

平成 23 年度 修士論文

Belle II 実験 TOP カウンター用 MCP-PMT の
性能測定システムの構築

名古屋大学大学院 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻
高エネルギー素粒子物理学研究室 (N 研)
学籍番号 261001302

武市 秀樹

2012.1 提出

概要

2015年に始まる Belle II 実験は電子陽電子衝突型加速器を用いて生成した B 中間子の稀崩壊現象の精密測定を行う。 $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の世界最高ルミノシティにより素粒子標準理論を越える物理の探索を目的とする。 Belle II 実験の K/ 粒子識別装置 TOP (Time Of Propagation) カウンターは石英輻射体と光検出器 MCP-PMT (Micro Channel Plate-Photo Multiplier Tube) から構成され、識別効率 95% 以上、誤識別率 5% 以下を目指している。 MCP-PMT には一光子検出が可能、50ps 以内の時間分解能、量子効率 (QE) が 24% 以上など高い性能が要求される。

現在 TOP カウンターの製作のため MCP-PMT の量産が始まっている。3年弱で MCP-PMT を 550 個揃える予定であり、それらの選別が必須である。また量産品の性能を生産にフィードバックし量産を円滑に進める仕組み、及び MCP-PMT の較正を行う仕組みが必要である。そこで本研究では、量産品の性能測定システムを構築することを目的とする。本システムでは 24 時間以内に MCP-PMT 2 個が測定できる速度を要求した。また以下の測定精度を要求した。

・量子効率	相対的に $\pm 5\%$
・ゲイン	$\pm 10\%$
・時間分解能	$\pm 5\text{ps}$
・ダークレート	$\pm 10\%$
・収集効率	相対的に $\pm 5\%$

これ等を基に QE 自動測定システムと、ゲイン、時間分解能、ダークレート、収集効率を測定する一光子特性自動測定システムを構築した。また完成したシステムで初期量産品の品質確認を実際に行った。

QE 自動測定システムでは照射光に対する出力電流から QE を算出する仕組みを構築した。1.7% 以内の精度で検出効率の分かっているフォトダイオードでの光量把握により 2.0% の QE 測定精度を実現し、かつ全自動化により一個の MCP-PMT あたり 9 時間半の測定を可能にした。また一光子特性自動測定システムでは時間広がり 17ps のレーザー光を一光子状態に減光して MCP-PMT に照射したときの出力信号から各特性を算出する仕組みを構築した。MCP-PMT 一個の全 16 チャンネルの測定を連続で自動に行うことで MCP-PMT 一個あたり 6 時間での測定を可能とした。QE 自動測定システムとの同時稼働により 24 時間で MCP-PMT 2 個以上の測定が可能である。また精度は時間分解能 $\pm 2\text{ps}$ 、ダークレート $\pm 5\%$ での測定を可能とした。一方でゲインの測定精度は課題が残る。また収集効率は絶対値精度に課題があるが、5% 以内の精度で量産品同士の相対値測定を可能にし、約 5% の精度での絶対値測定の実現性を示した。また初期量産品の測定から低量子効率や放電の問題を明らかにし生産方法に見直しを求めた。

本研究の成果は、MCP-PMT 量産品の性能測定システムの構築、および初期量産品に対する性能評価を実施し今後の量産の課題を明確にしたことである。

目次

第 1 章 Belle II 実験 TOP カウンター	6
1.1 Belle 実験から Belle II 実験へ	6
1.2 TOP カウンター	7
1.2.1 構造・原理	7
1.2.2 TOP カウンターで扱う光の波長領域	9
1.2.3 TOP の性能を決める特性	11
1.2.4 MCP-PMT への要求	11
1.2.5 本研究の目的	12
第 2 章 MCP-PMT 量産と大量測定システム	13
2.1 MCP-PMT の構造・光検出原理	13
2.2 MCP-PMT の諸特性	15
2.2.1 QE(Quantum Efficiency 量子効率)	15
2.2.2 CE(Collection Efficiency 収集効率)	16
2.2.3 TTS(Transit Time Spread)	16
2.2.4 ゲイン	17
2.2.5 ダークレート	18
2.3 量産	19
2.4 量産品自動測定システム	19
2.4.1 選別基準	19
2.4.2 測定精度	20
2.4.3 測定速度	21
2.4.4 測定システム	21
第 3 章 QE 自動測定システム	23
3.1 システムの構想	23
3.1.1 測定手法	23
3.1.2 測定装置	24
3.1.3 従来システムの問題点と新システムの改良点	26
3.1.4 新システムの導入	27
3.1.5 組み上げたシステム	31
3.2 QE 自動測定システムでの測定	32
3.2.1 測定手順	32
3.2.2 測定結果	32

3.3	QE 自動測定システムの性能の確認	34
3.3.1	測定速度の実測	35
3.3.2	測定の不確かさの見積もり	35
3.3.3	新旧システムの比較とまとめ	37
3.3.4	浜松ホトニクス QE 測定結果との比較	38
第 4 章	一光子特性測定システム	40
4.1	システムの構想	40
4.1.1	測定手法	40
4.1.2	測定装置	41
4.1.3	従来のシステムの問題点と新システムの課題	42
4.1.4	新システムの導入	43
4.1.5	組み上げたシステム	47
4.2	一光子特性自動測定システムでの測定	48
4.2.1	測定手順	48
4.2.2	各特性の算出	48
4.3	一光子特性自動測定システムの性能の確認	54
4.3.1	測定時間の実測	55
4.3.2	測定精度の見積もり	55
4.3.3	新旧システムの比較とまとめ	59
4.3.4	浜松ホトニクスの測定結果との比較	60
第 5 章	初期量産品の測定	63
5.1	QE 測定結果	63
5.2	ゲインとダークレートの測定結果	66
5.3	TTS 測定結果	68
5.4	量産品間の相対 CE の測定結果	68
5.5	初期量産品測定結果まとめ	69
第 6 章	結論	71

目次

1.1	Belle 検出器と Belle II 検出器の衝突点近辺の断面図	7
1.2	TOP カウンターの構造	8
1.3	K/ 粒子のチェレンコフ光の伝播の様子	9
1.4	リングイメージ	9
1.5	チェレンコフ光の波長分布	10
1.6	波長カットフィルターの外部透過率波長依存性	10
2.1	MCP-PMT 写真	13
2.2	MCP-PMT 内部構造	13
2.3	最終仕様品 MCP-PMT の外形寸法図	14
2.4	MCP-PMT からの出力信号	15
2.5	量産前最終仕様試作品の QE の波長分布	15
2.6	MCP-PMT で検出される光の波長分布	16
2.7	MCP-PMT のゲイン及びダークレートの HV 依存性	18
3.1	QE 測定セットアップ	23
3.2	QE 測定システムの装置イメージ図	24
3.3	キセノンランプの光量の波長分布 (浜松ホトニクス社カタログより)	25
3.4	キセノンランプと分光器の写真	26
3.5	可動フィルタホルダユニットの写真	27
3.6	回路自動切換えスイッチの写真	28
3.7	フォトダイオードの写真	29
3.8	フォトダイオードの QE 波長分布	29
3.9	フォトダイオードの相対 QE 面一様性 (Z 軸は任意)	29
3.10	QE 測定用治具概念	30
3.11	アライメントずれていた場合のイメージ	30
3.12	治具の写真	31
3.13	QE 測定システムの装置写真	31
3.14	QE 測定の流れ	32
3.15	MCP-PMT の出力電流値の波長分布	33
3.16	フォトダイオードの電流値の波長分布	33
3.17	JT0233 の光電面上での QE 分布	34
3.18	MCP-PMT の光電面平均 QE の波長分布	34
3.19	キセノンランプの安定性	35

3.20	MCP-PMT の電流値の波長ごとのふらつき	36
3.21	MCP-PMT の QE 測定における統計的不確かさの波長分布	36
3.22	QE 測定再現性の確認	37
3.23	浜松ホトニクスでの QE 測定との比較	39
4.1	一光子測定セットアップ	40
4.2	一光子特性測定システムの装置イメージ	41
4.3	HV プリリーダー写真	42
4.4	HV サプライヤーの写真	43
4.5	16 チャンネル分のアッテネーターとアンプの写真	44
4.6	回路のゲイン測定	44
4.7	アッテネータの減衰率比	45
4.8	16 ディバイダーの分割比	45
4.9	16 チャンネルディバイダーからの信号をプリリーダーに接続した写真	45
4.10	回路ゲイン補正の結果	46
4.11	CE 測定機能の導入イメージ	47
4.12	一光子特性測定システム全体写真	47
4.13	一光子特性測定の流れ	48
4.14	MCP-PMT の測定で得た ADC ヒストグラム	49
4.15	回路のゲインを補正したゲインヒストグラム	49
4.16	測定で得た MCP-PMT の TDC ヒストグラム	50
4.17	タイムウォークの原理	50
4.18	TDC:ADC 分布	50
4.19	タイムウォーク補正	51
4.20	タイムウォーク補正後の TDC:ADC 分布	51
4.21	ダブルガウシアンでのフィッティングの様子	52
4.22	光電子の後方散乱のイメージ	52
4.23	ダークレート算出方法	53
4.24	レファレンス PMT の TDC ヒストグラム	54
4.25	ゲイン再現性の確認	55
4.26	アンプのゲインの周波数特性	56
4.27	TTS 再現性の確認	57
4.28	CE 再現性の確認	58
4.29	CE のゲイン依存性の確認	59
4.30	ゲイン測定 of 浜松ホトニクスとの比較	61
4.31	ダーク測定 of 浜松ホトニクスとの比較	62
5.1	量産品 MCP-PMT の光電面平均 QE の波長分布	64
5.2	量産品 PMT の QE の光電面位置情報	65
5.3	ピーク波長での光電面平均 QE の遷移	65
5.4	ID:JT0164 の 5HV 分のゲインのデータ	66

5.5	ID:JT0164 の 5HV 分のダークレートのデータ	66
5.6	動作電圧でのチャンネル別のゲイン	67
5.7	動作電圧での MCP-PMT 別ゲイン	67
5.8	動作電圧でのチャンネル別のダークレート	67
5.9	動作電圧での MCP-PMT 別ダークレート	67
5.10	動作電圧でのチャンネル別の TTS	68
5.11	動作電圧での MCP-PMT 別の TTS	68
5.12	量産品間の相対 CE	69

第1章 Belle II実験TOPカウンター

私達は Belle 実験をアップグレードさせた Belle II 実験に向けて、その K/ 粒子識別装置である TOP(Time Of Propagation) カウンターの開発研究を行なってきた。TOP カウンターは実機の製造段階に入り、その光検出器である MCP-PMT(Micro Channel Plate Photo Multiplier Tube) は量産体制に入った。この章では本研究の目的である量産品 MCP-PMT の測定システムの構築の背景として Belle II 実験及び TOP カウンターについて紹介し、さらに、MCP-PMT への要求について述べる。

1.1 Belle 実験から Belle II 実験へ

Belle 実験は茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構(KEK)で非対称エネルギー電子・陽電子衝突型加速器を用いて、年間 10^8 個という大量の B 中間子対を生成する実験である。B 中間子の崩壊過程を精密に測定することで CP 対称性の破れを検証することを目的として 1999 年に実験を開始した。その衝突点には Belle 検出器と呼ばれる検出器群があり、B 中間子からの崩壊粒子の精密測定を行う。

$B \rightarrow \rho\gamma$, $B \rightarrow \pi\pi$ 崩壊などの稀崩壊事象を精密に調べることで標準理論を越えた新しい物理の探索を行なうことを目的として、2015 年からさらにルミノシティを Belle 実験の 40 倍の $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に増強させた Belle II 実験を開始する予定である。現在は Belle 実験は運転を停止し、今後 Belle II 実験に向けて新しい検出器や加速器などの建設が行われる段階にある。

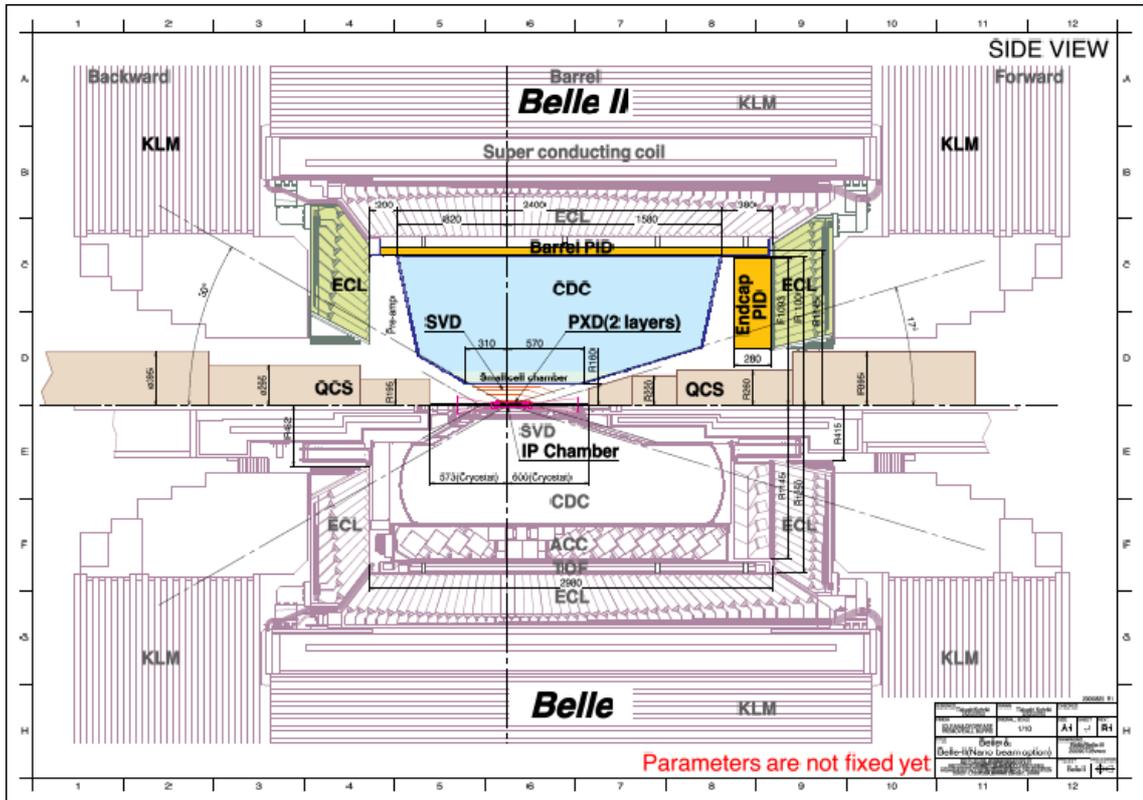


図. 1.1: Belle 検出器と Belle II 検出器の衝突点近辺の断面図。上側が Belle II 検出器で下側が Belle 検出器。Belle II 実験では中央上付近に黄色く描かれたバレル PID の部分に新たに TOP カウンターを搭載する。

1.2 TOPカウンター

TOPカウンターは Belle II 実験の K/\bar{K} 識別を行う検出器である。具体的には Belle II への移行に伴って $3\text{GeV}/c$ の領域において K/\bar{K} 識別効率 95% 以上、誤識別率を 5% 以下に向上させることを目指している。またそのシンプルな構造から体積が小さく、スペースや物質量の削減の利点がある。

1.2.1 構造・原理

TOPカウンターは Belle II の衝突点から 1180mm の距離で衝突点を円筒形に囲むように 16 台設置される (図 1.1)。一台の TOPカウンターは主に輻射体である石英と 32 個の光検出器から構成される (図 1.2)。検出器の大きさは全体で長さ約 3m、幅約 45cm 厚み (石英のみ) 2cm である。

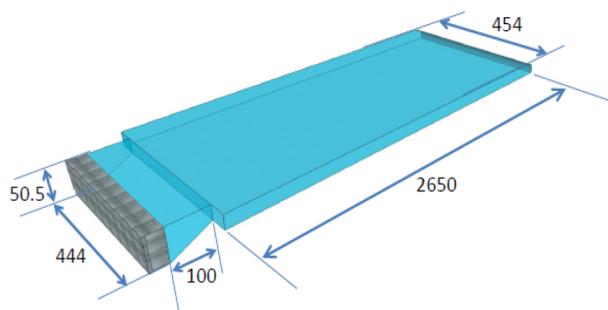


図. 1.2: TOP カウンターの構造 TOP カウンター 1 台は青く板状に描かれた石英板と黒く描かれた MCP-PMT32 個から構成される。石英板の厚みは 2cm である

次に検出原理を説明する。まず、衝突点からの荷電粒子は TOP カウンターの輻射体を通過する。その際荷電粒子の速度が輻射体中の光速を越えると、チェレンコフ光が円錐状に放出される。放出されたチェレンコフ光は石英輻射体中を伝播し MCP-PMT で検出される。TOP カウンターでは光子が検出された MCP-PMT のチャンネル位置情報に加えて、 K/π 粒子が衝突点から石英輻射体を通過するまでの時間 (TOF : Time Of Flight) と輻射体で発生したチェレンコフ光が MCP-PMT まで伝播する時間 (TOP : Time Of Propagation) を合わせた時間情報を記録できる。円錐状にひろがるチェレンコフ光の開き角を θ_c 、輻射体の屈折率を n とした時 ($n = 1.47$)、荷電粒子の相対論的速度 β との間には、

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (1.1)$$

が成り立つ。TOP カウンターではこの速度によるチェレンコフ光開き角の差を利用して K/π の粒子選別を行う。 K 粒子と π 粒子が TOP カウンターの同じ位置を同じ角度で同じ運動量を持って通過した時それらのチェレンコフ光の開き角に差が生まれる。図 1.3 に TOP カウンターにおいて K 粒子と π 粒子のチェレンコ光が石英中を伝播する様子を示した。

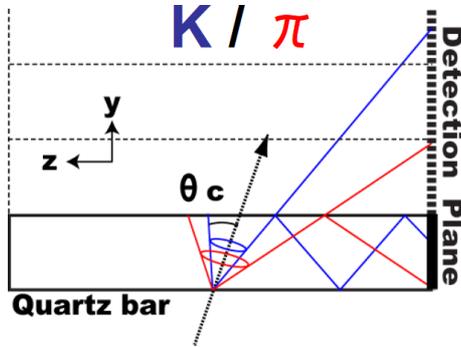


図. 1.3: K/ π 粒子のチェレンコフ光の伝播の様子。黒の実線で描かれた石英板に黒の矢印の方向に K/ π 粒子が通過したときのチェレンコフ光の伝播光路の様子。石英の右端までの光路差を表す。上部の破線は光子が石英板の表面で反射した分だけ石英を展開させて考えた様子を表している。

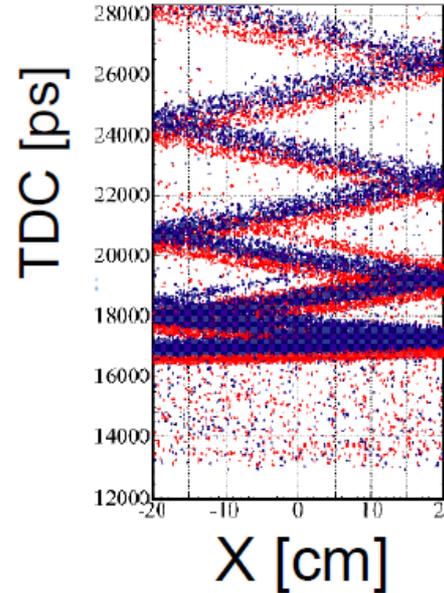


図. 1.4: リングイメージ

石英輻射体を K/ π 粒子が通過した際のチェレンコフ光の様子。横軸に石英板の幅方向の検出位置を縦軸に検出時間をとる。赤が π 粒子青が K 粒子である。

開き角が異なると同じ点を入射した粒子によるチェレンコフ光でも光検出器までの光路が変わり検出時間に差が生まれる。チェレンコフ光の検出位置を横軸に、検出時間を縦軸にとると、円錐状に広がったチェレンコフ光は図 1.4 のような特徴的なリングイメージを作る。イメージが折れ曲がりを繰り返すのは石英の側面で反射を繰り返した結果である。図 1.4 を見ると TDC=16000ps 付近に分布する光子は K/ π の時間差が最も小さい。これらは K/ π 粒子が輻射体を通過したとき一番最初に MCP-PMT に到達する光子であり 3GeV/c の領域で K/ π の検出時間差 (= Δ TOF+ Δ TOP) が 60ps ~ 180ps と分かっている。TOP カウンターではこの時間差を読み取らねばならない。また光子が MCP-PMT までの到達し検出される数は 20 ~ 30 個である。

1.2.2 TOP カウンターで扱う光の波長領域

TOP カウンターで発生する cherenkov 光は波長分布は式 1.2 で表される。

$$\frac{dN}{dL} = 2\pi Z^2 \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \quad (1.2)$$

- N : 発生光子数
 Z : 荷電粒子の電荷
 α : 微細構造定数
 L : 粒子の通過する輻射体の距離 [m]

