパーを取り付け、5つの可変抵抗の値を適切に決める必要がある。

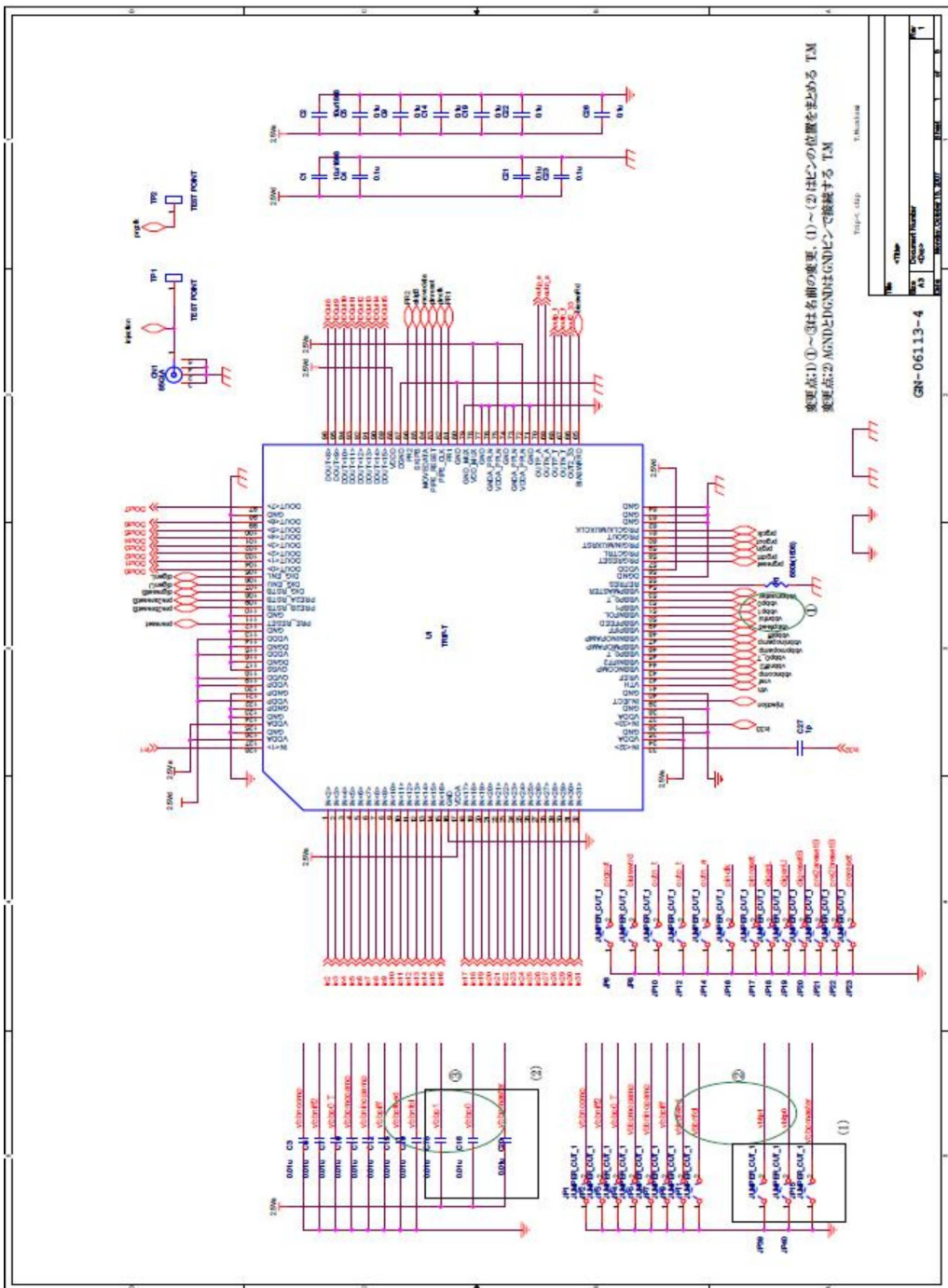
図(C.2)の制御信号の入力部分には、VME トリガー用と LED トリガー用の2つのジャンパーを取り付ける必要がある。それぞれは LabView もしくは VME の PPG(Pulse Pattern Generator) のどちらによって Trip-t の制御を行うかを決めるためのものである。今回は LabView によって両方のトリガーを制御しているので、対応するチャンネルである J6(VME トリガー)、J7(LED トリガー)にジャンパーを設置している。