この式 1.2 から計算した波長分布を図 1.5 に示す。

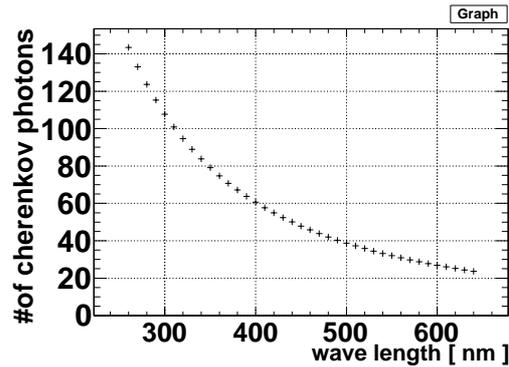


図. 1.5: チェレンコフ光の波長分布

さらに TOP カウンターには波長分散効果の対策として MCP-PMT の光電面と石英との間に波長 340nm 以下の光をカットする波長カットフィルター (IHU340) を挿入する。この波長カットフィルターの外部透過率波長分布を図 1.6 に示す。

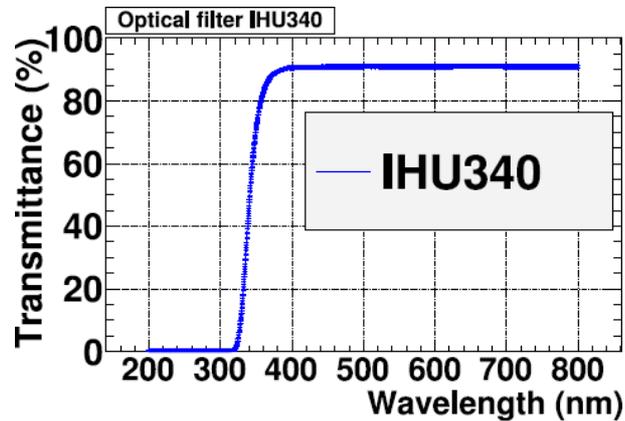


図. 1.6: 波長カットフィルターの外部透過率波長依存性

図 1.5 と図 1.6 から MCP-PMT に届く光の範囲は 340nm から 600nm ~ 700nm であると分かる。MCP-PMT で検出される光の波長分布についてさらに詳しく第 2 章で述べる。

1.2.3 TOP の性能を決める特性

これまでの研究から TOP カウンターの識別能力は以下の式に近似出来る事が分かっている。

$$S = \frac{\Delta TOP + \Delta TOF}{\sigma_{top}} \sqrt{N_\gamma} \quad (1.3)$$

σ_{top} ; 一光子状態での TOP カウンター時間分解能

N_γ ; PMT の検出光子数

ΔTOP ; 石英中での π/K 伝播時間差

ΔTOF ; TOP カウンターへの π/K 飛行時間差

3Gev/c の領域で $S=4$ という値を目標値としている。ここで $\Delta TOP + \Delta TOF$ は粒子の運動で決まる。式 1.3 から TOP カウンターの性能には時間分解能と検出光子数が重要であることが分かる。TOP カウンター全体の時間分解能は主にチェレンコフ光の波長分散効果と MCP-PMT とエレキの時間分解能から影響を受ける。波長分散効果とはチェレンコフ光が波長の広がりを持つために波長に依存した伝播速度(群速度)の差が広がる現象である。波長分散効果による MCP-PMT までの到達時間の広がり、光子の伝播距離によるが、平均的に 70ps 程である。MCP-PMT の時間分解能はこれに比べて十分に小さいことが望まれる。一方、検出光子数は石英の透過率(約 99%/m)と MCP-PMT の光検出効率に關係する。光検出効率とは光電面に光が当たったときに電気信号として読み出される確率であり代表的に 16~17% であることが知られている。光検出効率は QE(Quantum Efficiency 量子効率)と CE(Collection Efficiency 収集効率)の積で表される。QE とは PMT の光電面上に光子があたった時に光電子を放出する確率であり、CE とは光電面から放出された光電子が増幅過程を経てアノードから電気信号として読み出される確率である。光検出効率を P.D.E(Photo-Detection-Efficiency) で表すと、これ等の關係は式 1.4 の様に表される。

$$P.D.E = QE \times CE \quad (1.4)$$

以上から MCP-PMT の時間分解能と QE と CE は TOP の性能に影響を与える重要な性能であることが分かる。

1.2.4 MCP-PMT への要求

MCP-PMT には表 1.1 の性能が要求される。

表. 1.1: MCP-PMT への要求

特性	要求性能	特性	要求性能
TTS(Transit Time Spread)	< 50ps	QE(量子効率)	>24%(波長 360nm)
ゲイン	$\sim 2 \times 10^6$	CE(収集効率)	$\sim 55\%$
寿命	>10 年 (Belle II 環境下)	ダークレート	< 100kHz
		磁場中耐性	1.5T 磁場中操作可能

TTS(Transit Time Spread) は平均的な波長分散効果による時間ふらつきよりも小さい 50ps 以下を要求する。また QE(Quantum Efficiency 量子効率) はその性能が最も大きくなる 360nm 波長で 28% を目標とし、最低 24% 以上を要求する。CE(Collection Efficiency 収集効率) は 55% 程度であること、ゲインは一光子検出が可能な大きさとして 2×10^6 程度であることを要求する。またダークレートは TOP カウンターの運用上問題となる約 1MHz よりも十分小さい量として 100kHz を要求する。また、Belle II 環境下での動作を考え、1.5T の磁場中で動作可能であることが求められる。さらに 10 年以上の安定して動作すること求められる。

1.2.5 本研究の目的

現在 TOP カウンターは開発から製作段階に入り、MCP-PMT は量産が始まった。量産では 3 年弱で全部で 550 個の PMT を揃えるため、それらの選別と較正に加え量産品の性能を生産にフィードバックし生産を円滑に進める仕組みが必要である。これらの要求から本研究の目的は量産品の性能測定システムを構築することである。

第2章 MCP-PMT 量産と大量測定システム

TOP カウンターの光検出器として開発が進められてきた MCP-PMT(Micro Channel Plate - Photo multiplier Tube) は現在量産が始まっている。この章では MCP-PMT の構造・光検出原理について述べた後、量産と本研究の議論の中心である量産品の性能測定システムについて説明する。

2.1 MCP-PMT の構造・光検出原理

MCP-PMT は MCP を内蔵した光電子増倍管である。MCP-PMT の写真と内部構造の簡略図を図 2.1 と図 2.2 に示す。

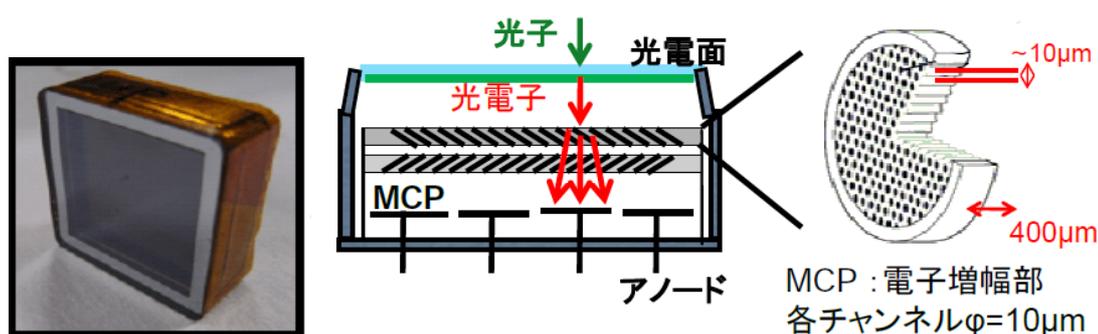


図. 2.1: MCP-PMT 写真。図. 2.2: MCP-PMT 内部構造。左は MCP-PMT の断面。右は光電面側から撮影 MCP 一枚の拡大イメージ図。ただし TOP カウンターでは角型の MCP を用いる

MCP-PMT の光電面に光が当たると光電効果により光電子が MCP-PMT 内部に放出される。放出された光電子は電場で MCP まで引っ張られ MCP のチャンネルの内壁に衝突し二次電子を放出する。この二次電子がまた電場で加速されてチャンネル内壁に衝突するサイクルを繰り返すことで、最終的にアノードでは 10^6 個オーダーの電子が得られる。内部に搭載される MCP は、内壁を抵抗体とした非常に細いガラスパイプ(チャンネル)を多数束ねた二次元構造をしており、それぞれのチャンネルは独立した二次電子増倍器を形成する。各チャンネルの内径は約 $10 \mu\text{m}$ 、長さは約 $400 \mu\text{m}$ である。MCP はチャンネルが配列された有効部とそれを取り囲む絶縁ガラス部で構成されており、チャンネルは MCP の開口率を大きくするため六方最密充填され、マルチファイバと呼ばれる六角形の融合体を形成している。開口率とは MCP チャンネルの開口面積の有効部全面積に対す

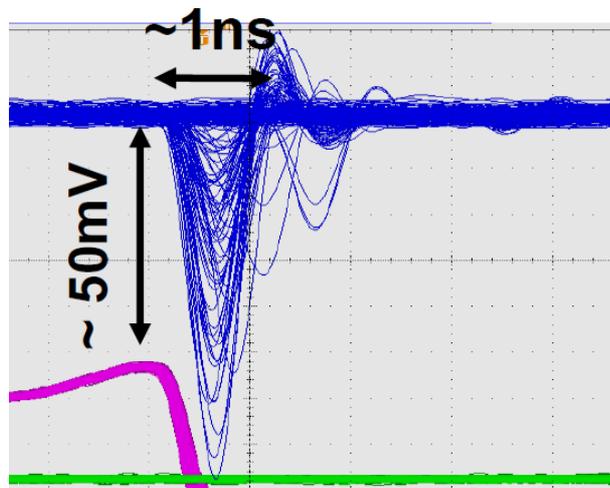


図. 2.4: MCP-PMT からの出力信号。オシロスコープで撮影

2.2 MCP-PMT の諸特性

以下に MCP-PMT の代表的な諸特性を紹介する。

2.2.1 QE(Quantum Efficiency 量子効率)

QE(Quantum Efficiency 量子効率) は波長依存性を持つ。図 2.5 に量産前の最終仕様の試作品 9 個の QE の波長分布を示した。QE は光電面上の全領域で平均した値 (以降、光電面平均 QE とする) である。

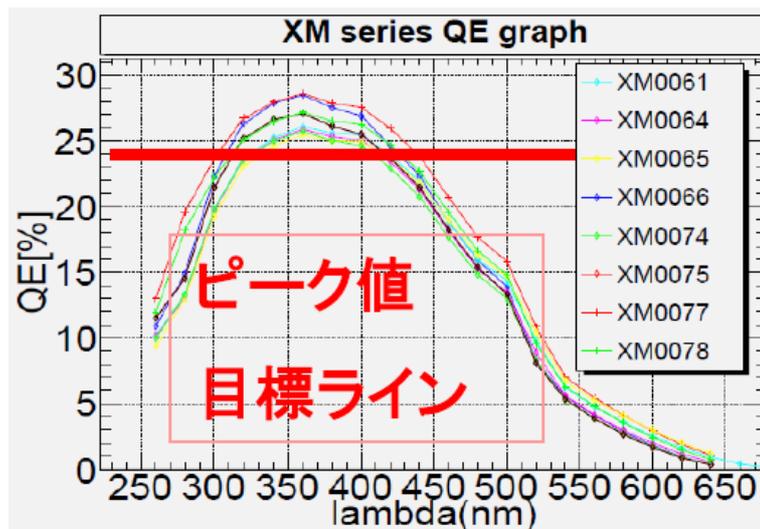


図. 2.5: 量産前最終仕様試作品の QE の波長分布。縦軸は光電面平均 QE。横軸は波長。

どの個体も 360nm 付近にピークを持つ典型的な SBA 光電面の QE 波長分布を示している。図 2.5 分布から全ての PMT で 360nm において最低基準の 24% 以上の QE を達成していることが分かる。さらに QE が最小のチャンネルと QE が最大のチャンネルの QE の比をとって面一様性を評価した場合、平均的に 80% 程になる。

QE 波長分布と図 1.5 の TOP カウンターのチェレンコフ光の波長分布と図 1.6 の波長カットフィルター透過率の波長分布をかけあわせると MCP-PMT で検出できる光の波長分布が分かる。その様子を図 2.6 に示す。

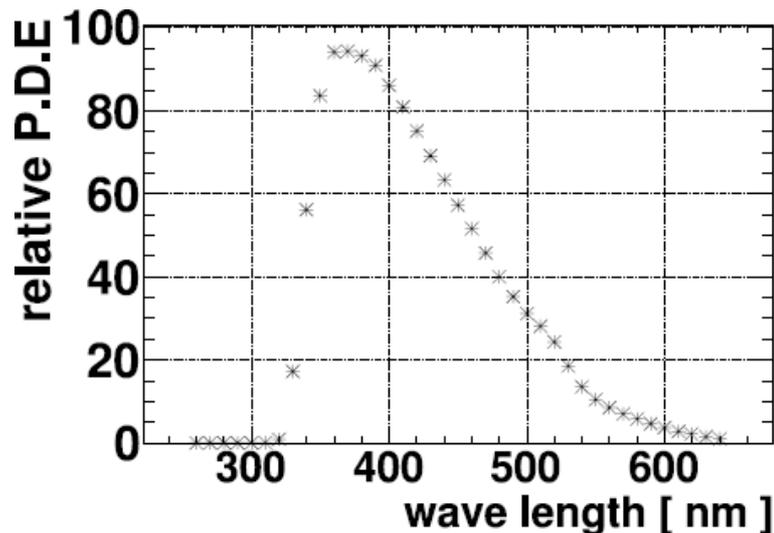


図. 2.6: MCP-PMT で検出される光の波長分布。縦軸の単位は任意

MCP-PMT で検出される光子は大部分が 340nm ~ 540nm 付近に分布する。360nm がピークとなることから 360nm の QE が重要である。

2.2.2 CE(Collection Efficiency 収集効率)

CE(Collection Efficiency 収集効率) は PMT の内部構造によって値が決定している。CE は MCP-PMT の場合光電面で放出された光電子が一段目の MCP のチャンネルに入る確率といいかえることが出来る。そのため CE は MCP の開口率でほぼ決まる。過去の調査により CE は $55 \pm 8\%$ であることが分かっている (参考文献 [3])。

2.2.3 TTS(Transit Time Spread)

MCP-PMT は非常に優れた時間分解能をもつ。ラインフォーカス型などの PMT では光電子や二次電子の放出角によって、二次電子の増幅過程で軌道に広がりが生じるため、時間応答にも広がりが生じる。MCP-PMT の場合、MCP に入射した光電子は約 $10\mu\text{m}$ という微小なチャンネルの中で増幅されるため、ラインフォーカス型と比べて電子軌道の広

がりは小さい。また電子増倍部として厚み $400\mu\text{m}$ の MCP を使用しているため、電子走行時間は 1ns 程度と短い。これら 2 つの理由により、MCP-PMT の TTS は平均約 30ps である。これは TOP カウンターの要求を十分満たす。

2.2.4 ゲイン

MCP-PMT は二段の MCP により 3400V の HV に対して 2×10^6 のゲインをもつ。ゲインは HV(印加電圧)によって変化する。サンプルのダークレートと HV の関係を図 2.7 に示す。ゲインが 2×10^6 の領域で見ると 100V の印加電圧の違いでゲインが $1.5 \sim 2$ 倍変化する。

また、ゲインは 1.5T の磁場中で半分の 1×10^6 になることが実験により確かめられている(参考文献 [7])。一光子検出に必要なゲインは 5×10^5 であるので、動作ゲインは 2 倍の余裕を持って設定されている。

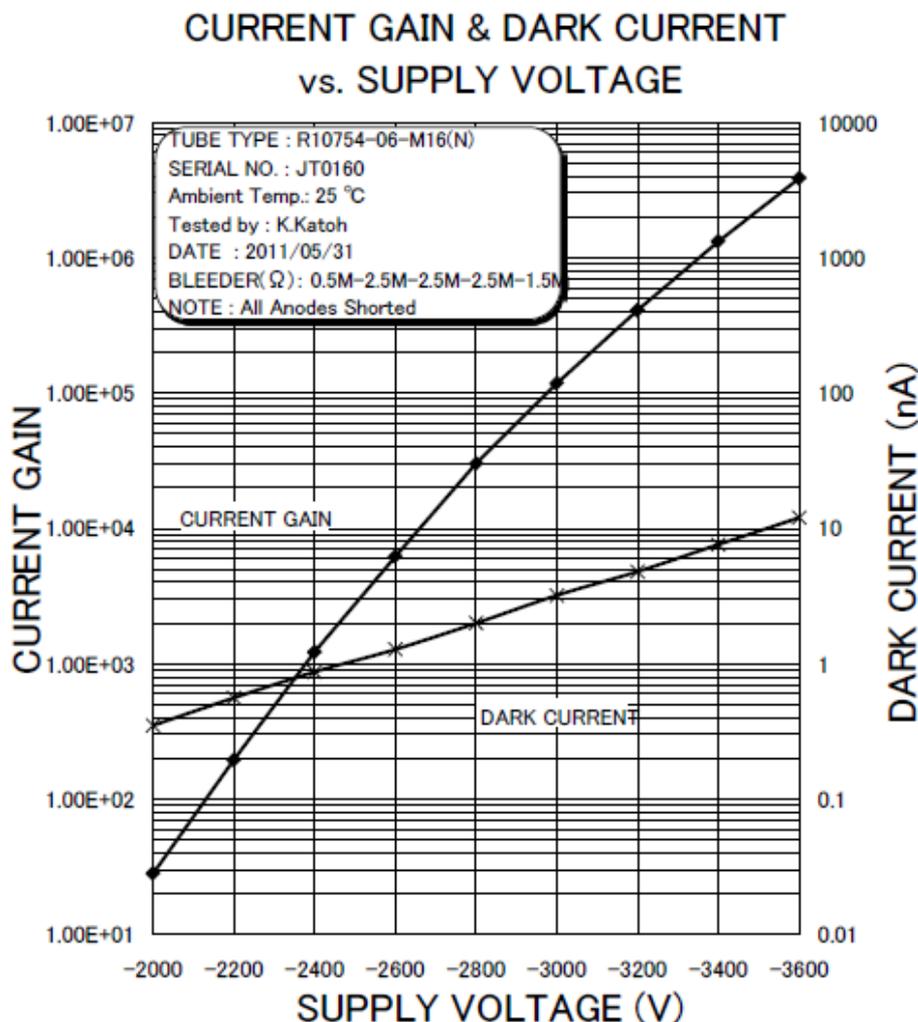


図. 2.7: MCP-PMT のゲイン及びダークレートのHV依存性。
例 ID:JT0160。浜松ホトニクス社のデータを引用

2.2.5 ダークレート

ダークレートは光電面で熱励起された光電子や、赤外光の入射が原因で起こるとされる。SBA 光電面は赤外の感度が低いためダークレートは小さい。3400V 程のHV をかけゲインが 2×10^6 の時の平均的な MCP-PMT のダークレートは数 100Hz ~ 数 kHz 程度である。ダークレートもHV の影響を受け、図 2.7 のようにHV とともに増加する(図の MCP-PMT は少しダークレートが高めのもの)。

2.3 量産

TOP カウンター建設に向けた MCP-PMT の量産が 2011 年 3 月から浜松ホトニクス社で徐々に始まっている。生産数は Belle II 実験に搭載する 512 個に予備を加えて 550 個である。期間は 2013 年後半までの 3 年弱を予定しており、最大で月 30 個の生産を想定している。

量産品の性能測定

量産において TOP カウンターに使用可能な MCP-PMT を選別する仕組みや量産期間中に量産品の性能を把握し生産にフィードバックを行うことで量産を円滑に進める仕組み、さらに MCP-PMT の較正に使用するデータを取得する仕組みが必要である。これらの目的で量産品の性能測定を行わねばならない。個体差が大きいゲイン、TTS、QE、CE、ダークレート、動作 HV については個体別に確認を行う必要がある。個体別の確認が困難で個体差の小さい寿命や磁場中特性などの性能はサンプリングテストのみ行う。サンプリングテストについてこの論文では述べない。コスト削減のためゲイン、QE、ダークレート、動作 HV は浜松ホトニクス社で簡単な確認を行い、名古屋大で精密測定を行う。TTS、CE の測定は名古屋大でのみ精密測定を行う。

2.4 量産品自動測定システム

量産品の自動測定システムを構築するために、測定に求められる条件や測定精度を以下に述べる。またそれらを基に製作したシステムの紹介を簡単に行う。

2.4.1 選別基準

QE 測定の選別基準

QE 値による選別基準は波長 360nm の光に対して 24% 以上の光電面平均 QE があることである。またこれに加えて面一様性が 60% 以上、また QE が 1% 以下しか無い面積が 1 チャンネル辺り 20% 以下という選別基準を設けている。これ等の基準を満たさないものはより良質な生産を期待し他の量産品と交換すると同時に、生産体制の見直しに役立つ。

ゲイン測定の選別基準

16 チャンネル平均ゲインが 2×10^6 以上かつ、個々のチャンネルのゲインが 1×10^6 以上であることを要求する。

TTS 測定の選別基準

全チャンネルの TTS が 50ps 以下であることである。

ダークレート測定の選別基準

全チャンネルのダークレートが 100kHz 以下であることを要求する。

CE 測定の選別基準

全チャンネル 44% 以上を要求する。

量産品 MCP-PMT の選別基準

選別基準をまとめると以下のようになる。

表. 2.1: 選別基準のまとめ

特性	選別基準
QE	全面平均 QE > 24% @360nm, 面一様性 > 60% @360nm, 一つのチャンネル内で QE が 1% 以下の面積 < 20% @360nm,
ゲイン	平均 > 2×10^6 各チャンネル > 1×10^6
TTS	全チャンネル < 50ps
ダークレート	全チャンネル < 100kHz
CE	全チャンネル > 44%

2.4.2 測定精度

QE 測定の要求精度

QE 値の要求精度は波長 360nm で光電面平均 QE の相対誤差が 5% 以下であることである。式 1.3 から QE の相対誤差が 5% の時 TOP カウンターの識別性能には 2.5% 程影響が出る。

TTS 測定の要求精度

TTS には 5ps 以下の測定精度を要求する。TTS の 5ps の不確かさが TOP カウンターに与える影響を見積もる。まず MCP-PMT 単体の時間分解能だけでなく波長分散効果などの影響も受けると TOP 全体の時間分解能は平均的に 75ps 程度である。この 75ps の中には平均的な MCP-PMT の時間分解能である 30ps も含まれるが、これが 35ps になった場合を考えると TOP カウンターの識別能力には約 2.5% 変化する。

ゲイン測定の要求精度

一光子検出が出来ればよいことから 10% を要求する。また測定では 5HV 分のデータを

要求する。

ダークレート測定の要求精度

100kHz 以下であればいいので 10% の測定精度を要求する。また測定では 5HV 分のデータを要求する。

CE 測定の要求精度

CE は QE 同様に 5% 以下の測定精度を要求する。

要求精度のまとめ

表 2.2 に量産システムにおける MCP-PMT の測定要求精度をまとめる。

表. 2.2: 量産システムにおける MCP-PMT の測定要求精度

特性	要求精度
QE	各波長 360nm での光電面平均 QE < $(1 \pm 0.05) \times QE$
ゲイン	10% 以下
TTS	5ps 以下
ダークレート	10% 以下
CE	$(1 \pm 0.05) \times CE$ 以下

2.4.3 測定速度

最大で月 30 個の測定を想定しているため、名古屋大では一日二個以上の測定を目指し 12 時間以内に一個の MCP-PMT を測定出来るシステムが要求された。

2.4.4 測定システム

以上の各測定項目の測定要求精度を基に量産品用自動測定システムを構築した。システムは QE 自動測定システムと、一光子特性自動測定システムに分かれる。これは QE 以外の特性が一光子状態の光に対する性能を測定したいのに対して、QE 測定を一光子状態の光源で行うことが後で述べる測定手法から分かるように困難だからである。QE 自動測定システムに関しては 3 章で、一光子特性自動測定システムに関しては 4 章で詳しく述べる。以下に二つのシステムへの要求を一度まとめる。

QE 自動測定システム

測定項目 : QE

要求測定速度 : MCP-PMT 一個の測定が 12 時間以内

データの条件 : 光電面上分割されたデータ、波長分割されたデータ

要求測定精度：波長 360nm での光電面平均 QE の不確かさ $< (1 \pm 0.05) \times QE$

－光子特性自動測定システム

測定項目 : TTS・ゲイン・ダークレート・CE・動作 HV

要求測定速度：MCP-PMT 一個の測定が 12 時間以内

データの条件：全 16 チャンネル別、5 点の HV 別のデータ

要求測定精度：

< TTS > $\pm 5ps$ 程度

< ゲイン > $\pm 10\%$ 程度

< ダークレート > .. $\pm 10\%$ 程度

< CE > $(1 \pm 0.05) \times CE$ 以下

< 動作 HV > 100V 刻み

第3章 QE自動測定システム

この章ではQE自動測定システムをどのように構築したかについて述べる。さらにシステムの性能の確認として測定時間の実測や測定に考え得る不確かさの見積もり、浜松ホトニクスでの測定結果との比較を行った結果についても述べる。

3.1 システムの構想

3.1.1 と 3.1.2 で旧システムについて説明し、3.1.3 以降本研究で改善した点を述べる。

3.1.1 測定手法

QE値はマルチフォトンがMCP-PMTの光電面に当たった際、光電面とMCP一段目入射面の間に流れる電流値から算出する。光量の把握にはQEの分かっているレファレンスフォトダイオードを用いる。MCP-PMTに光を当てたときの電流値を I_{mcp} 、暗電流を D_{mcp} 、レファレンスフォトダイオードに同量の光を当てたときの電流値を I_{pd} 、暗電流を D_{pd} 、とするとMCP-PMTの $QE(QE_{mcp})$ はレファレンスフォトダイオードの $QE(QE_{pd})$ を用いて

$$QE_{mcp} = \frac{I_{mcp} - D_{mcp}}{I_{pd} - D_{pd}} \times QE_{pd} \quad (3.1)$$

と表せる。また回路図は図3.1のようになる。

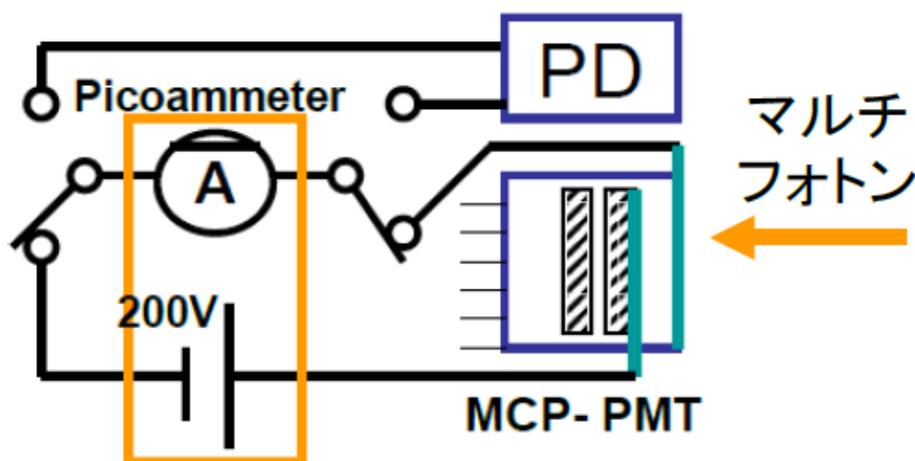


図. 3.1: QE測定セットアップ

MCP-PMT を-3400V 程の電圧で使用した場合を考慮し、光電面から MCP 一段目の間に 200V の電位差をかけた状態で測定を行う。

3.1.2 測定装置

測定システムのイメージを図 3.2 にまとめる。

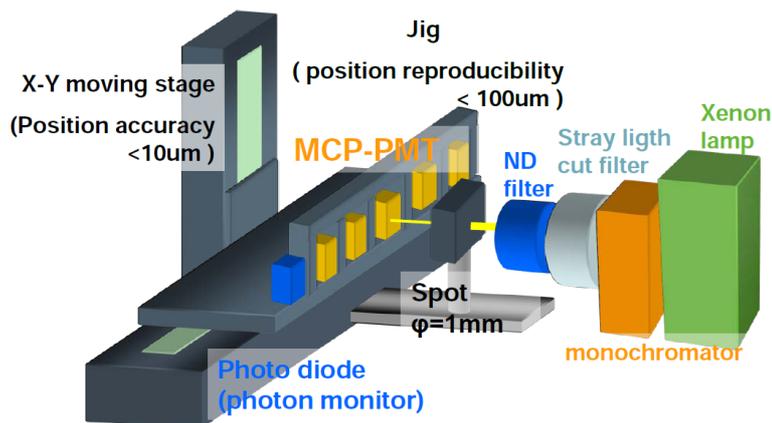


図. 3.2: QE 測定システムの装置イメージ図

図 3.2 では右側から光が出るように描いた。キセノンランプからの光は分光器、波長カットフィルター、NDフィルター、スリットを通り MCP-PMT に当たる。MCP-PMT は最大で 5 個まで治具に固定可能である。左側で MCP-PMT を支えているのは XY ムービングステージである。

光源

光源には波長領域 240nm ~ 2000nm に対応するキセノンランプ (浜松ホトニクス製 Xenon Lamp L2195) を用いた。これは図 3.3 のように測定したい波長領域を十分にカバーしている。

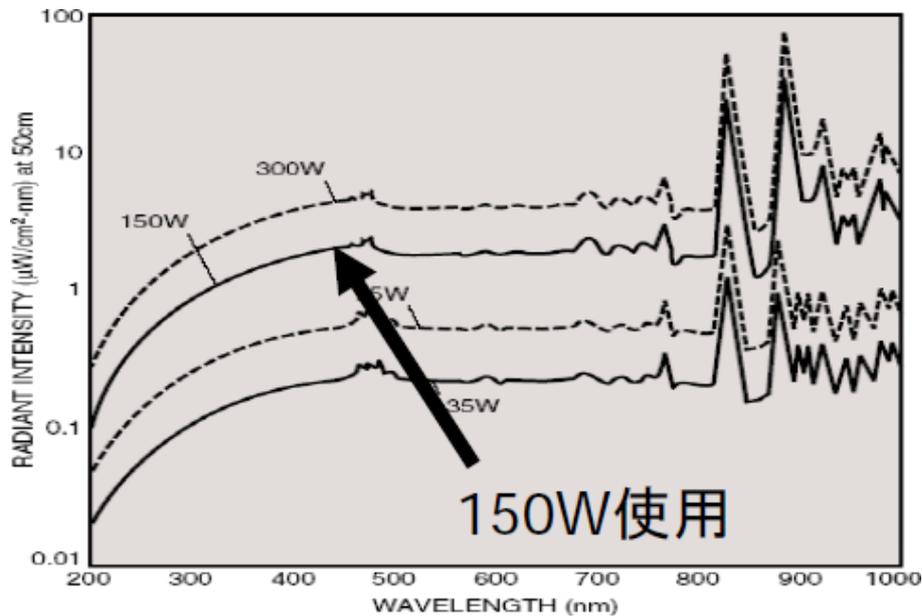


図. 3.3: キセノンランプの光量の波長分布 (浜松ホトニクス社カタログより)

分光

波長の設定を行うために分光器を用いる。分光器は島津製作所製小型分光器スペクトロメイト SPG-120S を用いる。この分光器は波長分解能が 1nm(404.7nm において) であり、波長不確かさ $\pm 1.5\text{nm}$ 、波長広がり $\pm 4\text{nm}$ 以下、波長再現性 $\pm 0.3\text{nm}$ と測定に十分な性能を持つ。また分光器は回折格子を用いているため必ず設定した波長の 1/2 の高次光の混合が起こる。この高次光を防ぐために低波長カットフィルターを挿入する必要がある。波長範囲 400nm ~ 600nm と 600 ~ 900nm の領域で 2 種類の高次光カットフィルター使用する。

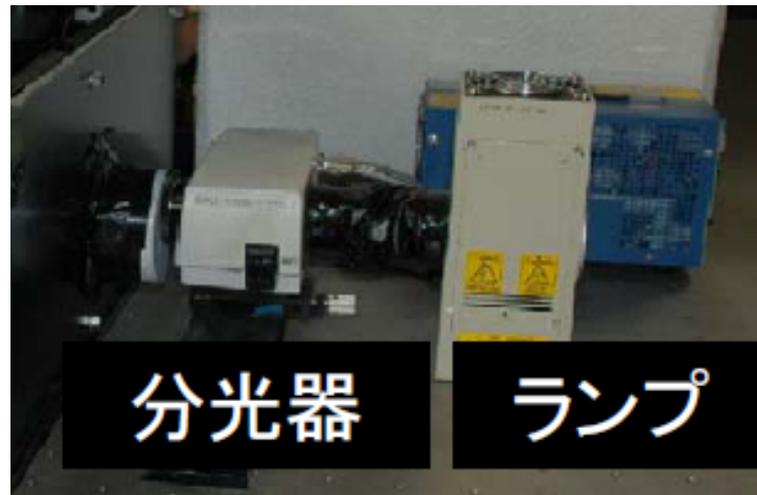


図. 3.4: キセノンランプと分光器の写真

スポット

測定はスポット光で行う。直径は約 1mm である。

電流計

電流値の計測には測定したい数 nA の電流に対し分解能が 10fA と十分な性能を持つピコアンメータ (KEITHLEY 6287 picoammeter) を用いる。

レファレンスフォトダイオード

光量把握には浜松ホトニクス製フォトダイオード S1337-1010BQ・A を使用する。このフォトダイオードは 190nm ~ 1100nm までの感度波長領域を持っており受光面サイズは 10mm × 10mm である。

ムービングステージ

PMT とフォトダイオード用の稼動台としてシグマ光機製 XY ムービングステージ (X(水平)方向 SGSP33-200 Y(鉛直)方向 SGSP46-300) を用いる。これによってコンピューターからの自動位置スキャンが可能である。このステージの最小ステップ幅は X,Y それぞれ 5,2 μ m であり、位置決め精度は 25 μ m である。これはチャンネルスキャンに十分な精度である。現在 1 ステップが約 1.37mm で設定されている。

3.1.3 従来のシステムの問題点と新システムの改良点

従来の QE 測定システムでは測定速度と測定精度の両面で問題があった。測定速度は一個の PMT に約 16 時間かかっていた。測定の自動化が一部しかされておらず効率よい測定が行われていなかったのが理由である。また測定精度厳密には見積もられておらずフォトダイオードの QE の誤差由来の相対誤差として約 10% が見積もられていた。

量産体制に対応したシステムの構築のために上で紹介した従来のシステムに以下の改良を加えた。

全自動化と測定時間の短縮

- ・波長スキンの自動化
- ・波長カットフィルタの切り替え自動化
- ・ND フィルターの切り替え自動化
- ・フォトダイオード読み出し用回路へのスイッチ自動化
測定精度の把握
- ・フォトダイオード較正による測定精度の精密な把握
その他
- ・MCP-PMT とフォトダイオード固定用治具の導入

3.1.4 新システムの導入

新システムへの改良に伴い導入した装置や機能について説明する。

波長スキンの自動化

分光器に自動駆動装置（島津製作所製 AT-120PL）及びステッピングモータコントローラ（島津製作所製 AT-100PCC）を取り付けたことでパソコンから自動操作を実現した。

波長カットフィルタの切り替え自動化

可動フィルタホルダユニット（島津製作所製 AT-120FL）とそれを操作するステッピングモータコントローラ（島津製作所製 AT-100PCC）を用いたことでパソコンから波長カットフィルタの自動で切り替えを行えるようにした。



図. 3.5: 可動フィルタホルダユニットの写真

可変 ND フィルターの導入

MCP-PMT は光電面の面抵抗の影響で、光電面を流れる電流値が約 10nA で飽和する。これを防ぐため ND フィルターで波長ごとに光量調整を行う。自動で光量

調整が行えるようにコンピュータ制御が可能な可変NDフィルターを導入した。

フォトダイオード読み出し回路へのスイッチ自動化

MCP-PMT とフォトダイオードの回路の自動切り替えスイッチとして KEISEEDS 製リレースイッチ、シリアル I/O コントローラー RBIO-1 を導入した (図 3.6)。またスイッチにより 5 個まで MCP-PMT の回路を切り替えられるよう改良した。

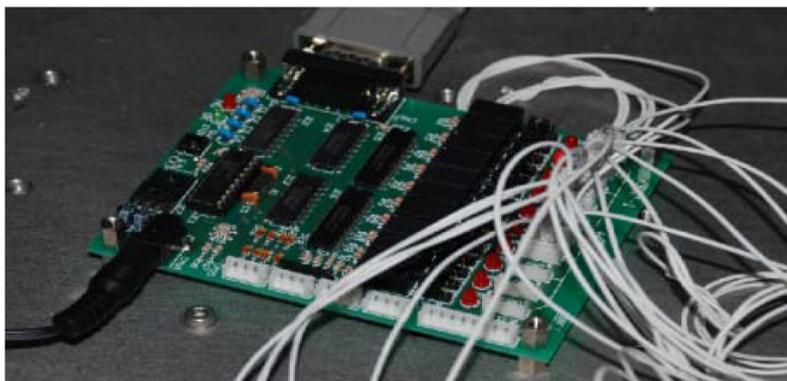


図. 3.6: 回路自動切換えスイッチの写真

リレースイッチは唯一読み出し回路中に直接接続される自動装置であったので導入前後でスイッチが測定に与える影響の確認を行った。500nm の光を MCP-PMT (JT0003) の中心付近に当て QE 測定値の比較を行ったところ、スイッチ導入前が $QE=10.16 \pm 0.02$ (電流測定値の統計的なふるつきのみの) % であるのに対して導入後が $QE=10.15 \pm 0.02\%$ となり、問題になるような差や不確かさの広がりは見られなかった。

フォトダイオード較正による QE 測定精度の精密な把握

フォトダイオードの QE の較正は産業技術総合研究所に依頼した。較正結果を図 3.8 に載せる。このデータはフォトダイオードの中心から 2mm の範囲に保証されており、縦軸の不確かさは全波長領域において相対的に $\pm 1.7\%$ 以内であることが保証されている。これにより要求を十分に満たす精度で MCP-PMT の QE を把握することが出来る。

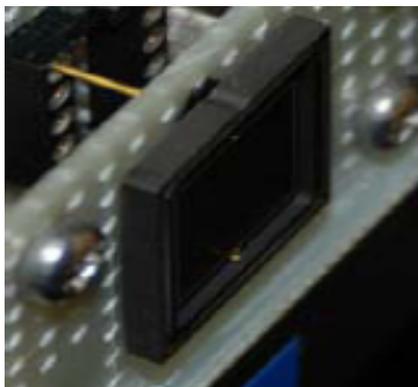


図. 3.7: フォトダイオードの写真

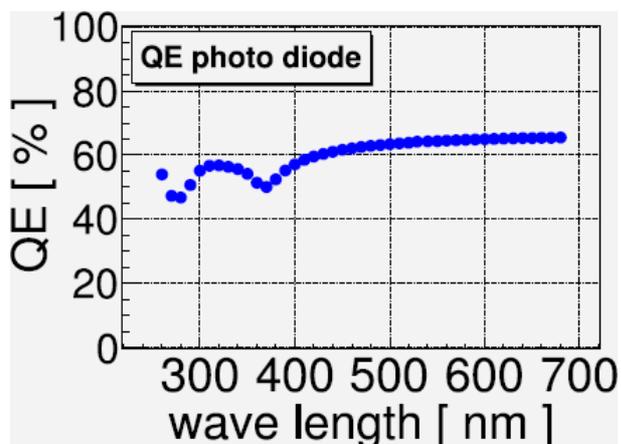


図. 3.8: フォトダイオードの QE 波長分布。

さらに新システムではフォトダイオードへの光の照射位置のズレも考慮してフォトダイオードの面一様性の確認も行っている。図 3.9 は 500nm の光に対してフォトダイオード QE をスキャンした様子である。

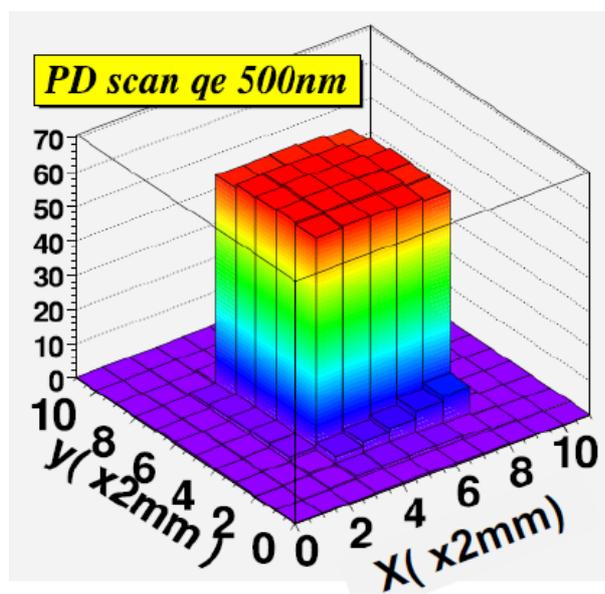


図. 3.9: フォトダイオードの相対 QE 面一様性 (Z 軸は任意)

Z 軸は相対 QE で任意の値がつけられている。この中心 9 マスを調べると値の広がりには $\pm 0.9\%$ (相対) 程と小さいことが確認された。測定位置が $\pm 2\text{mm}$ 程移動しても測定に大きな影響はないことが確認された。