また、図(C.5)の正電圧の供給部分では、電圧の正電圧供給源の選択のためのジャンパーを1つ取り付ける必要がある。正電圧の供給源としては、外部電源と VME モジュールの2通りが可能であり、それぞれに対応した位置にジャンパーを取り付ける必要がある。今回は外部電源を用いているので、これに対応したチャンネル J19 にジャンパーを設置した。

ここまでが、3つのジャンパーに関する説明である。次に、5つの可変抵抗について述べる。

図(C.2)には、VR1,VR2,VR3,VR4の4つの可変抵抗がある。これらは、Trip-t に与えられる制御用パラメータである“vref”と“vth”を決めるためのものであり、VR1,VR3が“vref”,VR2,VR4が“vth”に対応している。今回は、“vref”が2.5V,“vth”が1.5Vとなるように可変抵抗の値を決めている。仮に設定値が不適切であると、Trip-t が制御信号によってコントロールできなくなる。

最後に、図(C.3)のVR7について述べる。今回のセットアップでは、Trip-t シグナルの+1Vのオフセットをキャンセルするために、外部電源より供給された±5Vから+1Vを作り出し、VME モジュールに負荷している。この電圧はVR7によって変更可能である。

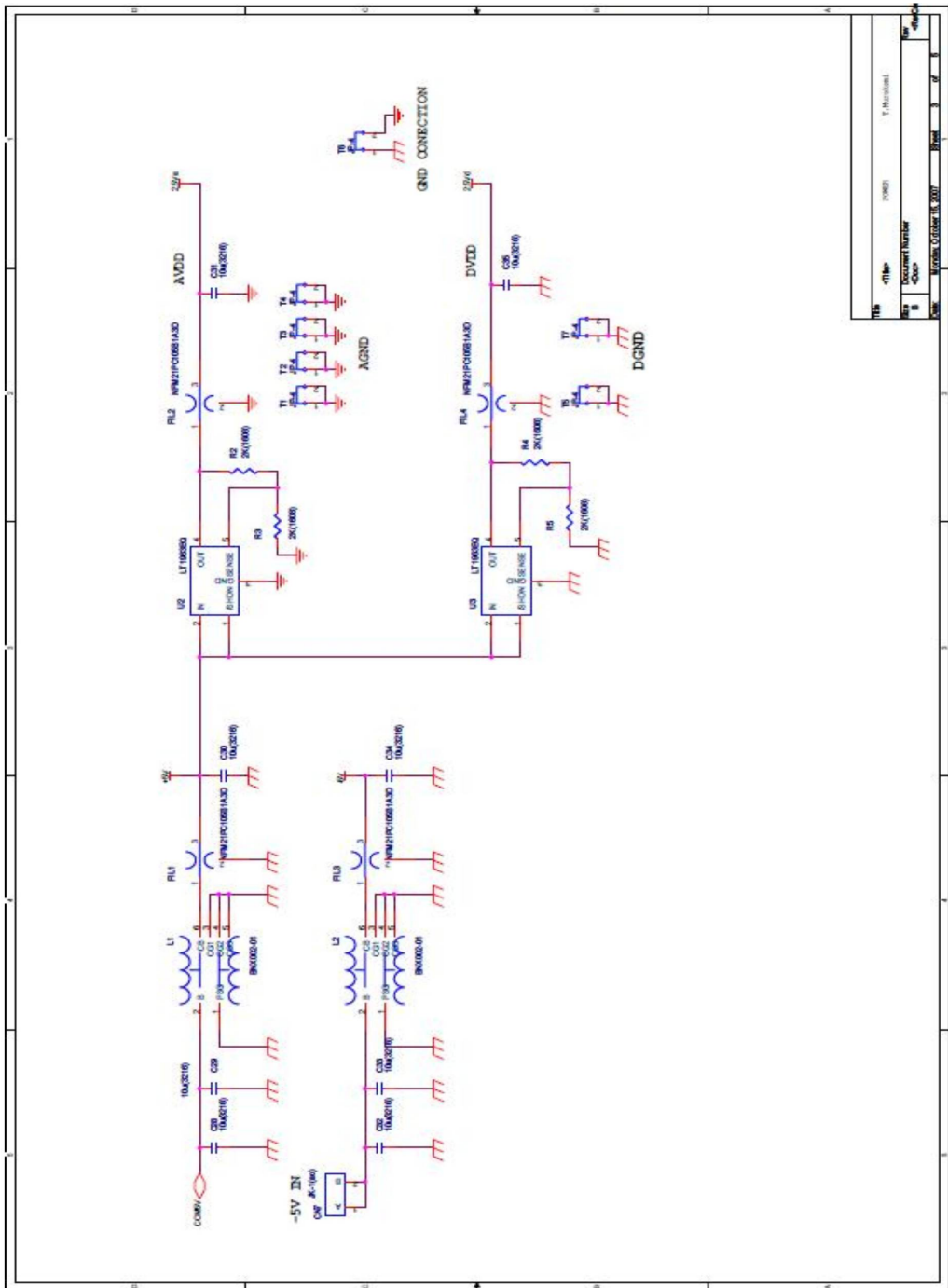


変更点:①~③は名前の変更。(1)~(2)はピン位置をまとめる TM
変更点:② AGNDとPGNDはGNDピンで接続する TM

REV	010	DATE	2011.05.11
DESIGNER	Y. KAWA	CHECKER	Y. KAWA
DATE	2011.05.11	TIME	14:00

GN-06113-4

図 C.1: Trip-t ボード回路図 1



File	TRIP.T	Project	Trip-t Board
Sheet	1	Document Number	4000
Rev	1	Date	2007.10.27
Author		Drawn	
Checked		Appr	