MCP-PMT とフォトダイオード固定用治具の導入

毎回の測定で精度よく量産品の位置を固定するための治具が必要であった。図 3.10 の様に治具の 2 辺に MCP-PMT の側管をボールプランジャーで固定する方式を考案し、新たに治具を製作した。

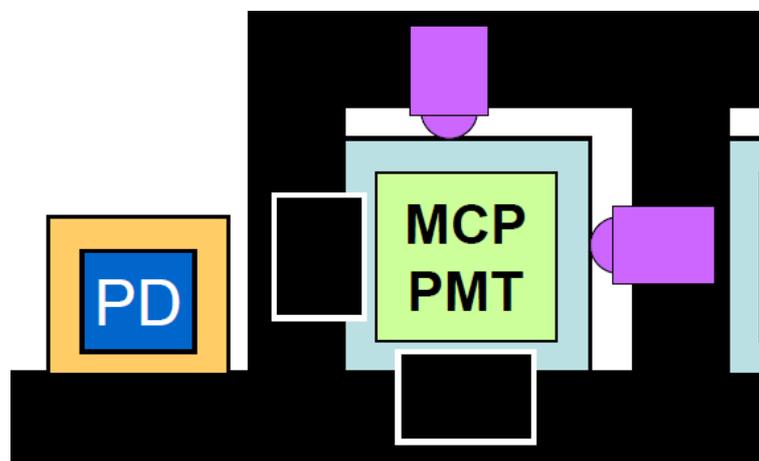


図. 3.10: QE 測定用治具概念。治具を光源側から見た図。黒部分が治具。紫部分がボールプランジャー。薄緑色部分は MCP-PMT の有効感度領域。PD はフォトダイオード。

側管を固定する手法を用いた理由は、MCP-PMT の構造上アノードと側管の位置精度が一番良いたためである。その設置精度は $100 \mu\text{m}$ である。側管と治具の位置精度は $100 \mu\text{m}$ 程であるので、アノードと治具の位置精度は最大 $200 \mu\text{m}$ となる。スキャンしたい領域が $200 \mu\text{m}$ 一方向にズレたまま不感領域をスキャンしていたとすると (図 3.11)、このアライメントのズレが全面平均 QE に与える影響は相対的に約 1% である。これを誤差として見積もる。

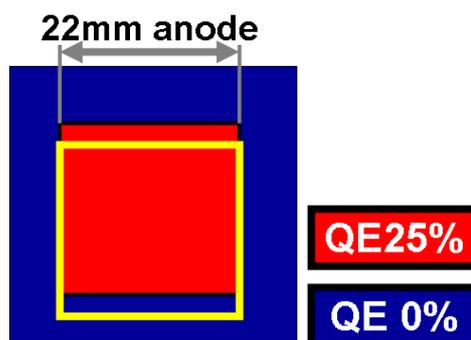


図. 3.11: アライメントずれていた場合のイメージ。赤が MCP-PMT の感度領域。青が不感領域。黄色がスキャン領域

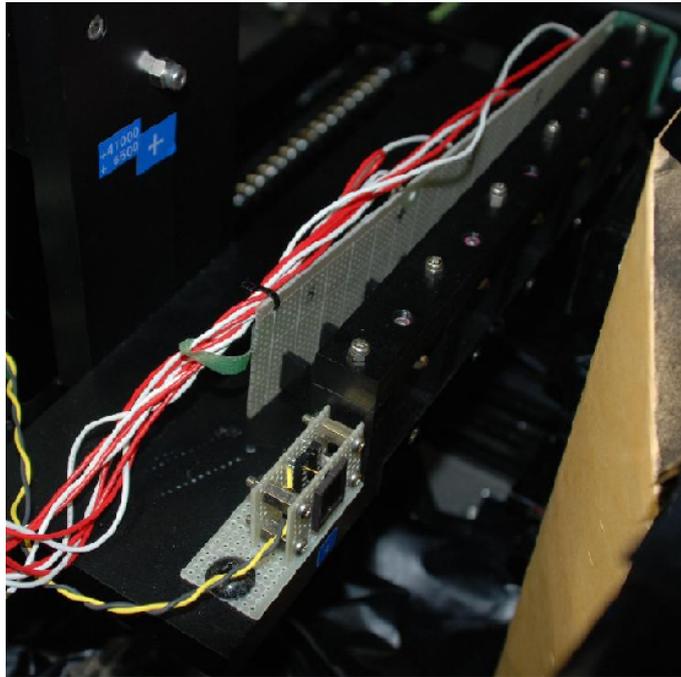


図. 3.12: 治具の写真。斜め上から撮影

3.1.5 組み上げたシステム

製作したシステムの装置の様子を図 3.13 載せる。

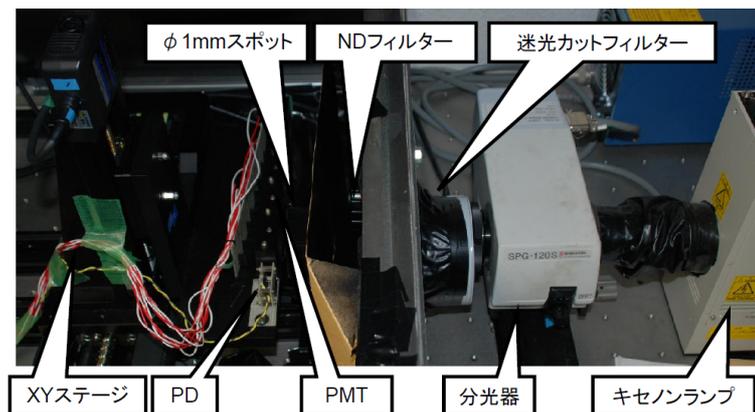


図. 3.13: QE 測定システムの装置写真

3.2 QE自動測定システムでの測定

3.2.1 測定手順

測定手順をまとめると図3.14のようになる。

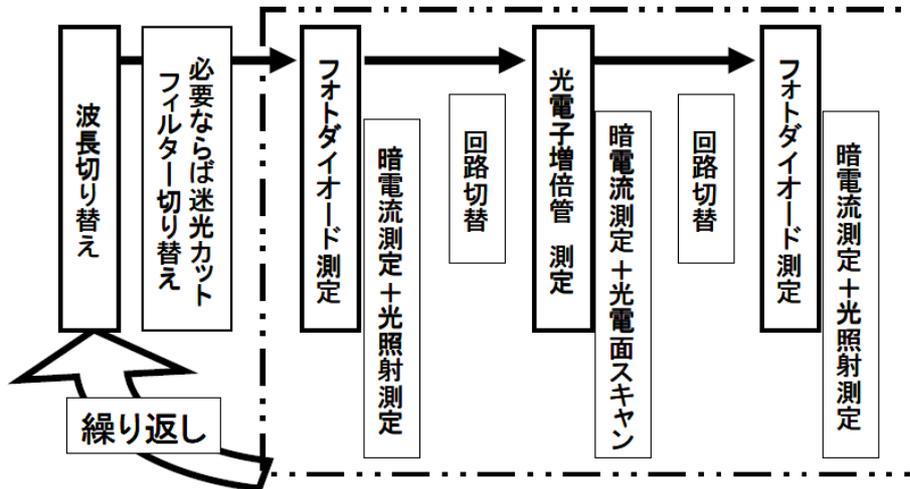


図. 3.14: QE 測定の流れ

波長を変更し、MCP-PMTの光電面スキャンをし、また波長を変更する動作を繰り返す。スキャン中各測定点でMCP-PMTの電流値は3回読み取る。MCP-PMTの光電面スキャンの前後ではフォトダイオードを用いて光量の確認を行う。このときは各20回電流値を読み取る。また、暗電流の測定はMCP-PMTであれば18点測定ごとに、フォトダイオードであれば測定の前にそれぞれ行う。暗電流の読み出しも同様にMCP-PMT、フォトダイオードそれぞれ3回、20回と定めた。光電面上の分割数と波長の分割数は限られた時間内で出来るだけ多くの分割を行えるように考え、 18×18 (光電面 16×16 分割)、波長20分割(280nmから660nmまでを20nm刻みで)に設定した。この一連の測定は全て自動で行う。

3.2.2 測定結果

製作したシステムでQEを測定した結果を述べる。QE算出に用いるMCP-PMTの電流値(I_{mcp})と暗電流値(D_{mcp})を図3.15に、またフォトダイオードの電流値(I_{pd})と暗電流値(D_{pd})を図3.16に示す。

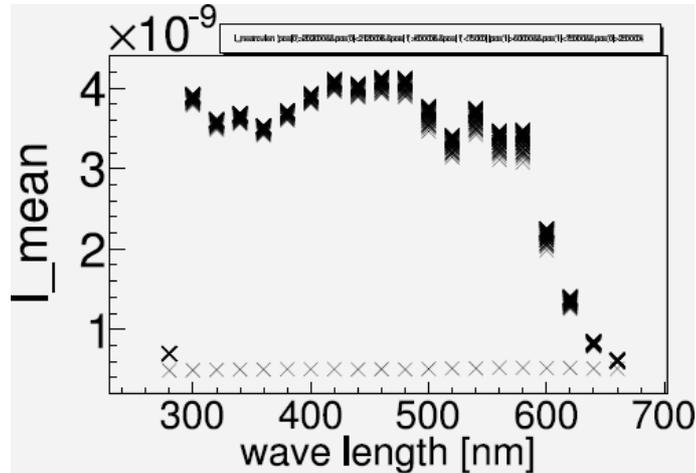


図. 3.15: MCP-PMT の出力電流値の波長分布。MCP-PMT(ID:JT0233) の光電面中心 1cm をスキャンした時の値。 $2 \times 10^{-9} \text{A} \sim 4 \times 10^{-9} \text{A}$ に分布するのが MCP-PMT の光照射時の電流値 (I_{mcp})、 $1 \times 10^{-9} \text{A}$ 下に分布するのが MCP-PMT のダークカレント (D_{mcp})。

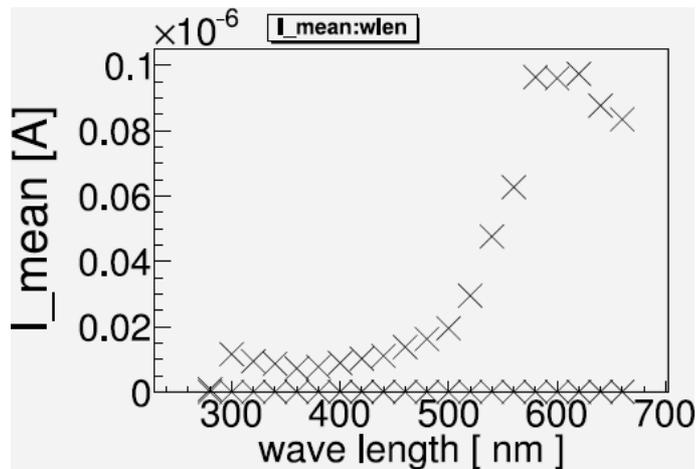


図. 3.16: フォトダイオードの電流値の波長分布。 0.01×10^{-6} 以上に分布するのがフォトダイオードの光照射時の電流値 (I_{pd})、 0.01×10^{-6} 以下に分布するのがフォトダイオードのダークカレント (D_{pd})。

280nm で電流の小さくなる原因としてはこの領域で分光後の光量が小さくなることと MCP-PMT の感度が低くなることがあげられる。これ等の測定データから得られた QE の位置分布と波長分布を示したのが図 3.18 と図 3.17 である。

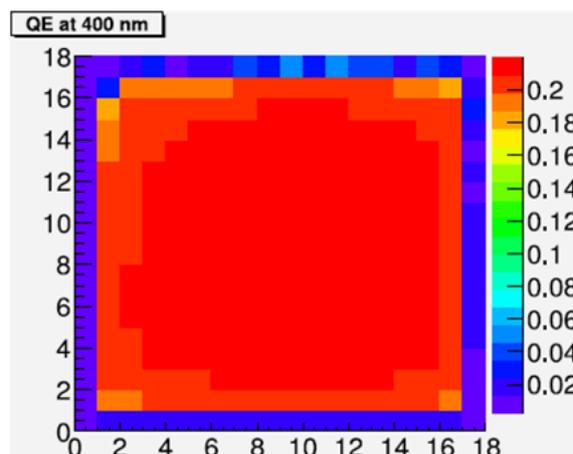


図. 3.17: JT0233 の光電面上での QE 分布。横軸と縦軸の目盛りは 1 ステップ 1.37mm。色の違いは QE を表し 1 が QE100% にあたる。

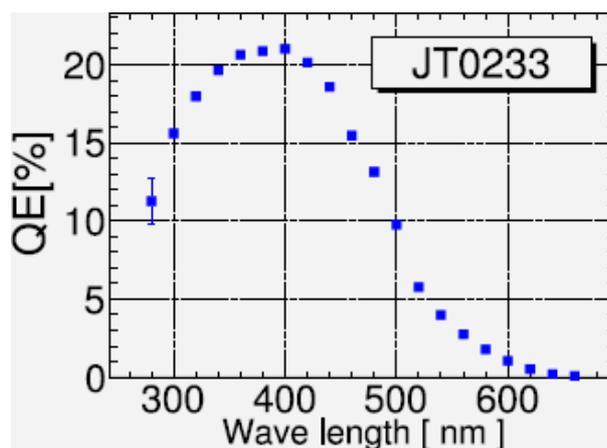


図. 3.18: MCP-PMT の光電面平均 QE の波長分布。縦軸のエラーバーは統計的不確かさ

図 3.18 の低波長領域で測定結果に大きな統計誤差がついているのはこの領域で測定電流値が小さいためである。また QE の位置分布においてスキャンの最外郭は有効感度領域の外を測定しているため QE がほぼ 0% となる。

以上の様に QE の波長分布と位置分布の測定を行えるシステムが完成した。

3.3 QE 自動測定システムの性能の確認

製作したシステムの性能の確認を行う。確認は測定速度の実測と測定の不確かさの見積もりをもって行う。また浜松ホトニクスでの QE 測定結果との比較につ

いても述べる。

3.3.1 測定速度の実測

測定時間を実測した結果、全行程約9時間30分であることが分かった。内訳としては光電面16×16スキャンに約27分かかり、これが20波長分ある。これは目標の12時間以内の測定を実現したといえる。

3.3.2 測定の不確かさの見積もり

測定の不確かさとなる要因として以下のものがあげられる。

ランプの光量安定性

ランプの光量安定性を測定した。図3.19は波長400nmの光をフォトダイオードに照射し、約80分間電流値をモニターし続けた結果である。時間軸のスタートはランプの電源を入れた時間である。

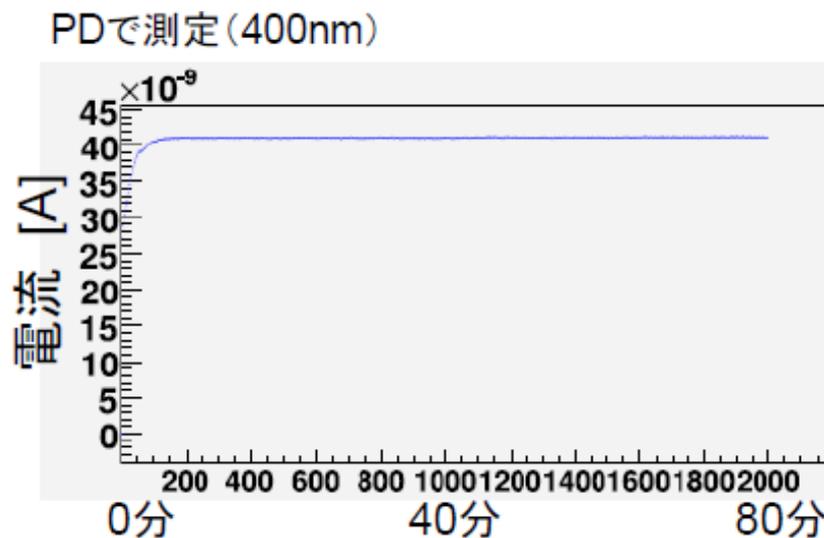


図. 3.19: キセノンランプの安定性。横軸は時間。縦軸はフォトダイオードの出力電流

この結果から点灯後8分以上経過した後では電流のふらつきが0.2%以下であることが分かった。このふらつきにはフォトダイオードの応答のふらつきも含まれる。量産品の測定では点灯後8分以上経過してから測定を行うように調整している。

測定の統計的不確かさ

QE 測定時の MCP-PMT の電流値の波長ごとのふらつきを図 3.20 に示す。

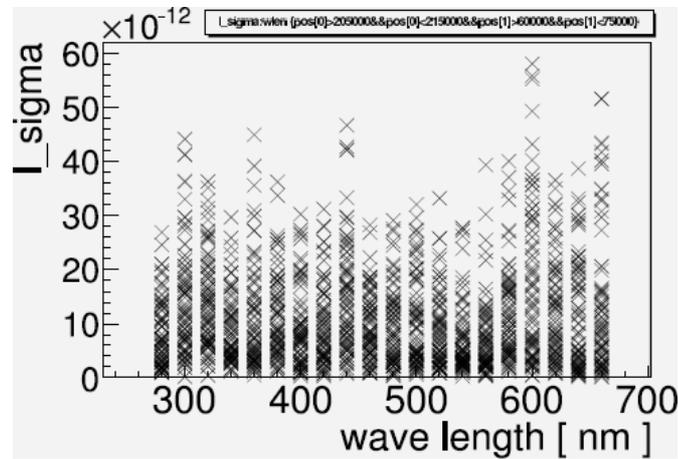


図. 3.20: MCP-PMT の電流値の波長ごとのふらつき。横軸波長。縦軸は光電面上各測定点における電流値の標準偏差。MCP-PMT の中心 1cm 四方ほどの領域のデータ

図 3.20 は MCP-PMT の光電面中心 1cm 四方形の領域のデータから作成した。電流のふらつきは光電面上各点での 3 回の測定の標準偏差をとった。

同様に暗電流の測定やフォトダイオードの電流値に由来する不確かさもをエラーバーとして付け、不確かさの波長分布を作ると図 3.21 の様になる。

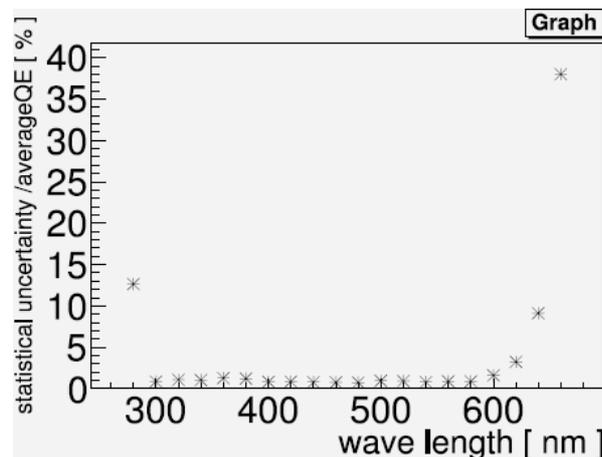


図. 3.21: MCP-PMT の QE 測定における統計的不確かさの波長分布

360nm での QE 測定の不確かさは 1.3% であった。

長時間に渡る測定の繰り返し精度

長時間に渡って測定を繰り返した時の結果の再現性の確認を行った。その結果を図 3.22 に載せる。

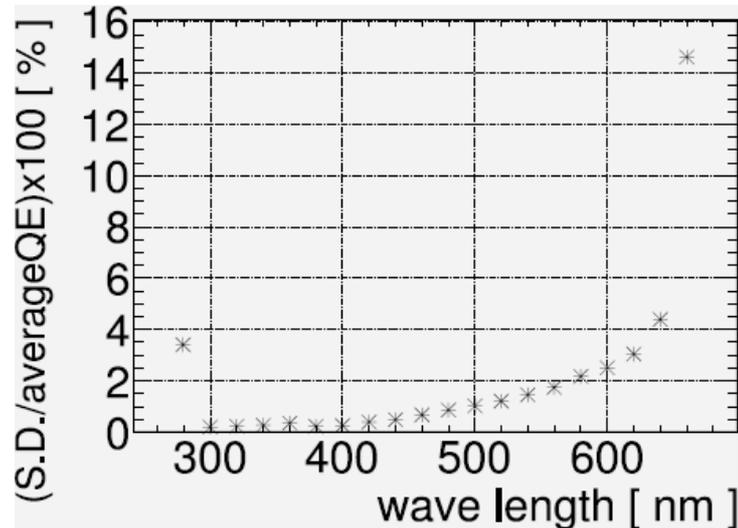


図. 3.22: QE 測定再現性の確認

横軸は波長。縦軸は 9 回の QE 測定のみらつきを標準偏差で評価したもの。

確認には初期量産品から JT0233 を使った。9 日間に渡り JT0233 の QE 測定を繰り返し行い、各波長での測定のみらつきを標準偏差で評価した。結果、波長 360nm でのみらつきは 0.3% であった。これは上で見積もった統計的不確かさの範囲におさまる。