図 C.3: Trip-t ボード回路図 3

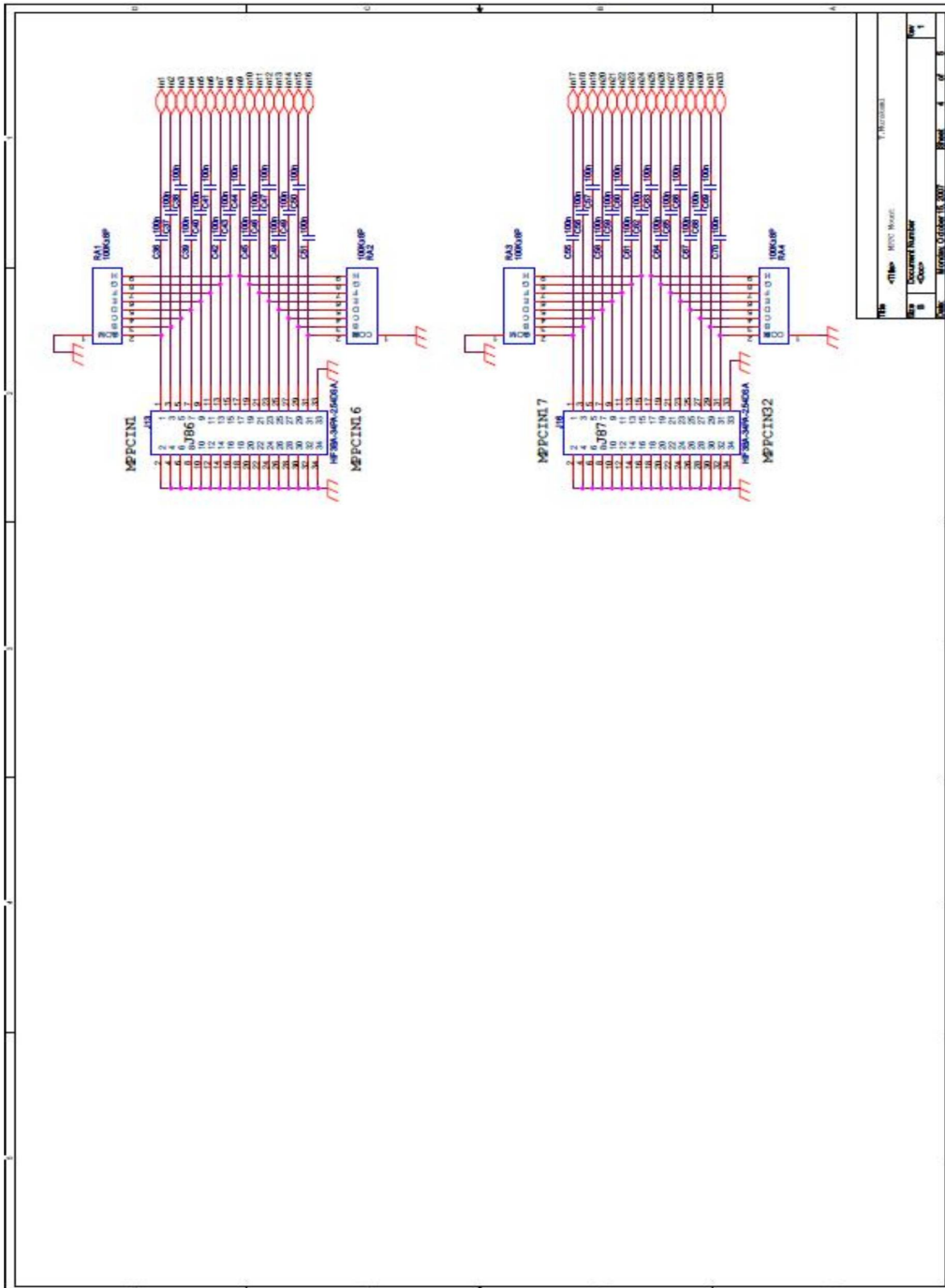


図 C.4: Trip-t ボード回路図 4

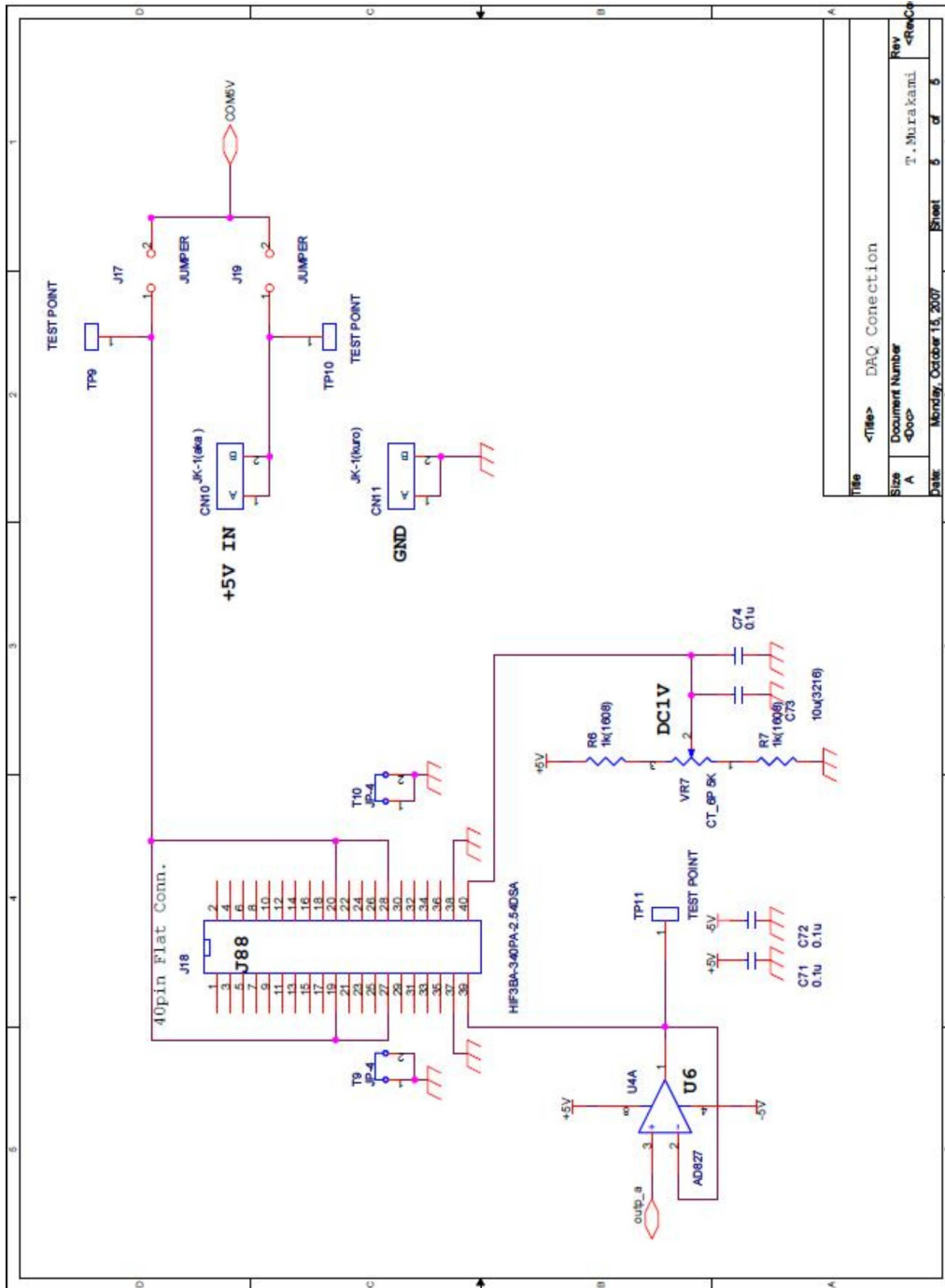


図 C.5: Trip-t ボード回路図 5

参考文献

- [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] P. Adamson [MINOS Collaboration], Measurement of Neutrino Oscillations with the MINOS Detectors in the NuMI Beam, *arXiv:hep-ex/0806.2237*, 2008
- [4] S. Fukuda et al. [Super-Kamiokande Collaboration], Determination of solar neutrino oscillation parameters using 1496 days of super-kamiokande-i data, *Phys. Lett. B* 539, 179-187, 2002
- [5] S. N. Ahmed et al. [SNO Collaboration], Measurement of the total active 8b 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] Yury Kudendo [T2K Collaboration], The near neutrino detector for the T2K experiment, *arXiv:0805.0411v1*
- [8] 川向 裕之、T2K 長基線ニュートリノ振動実験ニュートリノビームモニター INGRID に用いるシンチレータと光子検出器 MPPC の性能評価、修士論文、京都大学、2008
- [9] Fabrice Retière. Using MPPCs for T2K Fine Grain Detector. Presented at PD07, Kobe, Japan, 27-29 Jun 2007.
- [10] O. Mineev et al., Scintillator counters with multi-pixel avalanche photodiode read-out for the ND280 detector of the T2K experiment, *arXiv:physics/0606037*, 2006
- [11] 浜松ホトニクス社 MPPC カタログ
- [12] 音野 瑛俊、ガイガーモードで駆動するピクセル化された新形半導体光検出器の基礎特性に関する研究、修士論文、東京大学素粒子物理国際研究センター、2008
- [13] 浜松ホトニクス社 光電子増倍管 R6427 カタログ

- [14] 田口 誠、Development of Multi-Pixel Photon Counters and readout electronics, 修士論文、京都大学、2007
- [15] 五味 慎一、半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築、修士論文、京都大学、2008
- [16] NICHIA Co., NSBP500S カタログ
- [17] Kuraray Co., Scintillator Fiber Products, 1994