フォトダイオードの QE の精度

最大で $\pm 1.7\%$ (相対) の不確かさ。系統的な不確かさとして加算。

アライメントの精度

アライメントの精度からくる系統的な不確かさが $\pm 1\%$ 。

不確かさの見積もりまとめ

以上の主な不確かさの要因から、360nm での光電面平均 QE は統計的不確かさを 1.3% (相対)、また系統的な相対不確かさを 2.0% 以下を見積もる。目標であった $\pm 5\%$ の相対不確かさと比べて十分小さい不確かさのシステムを構築することが出来た。

3.3.3 新旧システムの比較とまとめ

新旧の QE 自動測定システムの性能をまとめると表 3.1 の様になる。

表. 3.1: 新旧のシステムの性能確認まとめ

新旧	速度 [PMT 一個]	精度	機能
旧	16 時間	相対誤差 $\pm 10\%$ (系統)	自動位置スキャン可能
新	9 時間半	相対誤差 $\pm 1.3\%$ (統計) $\pm 2.0\%$ (系統)	自動位置スキャン可能 自動波長スキャン可能 自動回路切り替え可能

新システム構築には2つの大きな改善点があった。一つ目は測定の全自動化に成功したことである。人の手間がかからない効率良いシステムにより測定時間の短縮にも繋がった。分光器の自動駆動装置や回路切り替えスイッチの自動化、可変NDフィルタ、自動波長カットフィルタ切替器の導入によりこれ等を実現した。また二つ目は測定精度を正確に見積もったことである。これ等2つの改善点により、要求だった MCP-PMT 一個 12 時間以内の測定を可能にし、かつ相対誤差 5% 以内での QE 測定を可能にした。

3.3.4 浜松ホトニクスでの QE 測定結果との比較

浜松ホトニクスで QE 測定を行った MCP-PMT を名古屋大のシステムで測定することで両者の結果の比較を行った例を図 3.23 に示す。この図には MCP-PMT(ID: JT0233) を用いた。

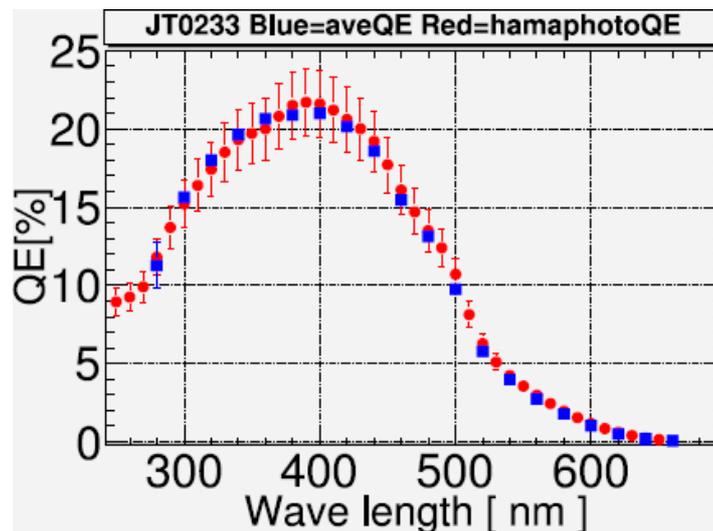


図. 3.23: 浜松ホトニクスでの QE 測定との比較。青のプロットが名古屋大での測定結果。赤のプロットが浜松ホトニクスでの測定結果。浜松ホトニクスでの測定結果には保証されている精度として相対誤差の $\pm 10\%$ が付けられている。これは主に浜松ホトニクスでの QE 測定時のレファレンス PMT の QE の精度及び分光器の精度を考慮して浜松ホトニクスがつけたものである。

浜松ホトニクスでは光電面中心から 1cm ほどの領域の QE のみを測定している。これに対して名古屋大ではスキャンを行い全光電面平均 QE を測定している。このため面一様性が 80% 以上を満たす 11 個の MCP-PMT のみ比較する。名古屋大での MCP-PMT 11 個の測定結果は誤差の範囲で浜松ホトニクス測定結果と一致したが中心値はずれている。これらの中心値のズレの原因は現在も課題である。差の原因の候補としては

- ・浜松ホトニクスでの測定に用いている標準球の QE 絶対値のズレ。
 - ・浜松ホトニクスでの測定に用いている分光器の迷光の影響。
 - ・MCP-PMT の QE の経時変化
- などが考えられる。

第4章 一光子特性測定システム

この章では量産品の測定に対応するための一光子特性自動測定システムを紹介する。本システムではゲイン、TTS、ダークレート、CEを測定する。製作について説明し、さらに組み上げたシステムの性能の確認として測定時間の実測や測定に考え得る不確かさの見積もり、浜松ホトニクスでの測定結果との比較を行った結果を述べる。

4.1 システムの構想

4.1.1 と 4.1.2 で旧システムについて説明し 4.1.3 以降本研究で改善した点を述べる。

4.1.1 測定手法

測定のセットアップは図 4.1 のようになる。ただし図 4.1 は 1 チャンネル分の読み出し回路の描いた。



図. 4.1: 一光子測定セットアップ。

AMP=アンプ、ATT =アッテネータ、DIS=ディスクリミネーター。

CLOCK からの信号をトリガーとして、レーザーからの光を一光子状態に減光しスポット光にして MCP-PMT の各チャンネルに当てる。このときの出力信号をアンプで増幅させて ADC と TDC で記録する。TDC のスタートタイミングは CLOCK からの信号を用いる。

4.1.2 測定装置

測定装置のイメージを図 4.2 に示す。

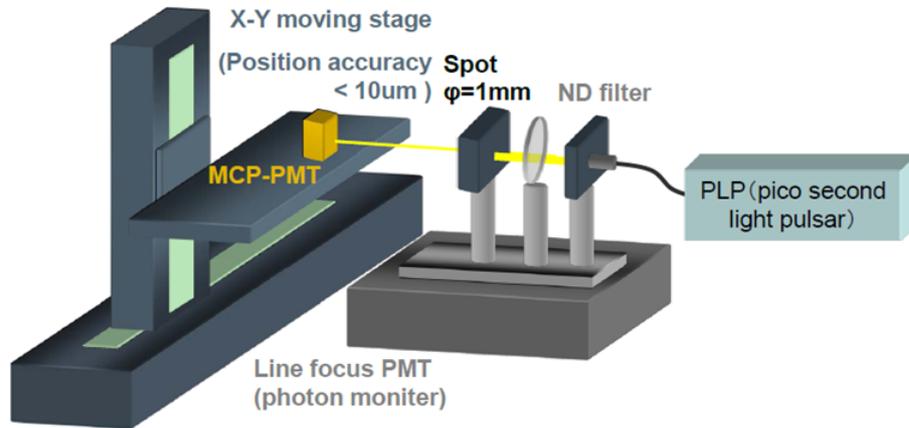


図. 4.2: 一光子特性測定システムの装置イメージ

図 4.2 のように右側のレーザーからの光が ND フィルタ、スポットを通過して MCP-PMT に照射される。測定中 MCP-PMT は左側のムービングステージに固定する。

光源

レーザーは出力時間のトリガーに対するふらつきが $\pm 2.5\text{ps}$ 、1 トリガーあたりの出力光の時間広がり $17 \pm 2\text{ps}$ のピコ秒インジェクションレーザー (アドバンスレーザーシステム社製) を使用する。レーザーの波長は中心値が $404 \pm 10\text{nm}$ 、広がりが 7nm 以下である。レーザーのトリガーレートは CLOCK のレートで 1kHz に設定してある。

レーザー光を一光子状態に減光するために用いる ND フィルターは透過率 1% 及び 10% の二枚を用いている。またスポット光は MCP-PMT の光電面上で 1mm である。

ムービングステージ

MCP-PMT の稼動台としてシグマ光機製 XY ムービングステージ (X (水平) 方向 SGSP33-200 Y (鉛直) 方向 SGSP46-300) を導入した。このステージの最小ステップ幅は X, Y それぞれ $5, 6 \mu\text{m}$ であり、位置決め精度は X, Y それぞれ $25, 20 \mu\text{m}$ である。これらはスキャンに十分な精度である。ムービングステージはコンピュータ制御可能で、測定中は 16 チャンネルをスキャンできる。

読み出し回路

測定時 MCP-PMT は電圧印加のために専用 HV プリーダーを用いる。その写真を

図 4.3 に載せた。

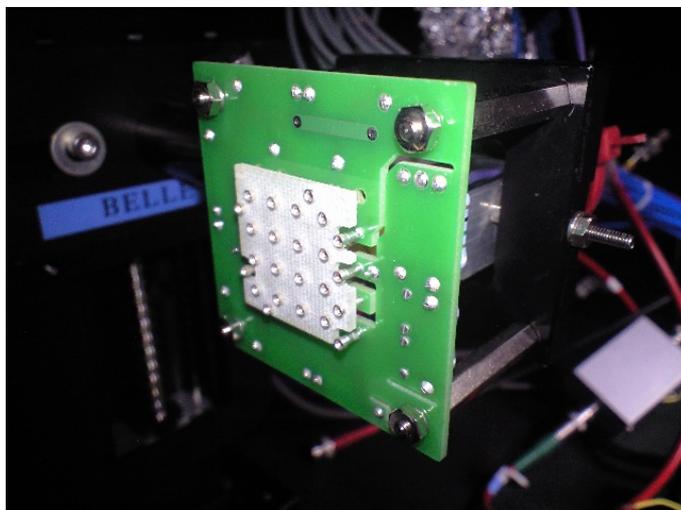


図. 4.3: HV プリーダー写真

MCP-PMT のピンを差し込む側から撮影。複数見える穴に MCP-PMT のピンを差し込んで固定できるようになっている

MCP-PMT16個のアノードから出るピンもこのプリーダーに差し込んで固定し信号読み出しができる。

プリーダーからの信号はアッテネータで 6dB 減衰させた後アンプで 38dB 程増幅する。アッテネータを挿入しているのはアンプの保護のためとアンプの出力の飽和を防ぐためである。またディスクリミネーターは閾値を 10mV に設定しているが、MCP-PMT 信号が早いために実際の閾値は 60mV である。ADC、TDC は 1 ビンがそれぞれ 0.25pC と 25ps のものを用いている。

読み出し回路の数は全部で 4 つ用意しており、上で説明したムービングステージを用いて連続 4 チャンネル測定が可能である。

4.1.3 従来のシステムの問題点と新システムの課題

従来一光子特性測定システムは 16 チャンネル同時に測定する仕組みや HV を自動で切り替える仕組み、CE を測定する仕組みが無く、さらに各特性の測定精度がきちんと押さえられていなかった。表 4.1 に従来のシステムの性能をまとめる。

量産体制に対応したシステムの構築のために上で紹介した従来のシステムに以下の改良を加えた。

全自動化と測定時間短縮

- ・ 16 チャンネル分の読み出し回路の導入
- ・ 自動操作可能な HV サプライヤーの導入

測定精度の把握

- ・ 16 個の読み出し回路のゲインキャリブレーション機能導入
CE 測定機能の導入
- ・ ハーフミラーとレファレンス PMT の導入

4.1.4 新システムの導入

新システムへの改良に伴い導入した装置や機能について説明する。

自動操作可能な HV サプライヤーの導入

コンピュータ制御が可能な HV サプライヤーとして CAEN 製 A1550 を導入した。これにより HV スキャンを自動で行えるようになった。



図. 4.4: HV サプライヤーの写真

16 チャンネル分の読み出し回路の導入

16 チャンネル分の TDC、ADC、ディスクリミネーターに加えて、信号大きさ調節のために同数のアッテネーターとアンプを導入した。アッテネータはアジレント社製可変アッテネータ 84948 を、アンプはゲイン約 37dB のコスモウェーブ社製 LNA3984WS を用いる。

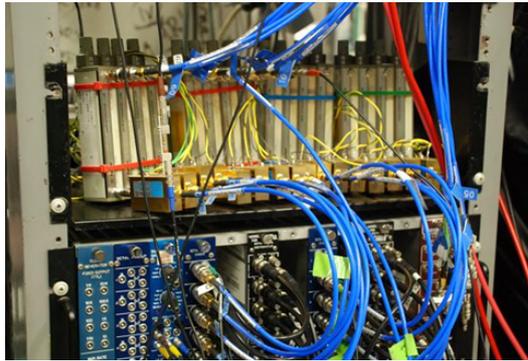


図. 4.5: 16チャンネル分のアッテネーターとアンプの写真。

読み出し回路のゲインキャリブレーション機能導入

読み出し回路のアッテネーターとアンプとADCの較正を行うために図4.6のような装置を用いた。

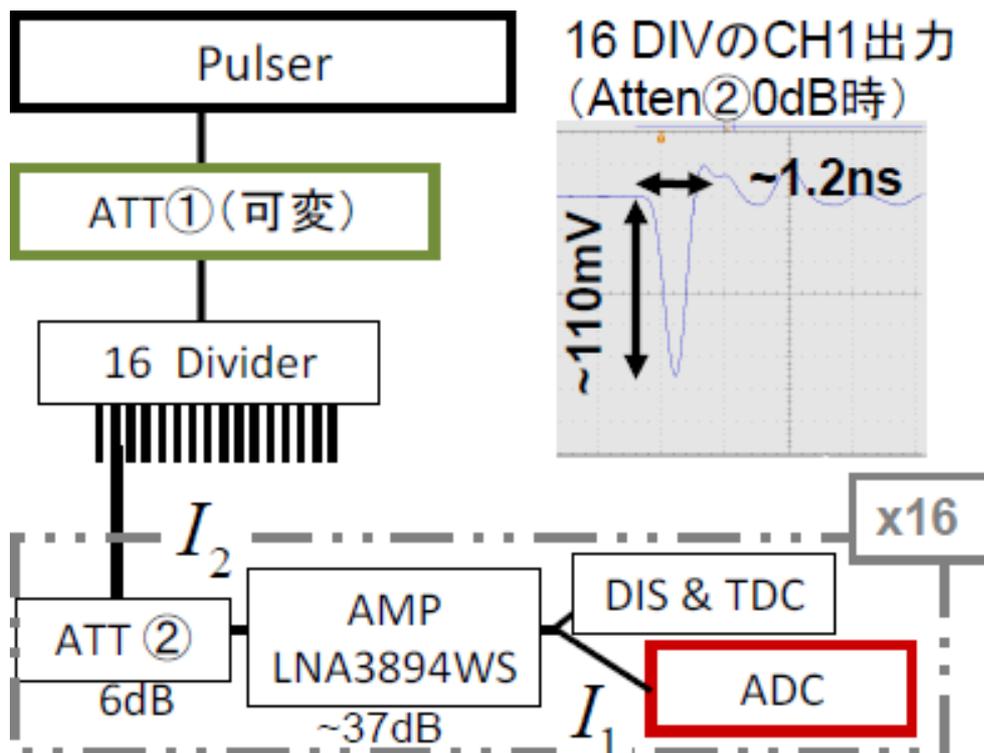


図. 4.6: 回路のゲイン測定

図4.6ではMCP-PMTの擬似パルスと16チャンネルのディバイダーを用意した。擬似パルスの信号幅は約1.2nsでMCP-PMTと同程度である。ディバイダー以降の16個の回路への入力信号にたいして出力信号 I_1 の電荷量をADCで測定する。入力信号 I_2 の大きさは可変アッテネータ(図4.6のATT 1 減衰率は0dB～

11 d B) で調整する。可変アッテネーターの減衰率比は図 4.7 に示す。 I_2 の絶対値はオシロスコープ (帯域 1.5GHz) で求める。さらに 16 チャンネルディバイダーの分割比は図 4.8 に示す。図 4.8 の 5% ほどの分割比の広がりにはディバイダーに使用する抵抗値のばらつきに由来している。

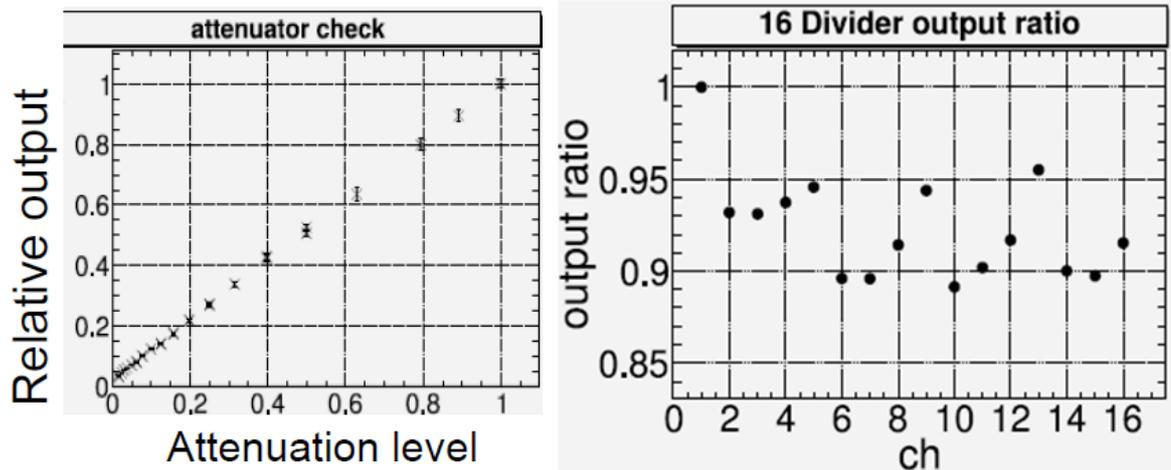


図 4.7: アッテネーターの減衰率比。横軸は可変アッテネーターの減衰率。縦軸はアッテネーターへの入力に対する出力の比。理想的には傾き 1 の直線になる。

図 4.8: 16 ディバイダーの分割比。横軸はチャンネル。縦軸はチャンネル 1 の出力を 1 とした時に相対的な出力の大きさ。

ディバイダーは図 4.9 の様に HV プリーダーに直接接続できるように設計し 16 チャンネル分の接続の手間が省けるようにした。

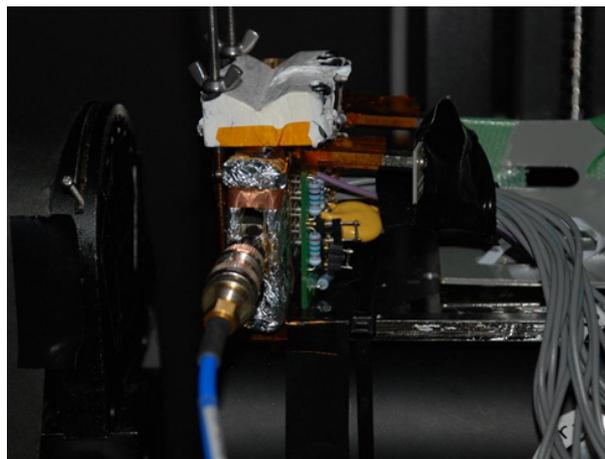


図 4.9: 16 チャンネルディバイダーからの信号をプリーダーに接続した写真。中央のケーブルの先にあるアルミ箔で包まれた箱が 16 チャンネルディバイダー。左側からプリーダーに差し込んだ図

ADC で測定する図 4.6 の I_1 の統計的不確かさは $\pm 0.35\text{pC}$ 、オシロスコープを用いた I_2 の測定の統計的不確かさは $\pm 3.6\%$ である。回路のゲイン補正の結果を図 4.10 に載せる。

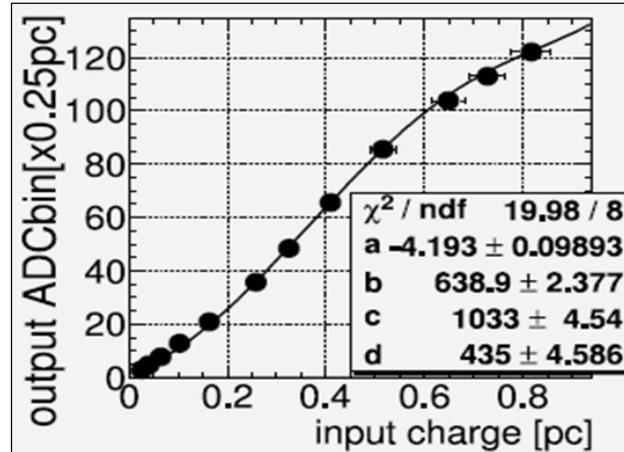


図. 4.10: 回路ゲイン補正の結果。

ある 1 チャンネル読み出し回路の入力対出力の関係。横軸は入力電荷量。縦軸は出力の ADC。

入力が大きな領域で傾きが小さくなるのはアンプの出力がこの領域で飽和し始めるからである。回路のゲインの経時変化については、毎回の一光子特性測定の前後に常に同じ大きさの信号を回路に入力することで確認している。

CE 測定機能の導入

CE は式 1.4 より検出効率と QE から求まる。QE は QE 自動測定システムで測定出来るので検出効率を測定する仕組みを考える。検出効率は照射光量と信号検出数の比であるので照射光量の把握が必要である。光量把握のために、ハーフミラーとレファレンス PMT を図 4.11 のように導入する。

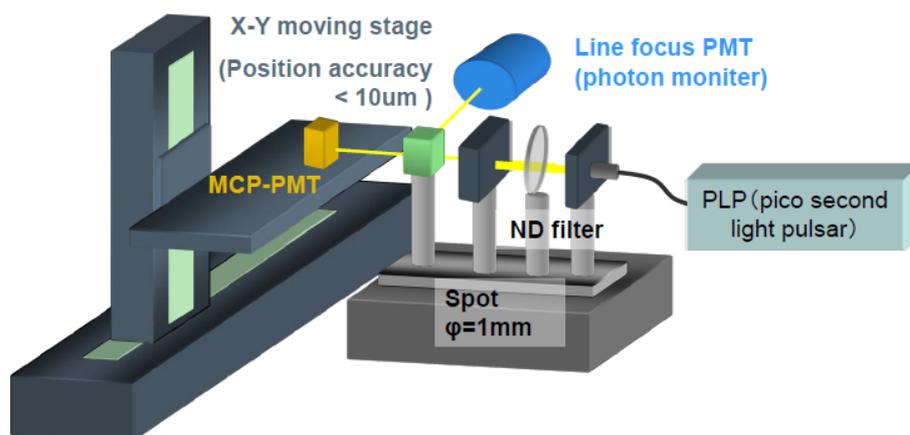


図. 4.11: CE 測定機能の導入イメージ。薄緑色の立方体がハーフミラー、青色の円筒がレファレンス PMT である。

ハーフミラーはシグマ光機製の CSCH-20-550 ハーフミラーを光軸上に導入した。透過率は $1/3$ で分割率は $5:5$ である。レファレンス PMT は浜松ホトニクス製ラインフォーカス型 PMT (H7195PX) を導入し、ハーフミラーからの光がレファレンス PMT に当たる設計にする。このレファレンス PMT は $QE=80\%$ 、 $CE=20\%$ であり、精度がそれぞれ相対的に 10% と 5% と分かっている。またレファレンス PMT に用いるディスクリミネーターの閾値はノイズレベル 2mV 信号波高数 100mV に対して 10mV に設定した。

4.1.5 組み上げたシステム

製作したシステムの装置の写真を図 4.2 に載せる。

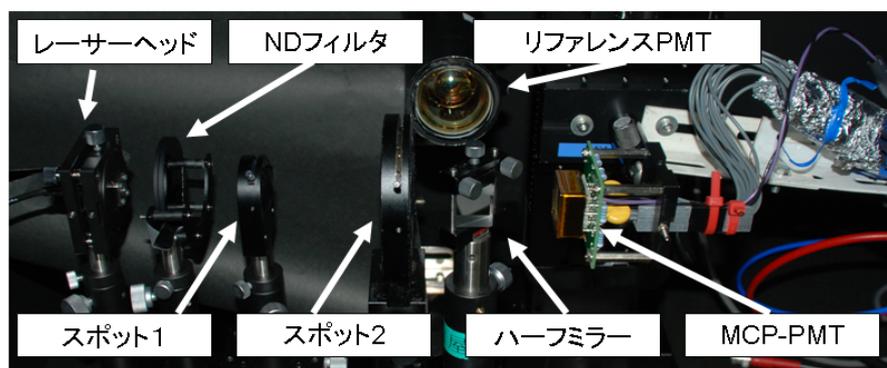


図. 4.12: 一光子特性測定システム全体写真

4.2 一光子特性自動測定システムでの測定

4.2.1 測定手順

図 4.13 に測定の手順を示す。

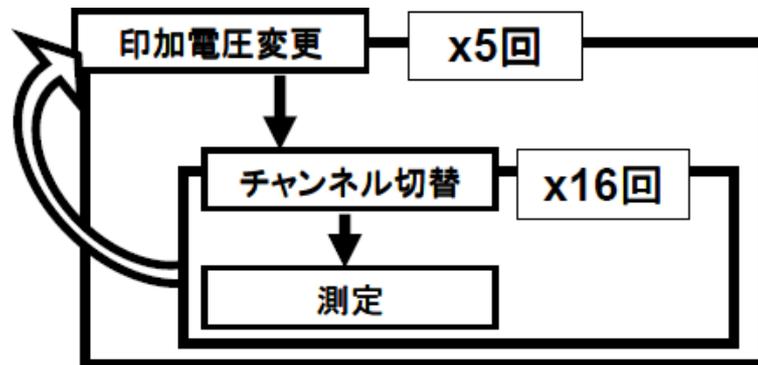


図. 4.13: 一光子特性測定の流れ

異なる 5 つの HV について 16 チャンネル分のスキャンを行う。HV は 100V ステップである。MCP-PMT 一個の測定の前には読み出し回路のゲイン補正のための測定を行う。この測定は入力信号の大きさは変えないで行う。

4.2.2 各特性の算出

ゲインの算出

測定で取得する ADC 分布 (図 4.14) の値には MCP-PMT のゲインの他に回路自体のゲインも含まれる。図 4.14 は TDC で信号領域 150 ビン=3.75ns 分をカットした。

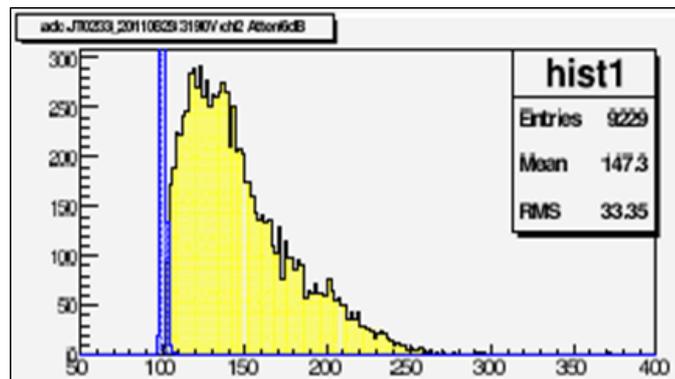


図. 4.14: MCP-PMT の測定で得た ADC ヒストグラム。
横軸 ADC1 ビン=0.25pC。黄色はレーザー由来の信号。青はペDESTALであり、中心が 100 ビンになるように補正してある。

図 4.10 を用いて回路のゲインを補正すると図 4.15 が得られる。

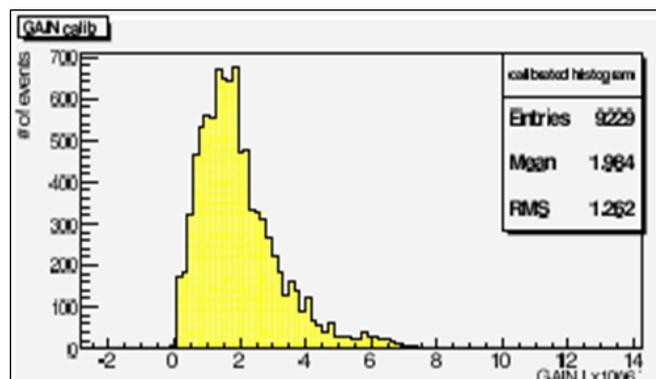


図. 4.15: 回路のゲイン補正したゲインヒストグラム。
図 4.14 の黄色成分を補正。横軸は MCP-PMT のみのゲインで単位は 10^6

図 4.15 の分布の MEAN をとって MCP-PMT のゲインとすることとする。図 4.15 ではゲインは 1.98×10^6 である。

TTS の算出

図 4.16 に MCP-PMT の TDC ヒストグラムを示す。

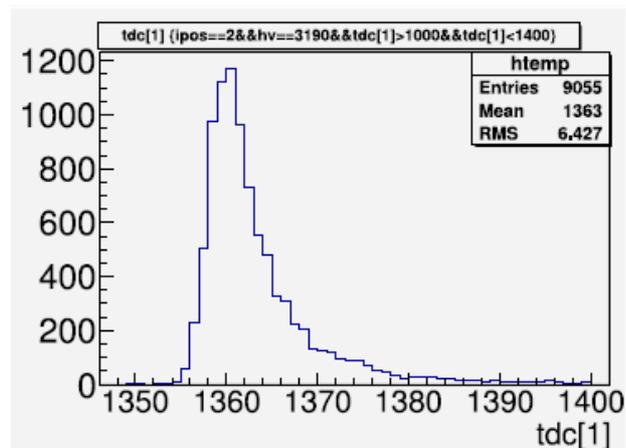


図. 4.16: 測定で得た MCP-PMT の TDC ヒストグラム。横軸は TDC1 ビン=25ps

図 4.16 のヒストグラムはタイムウォークの影響を受けている。タイムウォークとは図 4.17 のように同じ時間で立ち上がった信号でも波高の違いによってディスクリミネータの閾値を越える際に時間差が生じてしまう現象である。

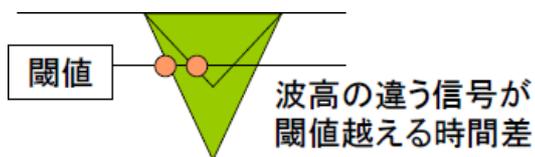


図. 4.17: タイムウォークの原理。横軸を時間、縦軸を電圧にとり、同じ時間に立ち上がった信号の波形を見ている。ディスクリミネータの閾値を越える際に波高の違いで検出時間に差が生じる。

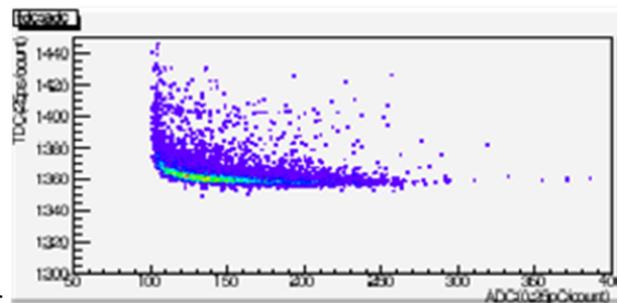


図. 4.18: TDC:ADC 分布。縦軸 TDC(1 ビン 25ps)。横軸 ADC(1 ビン 0.25ps)。

タイムウォークの影響により図 4.18 の様に TDC 対 ADC の分布を見たとき ADC が小さい領域で分布が湾曲する。(ADC はペDESTAL の中心が 100 ビンになるように補正してある)。以下の関数を用いてタイムウォークの補正を行う。

$$f = \frac{a}{\sqrt{|x - 100|}} + b \quad (4.1)$$

この関数で図 4.18 をフィットした結果が図 4.19 である。

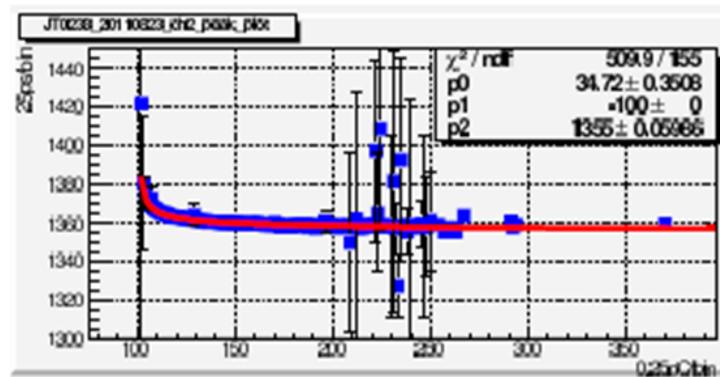


図. 4.19: タイムウォーク補正。

青のプロットは図 4.18 を ADC 各ビンごとに分割した時の TDC 分布のピークを表す。赤のラインはフィッティングした関数である。

図 4.18 から図 4.19 でフィットした関数を引くと図 4.20 となる。

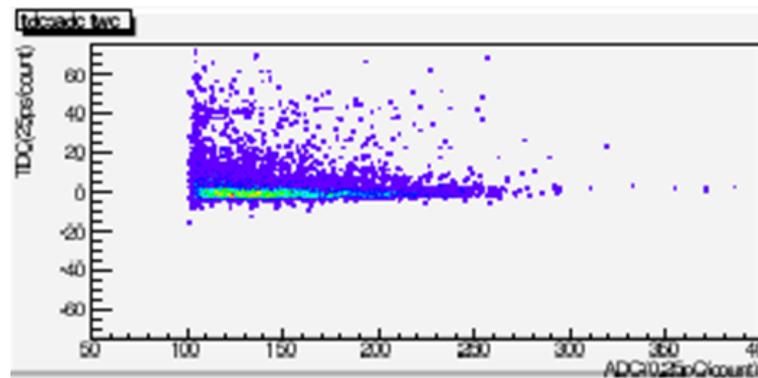


図. 4.20: タイムウォーク補正後の TDC:ADC 分布

図 4.20 の TDC だけの情報をヒストグラムにすると図 4.21 が描ける。

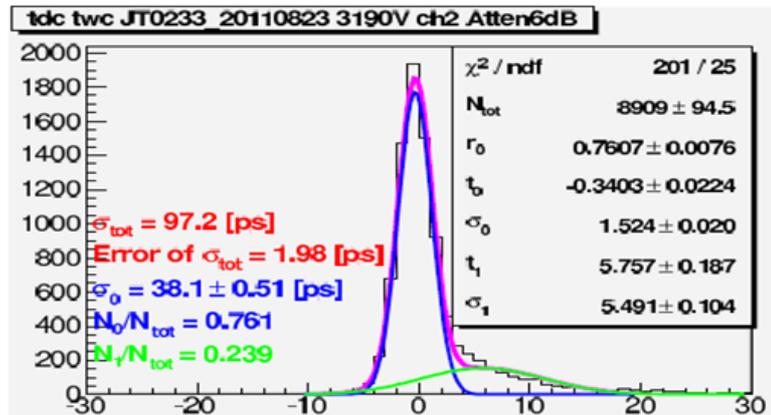


図. 4.21: タイムウォーク補正後の TDC ヒストグラムにダブルガウシアンでのフィッティングをした様子。横軸は TDC1 ビン=25ps。ピンクのフィッティングは青と緑のフィッティングを合わせたもの。また波形のピークが 0 に来るように補正してある。

図 4.21 のヒストグラムにはダブルガウシアンがフィットされている。これは図 4.21 の分布が通常増幅過程を経た信号の他に、光電面で発生した光電子が一段目 MCP の表面で後方散乱を起こした信号も含むためである。このイメージを図 4.22 に載せた。



図. 4.22: 光電子の後方散乱のイメージ。MCP-PMT の断面図。矢印は MCP-PMT に入射する光子軌道と、光電面から放出された光電子軌道を描いた。

後方散乱を起こした光電子は再び電場で引き寄せられ MCP のチャンネルに入り増幅される。後方散乱の過程を経る信号は約 100ps ほど遅れて検出される。図 4.21 のダブルガウシアン第二成分はこの後方散乱過程を想定している。先に検出された第一成分の標準偏差をとって TTS の算出に用いる。

最後にこのダブルガウシアン第一成分の標準偏差には回路の時間ふらつきとレーザーの時間広がりが含まれるのでそれらを差し引く必要がある。図 4.21 では取得した 38.1ps の標準偏差に対して、回路の時間ふらつきが 17ps、レーザーの時間広がりも同じく 17ps であるので、算出される TTS は 29.5ps になる。

ダークレートの算出

ダークレートの算出の方法を図 4.23 で説明する。

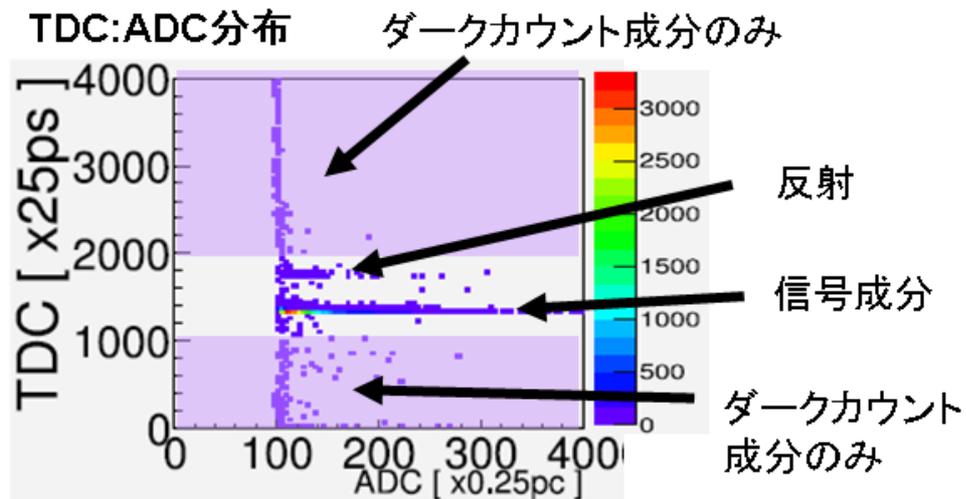


図 4.23: ダークレート算出方法。図は MCP-PMT サンプルのチャンネルにおける TDC(縦軸 1 ビン=25ps) 対 ADC(横軸 1 ビン=0.25pC) 分布である。このサンプルはダークカウントが分かりやすいようにダークレートが約 100kHz あるものを載せた。測定イベント数は 200k イベント

図 4.23 の中心に見えるのは信号成分と反射成分であり、紫の領域に見えるのがダークカウントである。この紫色の領域で検出された信号の数からダークレートを算出する。

CE の算出

CE は式 4.2 を用いて算出する。

$$CE_{mcp} = CE_{ref} \times \frac{(Hit/QE)_{mcp}}{(Hit/QE)_{ref}} \times \frac{P_{ref}}{P_{mcp}} \quad (4.2)$$

CE_{mcp}	MCP-PMT の CE
CE_{ref}	レファレンス PMT の CE
QE_{mcp}	MCP-PMT の QE
QE_{ref}	レファレンス PMT の QE
Hit_{mcp}	MCP-PMT のヒットレート
Hit_{ref}	レファレンス PMT のヒットレート
P_{mcp}	MCP-PMT への照射光強度
P_{ref}	レファレンス PMT への照射光強度

ここで CE 測定には課題がある。名古屋大学で使用しているレファレンス PMT の CE と QE の精度はそれぞれ相対的に 5% と 10% と QE の精度が悪い。これ等から MCP-PMT の CE 絶対値には相対的な不確かさが 11% 付く。残念ながら現在もレファレンス PMT の QE の精度より較正は完了していない。さらに P_{ref}/P_{mcp} の精密確認も未完了である。これにより CE の絶対値の精度より測定には問題があり、課題として残す。展望としては P_{ref}/P_{mcp} は 1~2% の精度で測定し、レファレンス PMT の QE は名古屋の QE 自動測定システムを用いれば相対誤差約 2% 以内で較正が可能である。レファレンス PMT の CE を 5% 以内の精度で較正すれば目的の精度での MCP-PMT の CE 絶対値測定が可能である。

本研究では量産品間の相対的な CE を評価する。相対的な CE を rCE と定義すると式 4.3 の様に表される。

$$rCE_{mcp} = \frac{(Hit/QE)_{mcp}}{Hit_{ref}} \quad (4.3)$$

Hit_{mcp} は図 4.15 のイベント数から、 QE_{mcp} は QE 測定の結果から、 Hit_{ref} は図 4.24 のレファレンス PMT の TDC 分布より信号領域 (波形のピークを中心に 400 ビン=10ns) のイベント数からダークカウント数を引いて求める。

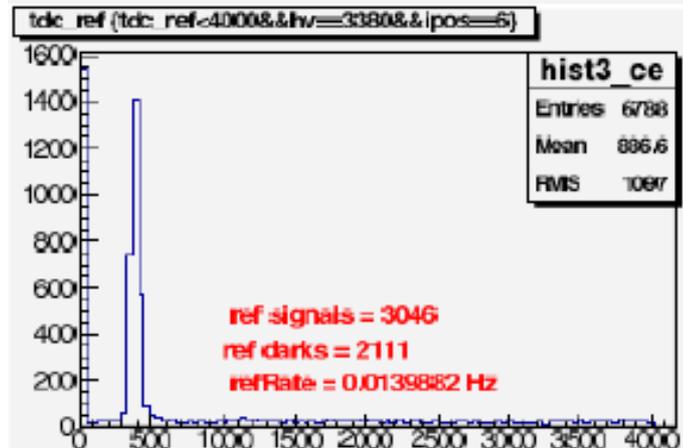


図. 4.24: レファレンス PMT の TDC ヒストグラム。横軸は TDC(1 ビン=25ps)。500 ビンあたりに立つレーザー由来の信号と、周りに平たく伸びるダークカウントが見られる。ダークカウントを差し引くと 3000 イベントほどになる。0 ビンに立つイベント TDC のスタート時点で既にストップが立ち上がっていたダークノイズ由来のイベントである。

4.3 一光子特性自動測定システムの性能の確認

製作したシステムが量産に対応したシステムとして完成したことを確認する。確認は測定速度の実測と測定の不確かさの見積もりをもって行う。さらに浜松ホ

トニクスでの測定結果との比較も行う。

4.3.1 測定時間の実測

測定時間実測の結果より全行程 6 時間で測定が可能であることが分かった。内訳としては 16 チャンネルスキャンに約 70 分かかり、これが 5HV 分ある。これは目標の 12 時間以内の測定要求を満たす。またこの 6 時間には自動測定の前後で行う毎回の回路のゲイン補正のための測定も含まれている。回路のゲイン補正の測定は前後合わせて 3 分以内に終わる。

4.3.2 測定精度の見積もり

ゲインの測定精度

ゲイン測定で考えられる不確かさの要因

□ADC 分布の中心値の不確かさ

補正後の ADC 分布の中心値の統計的な不確かさを見積もると $\pm 0.7\%$ であった。

□長時間の渡る測定の繰り返し精度

長時間に渡り繰り返しゲイン測定した時の結果の再現性確認を行った。その結果を図 4.25 に示す。

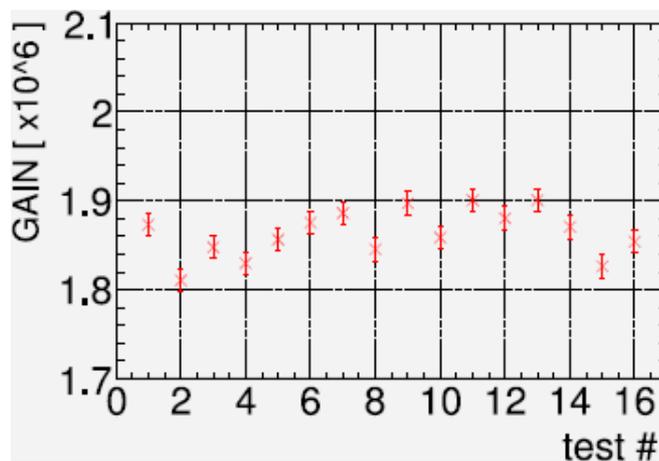


図. 4.25: ゲイン再現性の確認。

測定には JT0343 を使用。横軸はテスト番号。エラーバーは統計的不確かさ。

HV を印加して一時間以上時間が経過した PMT のゲインを 30 時間に渡って (等間隔ではないが) 測定することでゲインの再現性を確認した。測定には JT0343 のチャンネル 2 を使用した。ゲインのふらつきは標準偏差で 1.4% となった。ふら

つきの原因は分かっていない。この 1.4% の不確かさは HV の 1~2V のズレで説明できるが、HV の長時的安定性などはまだ未確認である。

□ オシロスコープの系統的な不確かさ

回路のゲイン補正時にパルサーからの信号の大きさを測定するオシロスコープには仕様で電圧測定値に系統的に $\pm 3\%$ の不確かさが付いている。

□ HV モジュール由来の系統的な不確かさ

HV モジュールの仕様で出力 HV に付く系統誤差 10V ~ 12V からゲインの系統的な不確かさが 5% を見積もる。

□ 回路ゲイン補正のフィッティングの不確かさ

16 個ある回路のゲインの補正時は図 4.10 の様に回路への入力信号と出力信号の関係を用いた。このフィッティングの統計的不確かさ $\pm 1.3\%$ 。

□ アンプゲインの周波数特性

図 4.26 に示すようにアンプのゲインの周波数特性は一定ではない。

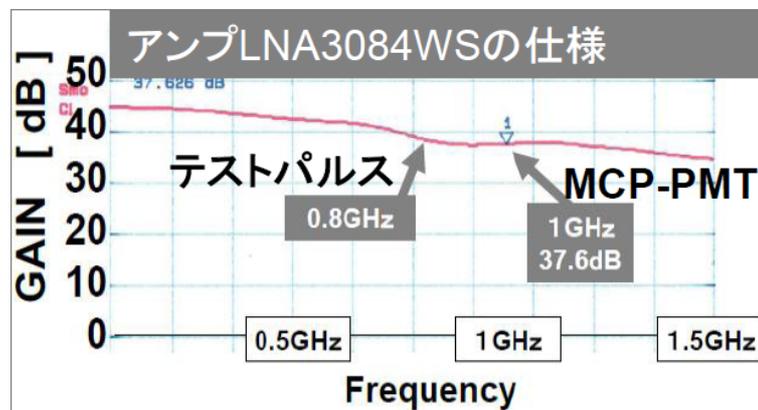


図. 4.26: アンプのゲインの周波数特性

MCP-PMT とテストパルスの信号幅の逆数をとるとそれぞれ 1GHz、0.8GHz 程になる。これらを図 4.26 に矢印で示した。両者の間には 1~2db 程の差がある。回路のゲインを補正するにはこの差を考慮せねばならない。この差は図 4.15 の中心値の読み取りで取得したゲインを 20% 程低く見積もる方向に作用する。この補正としてゲインの算出時は取得ゲインを 20% 増加させて評価する。

□ ゲインの不確かさ見積もりまとめ

以上の主な不確かさの要因からゲインには 1.4% の統計的不確かさと 6% の系統的な不確かさを計上する。系統誤差の中でアンプの周波数特性に由来する不確かさ

が明確ではない。アンプの周波数特性に由来する不確かさの見積もりと、周波数特性がよいアンプの導入が課題である。

TTS の測定精度

TTS 測定の不確かさの要因として以下があげられる。

□ ダブルガウシアンフィッティング由来の不確かさ

TDC 分布にダブルガウシアンフィッティングする際の統計的不確かさが $\pm 0.5\%$

□ 長時間に渡る測定の繰り返し精度

長時間に渡る繰り返し測定を行った際に現れる不確かさを確認する。上で見積もったダブルガウシアンフィッティングの統計的な不確かさにはタイムウォーク補正のフィッティングの影響は考慮されていない。繰り返し測定によってタイムウォーク補正のフィッティングとダブルガウシアンフィッティングを合わせたとき起こる不確かさを見積もることが出来る。PMT の TTS を 30 時間に渡って (等間隔ではないが) 測定した結果を図 4.27 に示す。測定には JT0343 のチャンネル 2 を使用した。

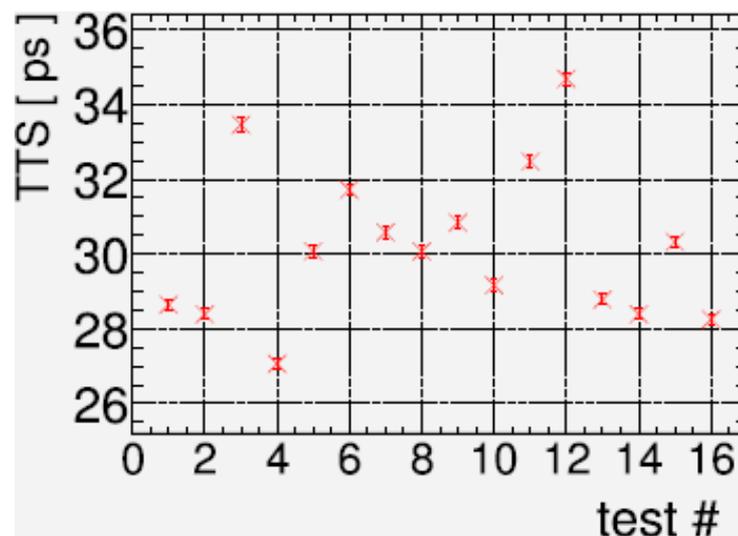


図. 4.27: TTS 再現性の確認。

測定には JT0343 を使用。横軸はテスト番号。エラーバーは統計的不確かさ。

TTS のふらつきは標準偏差で 2.04ps となった。

□ 回路の時間ふらつき

読み出し回路の時間ふらつきが $17 \pm 1.7\text{ps}$

□ レーザーの時間広がり

レーザーの時間広がりが $17 \pm 2\text{ps}$

□TTS の不確かさの見積りのまとめ

以上を基に考え統計的不確かさが 2ps、系統的不確かさが 2ps である。これ等は目標であった 5ps 以下を満たす精度である。

ダークレートの測定精度

数 10kHz のダークレートに対して統計的不確かさが $\pm 5\%$ である。これは目標としていた 25% より十分小さい。

CE の測定精度

CE 測定の不確かさの要因を以下に挙げる。

□ 統計的不確かさ

本システムで取得イベント数は MCP-PMT が 7000 ~ 1300 個、レファレンス PMT が 3000 個程度なので統計的相対誤差は 2% 程である。

□ 繰り返し測定での再現性

長時間に渡る測定に現れる統計的な不確かさを確認した結果を図 4.28 に示す。測定は 3 日間に渡った。

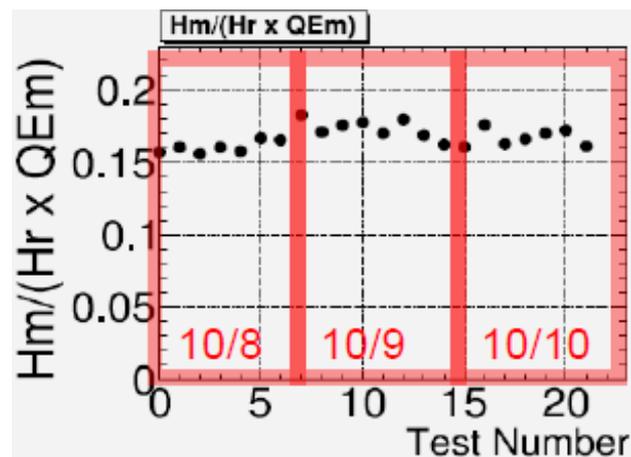


図. 4.28: CE 再現性の確認。縦軸の値は相対的な CE 値として定義した rCE。横軸は実験番号。縦軸のエラーバーは統計的不確かさとして見積もった 2%。測定には ID:JT0195 の ch6 を使用。

CE のふらつきは標準偏差で相対的に 4.5% であった。この原因は確認できていない。

□ レファレンス PMT 由来の不確かさ

既に述べたがレファレンス PMT の QE と CE の精度はそれぞれ相対的に 10% と 5% である。これ等は CE の絶対値の測定にのみ影響する。

□ CE のゲイン依存性

検出光子数用いる QE 測定では、MCP-PMT の信号がディスクリミネーターの閾値を越えるゲインを持つ必要がある。CE 値はゲインに依存する。その様子を図 4.29 に示す。

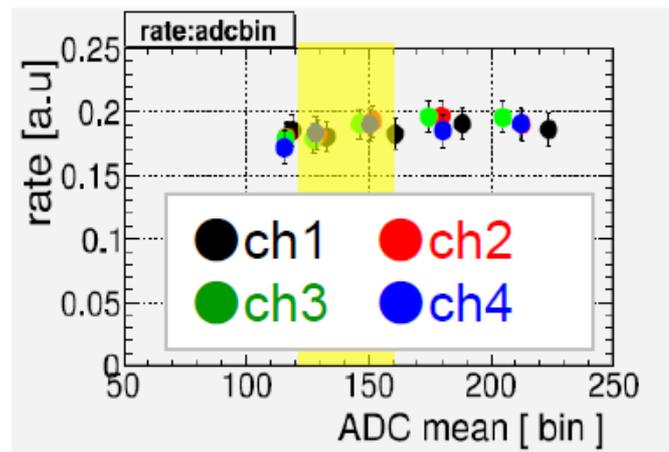


図. 4.29: CE のゲイン依存性の確認。測定には ID:JT0286 を使用。縦軸の値は相対的な CE 値として定義した rCE、横軸は HV を変化させた時の MCP-PMT からの出力信号の ADC の MEAM(1 ビン=0.25pc)。縦軸のエラーバーは統計的不確かさとして見積もった 4.5%。黄色い領域は測定に用いる可能性のある領域

ある値まではゲインを上げていくとディスクリミネーターの閾値を越える信号数に伴って CE も増加する。さらにゲインを上げ、すべての信号が閾値を越えるようになると CE は一定となりそれ以上増加しなくなる。全測定値の広がりを標準偏差を用いて表すと 3.7% とりほとんど上で見積もった 4.5% の再現性内に収まる。CE のゲイン依存性による不確かさは統計エラーよりも小さいことが分かった。

□CE の不確かさ見積もりまとめ

以上の不確かさの要因から、相対的な CE には統計的な不確かさ 4.5% と系統的な不確かさ 11% を見積もる。相対的な CE に効いてくるのは前者の統計的な不確かさのみである。絶対値測定には課題が残る。

4.3.3 新旧システムの比較とまとめ

一光子特定自動測定システムの性能をまとめると表 4.1 の様になる。

新旧	速度 [/PMT 一個]	精度	機能
旧	11 時間	TTS -	・ 4 チャンネル分のみ 連続自動測定可能
		ゲイン -	
		ダークレート -	
-	-	CE -	サンプリングテスト
新	6 時間	TTS $\pm 2\text{ps}$ (統計) $\pm 2\text{ps}$ (系統)	・ 16 チャンネル \times 5 HV 分 連続自動測定可能
		ゲイン $\pm 1.4\%$ (統計) $\pm 6\%$ 以上(系統) 課題	
		ダークレート \pm 約 5%	
		CE $\pm 4.5\%$ (統計誤差) $\pm 11\%$ (系統誤差) 課題	

表. 4.1: 新旧システムの性能確認まとめ

新システム構築には3つの大きな改善がある。一つは16チャンネル \times 5HVの自動測定自動化を可能にしたことである。これは16チャンネル分の読み出し回路とコンピューター制御が可能なHVサプライヤーの導入により実現した。二つ目は測定精度の把握を行ったことである。このために16チャンネル分の回路ゲインの補正機能などが追加された。三つ目はCE測定機能を導入したことである。ハーフミラーとレファレンスPMTの導入を行った。

新システムの課題としてはアンプゲインの波長特性由来の不確かさが不明確であること、CEの絶対値測定の手法が確立していないことが挙げられる。

一部の測定精度には課題が残るが12時間以内に16チャンネル \times 5HV分のゲイン、TTS、ダークレート、CEの測定を自動で行える装置を構築した。

4.3.4 浜松ホトニクスとの測定結果との比較

浜松ホトニクスとの測定の比較を行った。比較できるのは浜松ホトニクスで測定を行っているゲインとダークレートである。比較には2011年8月に生産された量産品PMT7個を用いた。

まずゲインの比較結果を図4.30に示す。

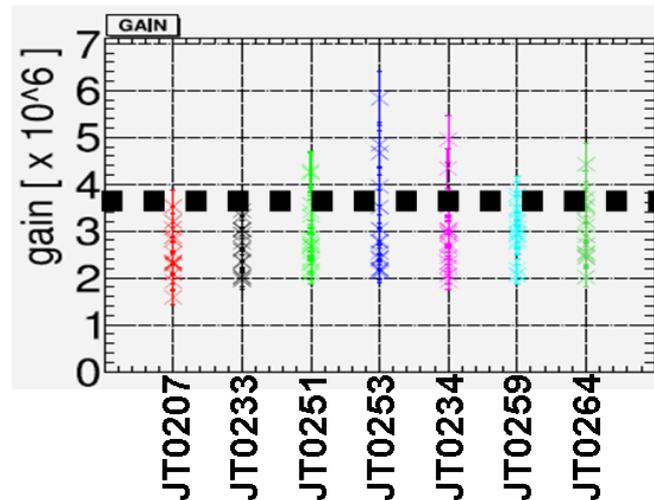


図. 4.30: ゲイン測定の浜松ホトニクスとの比較。横軸は各量産品 MCP-PMT の ID、縦軸はゲインである。浜松ホトニクスの 3.6×10^6 の測定結果を黒の点線、名古屋大での測定を色つきの × 印で示した。名古屋大での測定結果は 16 チャンネル分をプロットしてある。

名古屋大での測定は浜松ホトニクスが $(3.6 \pm 0.5) \times 10^6$ のゲインを保証する HV を印加して行った。そのため図 4.30 では浜松ホトニクスのデータとして 3.6×10^6 のゲインにラインを引いた。名古屋大での測定結果の平均ゲインは中心値が 2.9×10^6 となり系統誤差が精度よくみつもられていない。結果 20% 程浜松ホトニクスの方が大きい結果となった。この差の原因は分かっていない。浜松ホトニクスではマルチフォトンが PCM-PMT に照射したときの電流値を用いて測定を行っている。差の原因は測定手法の違いに起因する差かもしれない。名古屋大のアンプの周波数特性由来の不確かさが大きい可能性もある。

次にダークレートの比較結果を図 4.31 に示す。

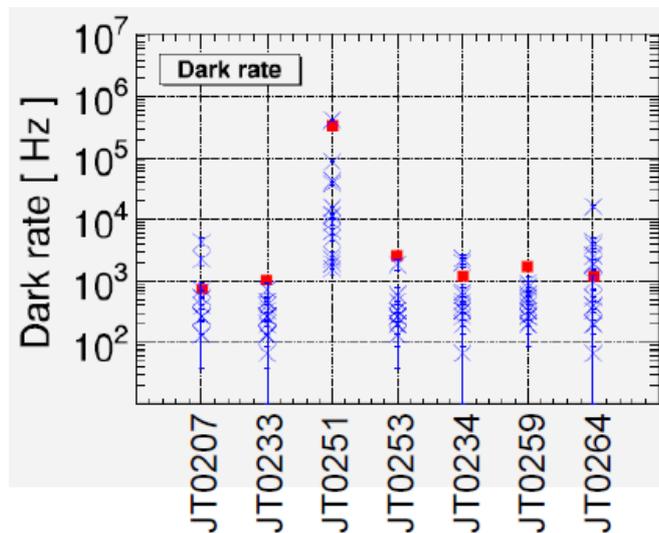


図. 4.31: ダーク測定 of 浜松ホトニクスとの比較。青色=名古屋大。赤色=浜松ホトニクス。名古屋大での測定 of 各点は 16 個 of チャンネルに対応。また浜松ホトニクス of 測定は 16 個 of チャンネルを導通して一度に読み出した結果。

図 4.31 を見ると赤 of 浜松ホトニクス of プロットが名古屋大 of 測定結果 of 上端を表すような結果となった。また ID : JT0264 の様に名古屋大 of 測定で一部 of チャンネル of ダークレートが極端に浜松ホトニクス of 結果よりも大きいものも存在する。これは測定手法に起因する差と考えられる。浜松ホトニクス of ダークレートは 16 個 of アノードから一度に読み出した電流値を基に求めている。そのため 16 チャンネル分 of ダークレートであると共にチャンネル間 of クロストークの影響を受けない。これらの理由から浜松ホトニクス of 結果は基本的には名古屋大 of 各チャンネル of 和に相当し、また名古屋大 of 測定はクロストークをカウントする分一部 of チャンネルでダークが多いと考えれば測定結果 of 違いは妥当である。

第5章 初期量産品の測定

2011年3月から11月までに生産された33個の初期量産品の測定を行った。測定は選別と較正の他に品質を把握し量産にフィードバックをかけることで初期量産体制を調整する意味を持つ。

実際は33個のMCP-PMTは全てがTOPカウンター実機用に生産されたものという訳ではなく、その内21個は2011年12月に行われたビームテストに使用するために特別に生産されたものであった。ビームテスト用の21個のMCP-PMTは一部例外を除き光電面の素材がSBAではなくSbNaKで出来ている。この理由としてビームテスト前に初期量産品に低QEの問題が見つかったことが挙げられる。生産体制の調整には時間がかかるため、生産が比較的安定なSbNaK光電面での臨時生産を行った。この試験品21個はTOPカウンターに使用する可能性は無いが、光電面以外は通常の量産品同様に製作されている。そのためこれ等の性能測定は量産品の品質を把握することとほぼ等しい。

この章では初期量産品の性能測定と、結果から量産品の低QEと放電の問題を明らかにしたことについて述べる。

5.1 QE測定結果

QEの測定結果から、量産品のQEが全体的に要求よりも低いことが分かった。選別基準別に結果をまとめると表5.1の様になる。

表. 5.1: QE選別結果一覧

測定項目	条件を満たす個数	平均
波長360nmの光電面平均QE	24%以上が 1個/12個	20%
面一様性	70%以上が 9個/12個	72%
QEの局所的な欠陥によるチャンネルQEの損失	20%以下が 9個/12個	-

TOPカウンター用にSBA光電面を用いて生産されたMCP-PMT12個は360nmの波長において平均QEが24%の目標を満たすものが1個しかなくQEに問題があることが分かった。波長360nmでの光電面上平均QE値を12個分で光電面

平均すると 20% であった。また面一様性の評価では目標の 60% を満たすものが 12 個中 9 個存在した。平均的な面一様性は 72% であった。60% を満たさなかった 3 個の内一つはエアリークを起こした疑いがあり、残りの二つは光電面上の局所的な QE の欠陥により 30% 近く平均 QE を損失しているチャンネルが確認された。量産開始直前の MCP-PMT は選別基準を満たしていたが量産品で低 QE の問題が起こったことから、生産に不具合が生じていると判断した。この結果を生産にフィードバックし、製造パラメータの調整など生産体制の見直しを要求した。

以下にはビームテスト用の 21 個も加えた 33 個の測定の内、代表的な図を載せる。

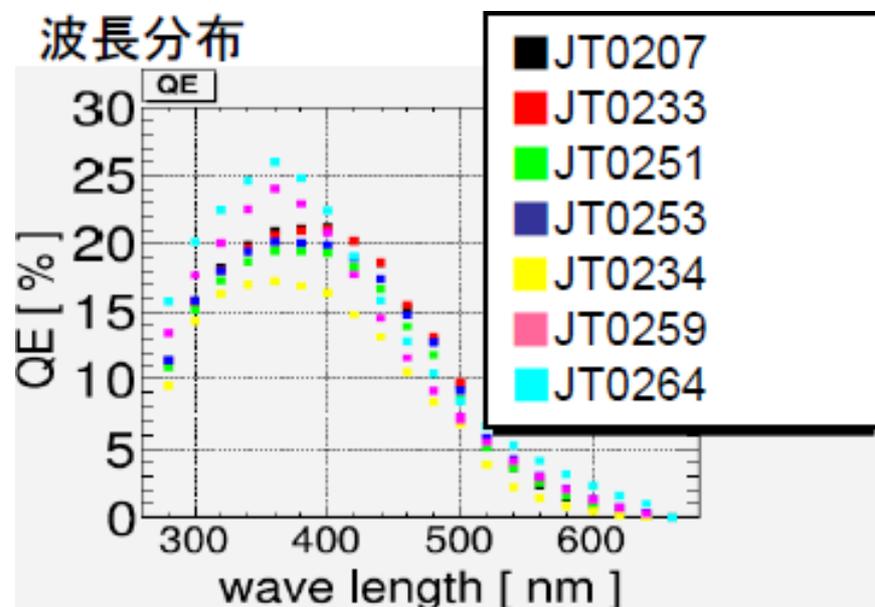


図. 5.1: 量産品 MCP-PMT の光電面平均 QE の波長分布。JT のつく番号は MCP-PMT の ID。JT0259 と JT0264 のみ光電面が SbNaK。他は SBA 光電面。

JT0234 400nm JT0264 400nm

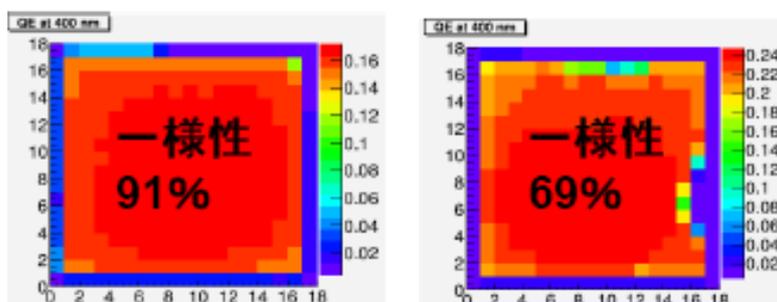


図. 5.2: 量産品 PMT の QE の光電面位置情報

SBA 光電面と SbNaK 光電面で QE 波長分布が異なる。SBA 光電面は 300nm から 500nm にかけての分布が大きく 600nm など長波長側の感度が小さい。SbNaK 光電面は 360nm に鋭いピークをもち長波長領域でも SBA 光電面と比べてわずかに感度が大きい。

また図 5.2 は面一様性のいい個体と QE に欠陥のある個体の様子が分かる図を載せた。

以下の図 5.3 には量産品の製造日と QE の関係を示す。

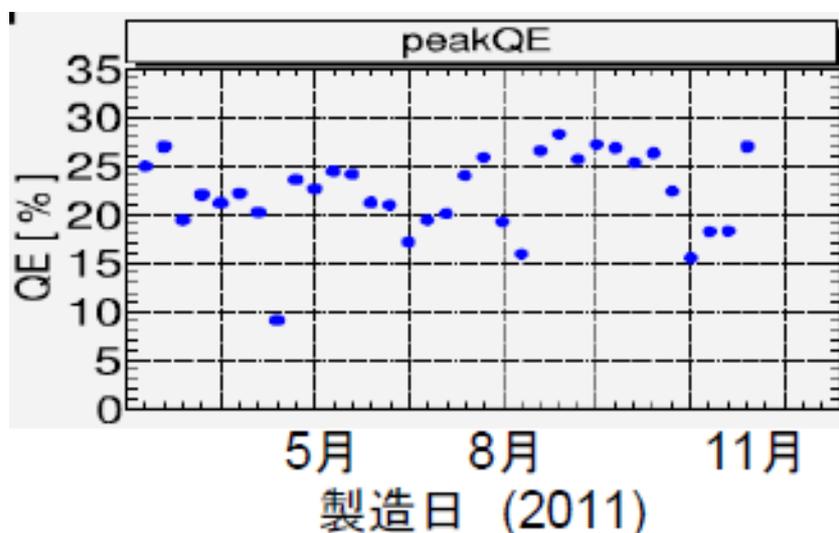


図. 5.3: ピーク波長での光電面平均 QE の遷移

各点は量産品 MCP-PMT のひとつひとつに対応し、縦軸は最も QE の高い波長（今回は二種類の光電面が混在するため）での光電面平均 QE である。SbNaK 光電面の PMT を合わせたとしても 24% 以上の MCP-PMT は 14 個しかないことが

分かる。

5.2 ゲインとダークレートの測定結果

量産品のゲインとダークレート両方の結果を考慮し動作電圧の決定を行う。

図 5.4 と図 5.5 にゲインとダークレートの HV との関係性を表す。

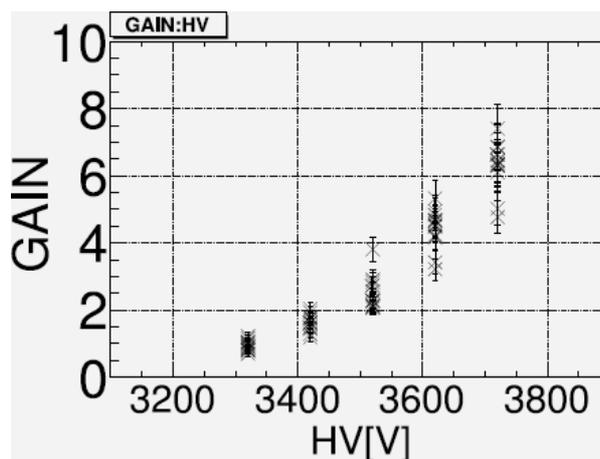


図. 5.4: ID:JT0164 の 5HV 分のゲインのデータ。縦軸の単位は 10^6

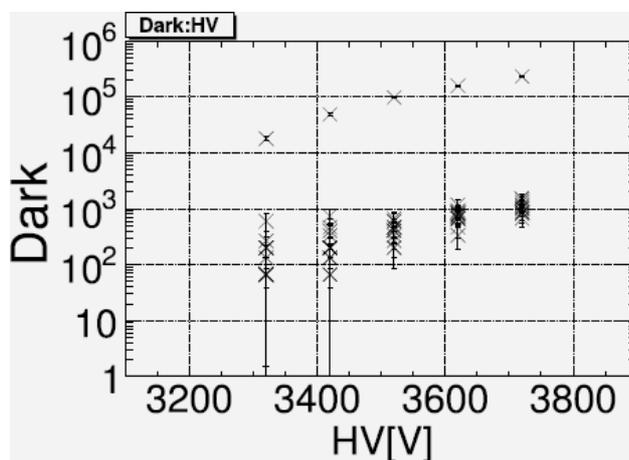


図. 5.5: ID:JT0164 の 5HV 分のダークレートのデータ。縦軸の単位は Hz

図 5.5 に示した ID:JT0164 は 1 チャンネルだけダークレートが高いことが特徴的であった。 2×10^6 を満たすゲインを得たい要求とダークレートを 100kHz 以下に抑えたい要求から HV は - 3520V が最適動作電圧であることが分かる。放電し

ない27個の量産品の内、測定結果からダークレートが100kHzを越えない範囲で平均ゲインが 2×10^6 を満たさないものは2個もあった。

量産品のチャンネル別のゲインのデータの例を図5.6に示す。また、図5.7には量産品7本分のゲイン測定結果の例を紹介する。これ等はゲイン平均が 2×10^6 以上になる動作電圧でのデータである。図中全個体が選別要求を満たしていることが分かる。

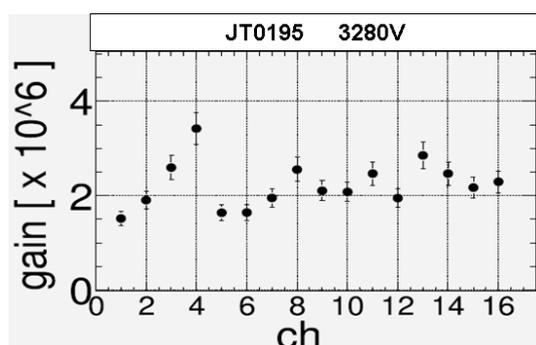


図. 5.6: 動作電圧でのチャンネル別のゲイン

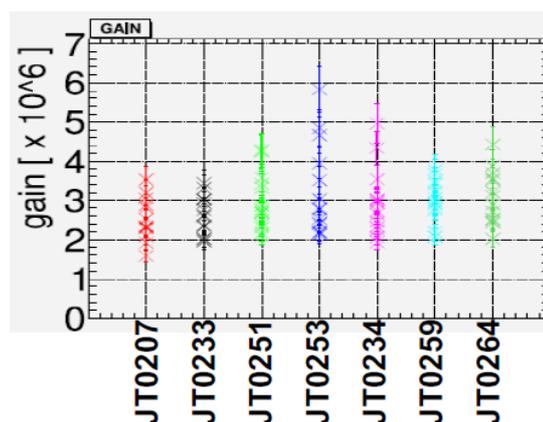


図. 5.7: 動作電圧での MCP-PMT 別ゲイン

さらに動作 HV における量産品のチャンネル別のダークレートのデータの例を図5.8に示し、図5.9には量産品7本分のダークレートの測定結果例を紹介する。

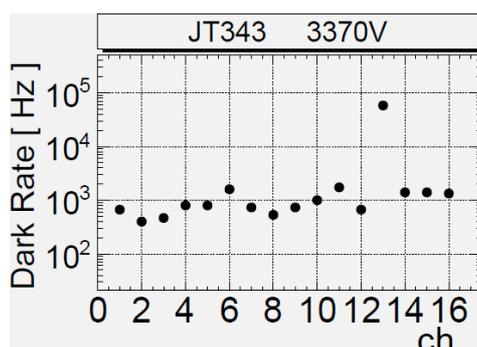


図. 5.8: 動作電圧でのチャンネル別のダークレート

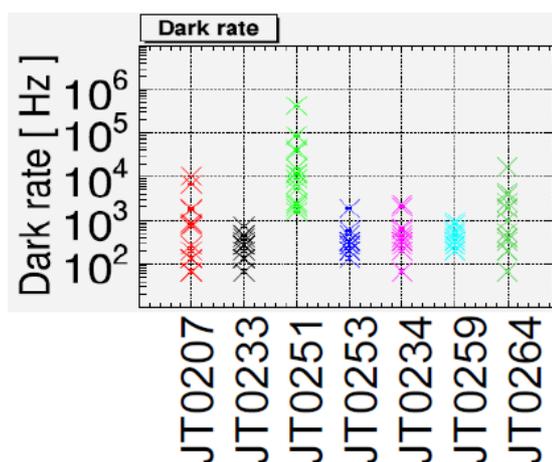


図. 5.9: 動作電圧での MCP-PMT 別ダークレート

図5.8に例としてあげたID:JT0343は1チャンネルだけダークレートが高いのが

特徴的である。また図 5.9 に見られるように量産品のダークレートは平均的には 1kHz 弱辺りに調整できるが、MCP-PMT によっては ID:JT0251 のように 100kHz を越えるダークレートを持つ個体も存在した。この JT0251 は TOP カウンターには使用できないと判断した。

5.3 TTS 測定結果

量産品の TTS は初期量産品の 33 個の内 27 個において 50ps 以下の要求を満たした。残りの 6 個は放電の疑いがありシステムでの測定を断念した。量産品の TTS のチャンネル別のデータの例を図 5.10 に示す。また、図 5.11 には量産品を代表した 7 本分の TTS の測定結果を紹介する。図 5.11 では各点が各チャンネル別の TTS を表す。

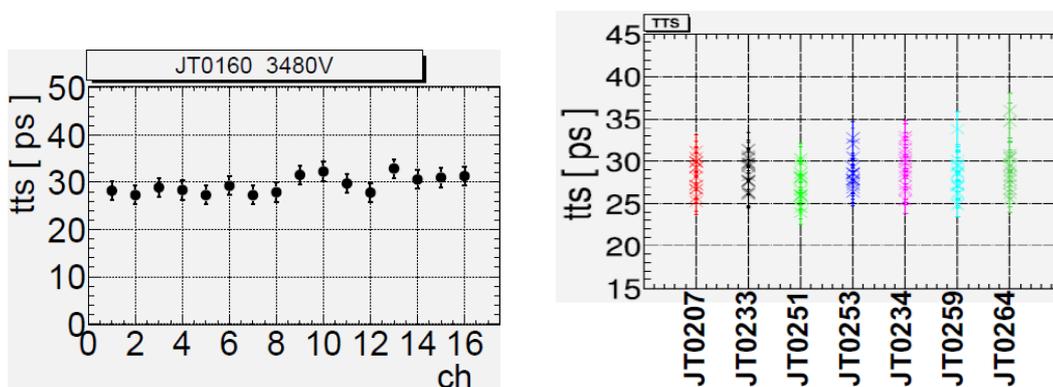


図. 5.10: 動作電圧でのチャンネル別の TTS 図. 5.11: 動作電圧での MCP-PMT 別の TTS。
横軸は MCP-PMT の ID

33 本の初期量産品の TTS はおおよそ図 5.11 と変わらない。どの MCP-PMT も 30ps 前後に分布する結果となった。システムでの測定を通し、量産品に TTS の問題は無いことが分かった。

5.4 量産品間の相対 CE の測定結果

CE は量産品間の相対的な値のみ測定しているが、その結果を図 5.12 に載せる。

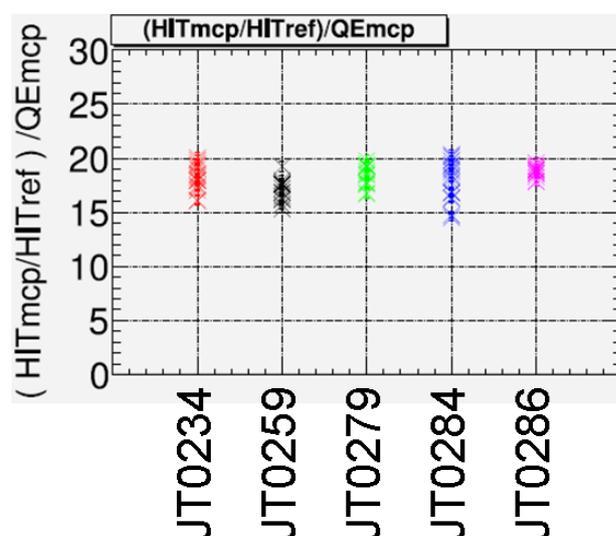


図. 5.12: 量産品間の相対 CE。縦軸は量産品間の相対 CE。各点は 16 個のチャンネルに対応。

CE 測定の機能は量産品の測定が開始してから追加したため一部の MCP-PMT での確認しか済んでいない。図 5.12 の 5 個の MCP-PMT の相対的な CE の広がりを標準偏差で評価すると中心値に対して相対的に 7% の広がりを持つことが分かった。この 7% には測定システムの 5% 程の測定の不確かさが含まれるのでそれを考慮すると、MCP-PMT の CE 値の広がりは 5% 程であると見積もられる。今後は他の量産品についても CE 値を確認する。相対値測定の精度向上により今後更に精密な検証を行うことも課題である。

5.5 初期量産品測定結果まとめ

測定結果を図 5.2 にまとめる。

表. 5.2: 初期量産品選別まとめ

特性と選別基準	TOP 用量産品	ビームテスト用試験品
[QE] 波長 360nm での QE が 24% 以上	1 個/12 個	13 個/21 個
[ゲインとダークレート] 平均ゲイン > 2×10^6 かつ ダークレート < 100kHz	10 個/12 個	15 個/15 個 6 個/21 個は放電で測定不可
[TTS] TTS < 50ps	12 個/12 個	15 個/15 個 6 個/21 個は放電で測定不可
全特性での選別	0 個/12 個	11 個/21 個

初期量産品の測定を通し、全選別基準で量産品を評価した時 TOP カウンターに使用出来る量産品は無いことを明らかにした。内訳を見ると基準を満たさない主な原因は低 QE にあることが分かる。またビームテスト用に生産された MCP-PMT に放電が多いことは、システムでの測定をする前の簡単なチェックで確認された。一方で TTS の選別基準は全ての MCP-PMT が満たし、ゲインとダークレートにおいてもほとんどの MCP-PMT が基準を満たせることが分かった。低 QE と放電の問題について浜松ホトニクスでの生産へフィードバックを行い生産の見直しを要求した。

第6章 結論

本研究ではTOPカウンター用MCP-PMT量産品の性能測定システムの構築により、量産品MCP-PMTの選別と較正を行う仕組み、またその性能を生産にフィードバックし量産を円滑に進める仕組みを整えた。さらに初期量産品に対する性能評価を実施した。

本システムではQE、ゲイン、TTS、ダークレート、CE、を測定することを目的とする。要求として12時間以内にPMT一個が測定できる速度の他、以下の測定精度が必要であった。

QE	± 5%(相対)
ゲイン	± 10%
TTS	± 5ps
ダークレート	± 10%
CE	± 5%(相対)

これ等を基にQE自動測定システムと、ゲイン、TTS、ダークレート、CEを測定する一光子特性自動測定システムを構築した。

QE自動測定システムでは照射光に対する出力電流からQEを算出するというMCP-PMT開発時代からの測定手法を応用した仕組みを構築した。旧システムでは測定速度や測定精度、自動化に課題があったが、新システムでは1.7%以内の精度でQEを較正したフォトダイオードをレファレンスに用いることで2.0%程の測定精度を実現し、さらに分光器自動駆動装置やフォトダイオード回路への配線自動切換えスイッチの導入したことで9時間半の自動測定を可能にした。これ等の性能は要求を十分に満たすものである。

一光子特性自動測定システムでも基本的な測定原理は旧システムを受け継ぎ、時間広がり17psのレーザー光を一光子状態に減光してMCP-PMTに照射したときの出力信号から各特性を算出する仕組みを構築した。旧システムでは全16チャンネル×5HV分の測定自動化に課題があったが、新システムでは16チャンネル分読み出し回路の導入とコンピュータ制御が可能なHVサプライヤーの導入により6時間の自動測定を実現した。また測定精度はTTSが±2ps、ダークレートが±5%と要求を満たした。ゲインは一部の不確かさの見積もりに課題を残した。またCEは統計的に5%以内の精度で量産品同士の相対値測定を可能にし、約5%の精度での絶対値測定の実現性を示した。

本システムを用いた初期量産品 MCP-PMT12 個の性能測定の結果、TTS とゲインとダークレートについては 12 個中 10 個の MCP-PMT で問題なく性能が出ていることが確認された。その一方で QE は 12 個中 11 個の MCP-PMT が選別基準を満たさないことが分かった。測定からは放電の問題も明らかになり、QE の問題と共に浜松ホトニクスでの生産体制に見直しを要求した。

本研究を通し、開発から量産へと段階を移行した MCP-PMT 生産体制に適した測定環境を構築し、さらに量産初期段階での MCP-PMT の検証によって今後の量産に向けた課題を明らかにした。

参考文献

- [1] 有田義宣,「Belle 実験 TOP カウンターの実機仕様決定に向けた光検出器改良と K/ 識別性能評価」, 修士論文,2011
- [2] 神野高幸,「光検出器 MCP-PMT の長寿命化に向けた開発研究」, 修士論文,2010
- [3] 古田和也,「MCP-PMT の基本性能測定と諸特性」, 卒業論文,2010
- [4] 栗本謙,「新型粒子識別装置 TOP カウンターのビームによる特性研究」, 修士論文,2009
- [5] 岸本直樹,「 π/K 粒子識別装置用 MCP-PMT の寿命測定」, 修士論文,2006
- [6] 青木康一,「新光学系を用いた次世代粒子識別装置 focusing TOP counter の研究開発」, 修士論文,2006
- [7] 富田光俊,「次世代粒子識別装置用角型リニアアレーマルチアノード MCP-PMT(SL10) の開発研究」, 修士論文,2005