

修士論文

Belle II 実験 TOP カウンターにおける MCP-PMT の
量子効率変動特性の評価と安定運用方法の検討

2023 年 3 月 29 日

名古屋大学大学院理学研究科
素粒子宇宙物理学専攻素粒子宇宙物理系
高エネルギー素粒子物理学研究室 (N 研)
学籍番号 262101034
博士課程前期 2 年 安達佑也

指導教員 居波賢二

概要

Belle II 実験では高ルミノシティによる大量の B 中間子の精密測定により標準模型の検証や新物理探索を行っており、2032 年に 50 ab^{-1} まで蓄積するための高輝度化を目指している。Time-Of-Propagation (TOP) カウンターは Belle II 検出器の円筒部に設置されたチェレンコフリングイメージ型粒子識別装置であり、識別性能は検出光子数と時間分解能に依存する。Micro-Channel-Plate (MCP) -PMT は、1 光子検出で $\sigma = 34.3 \text{ ps}$ の高時間分解能を持ち実験の要求を満たしている。一方で、積算出力電荷の増加に伴い量子効率 (QE) が低下してしまう特徴がある。現在 TOP カウンターには製造工程が異なる 3 種類の MCP-PMT が実装されており、寿命が最も短い初期量産型の PMT は早期の QE 低下を予想し 2022 年夏から始まる長期保守期間中の交換を計画していた。ルミノシティの増加に伴いバックグラウンドも増加し QE 低下が早まるため、MCP-PMT の QE 変動特性を理解することで TOP カウンターの安定運用を目指す。

MCP-PMT の交換は実装以降初であり、狭く外から見えにくい場所での作業のためネジを容易に回せないが落とせない等の課題がある。この課題を解決するために専用の道具を開発した。また、取り外した PMT の QE を速やかに測定し実装前と比較するために、QE 測定ベンチの精度を 0.01%(図 1) に改良し測定の効率化を行なった。

また大量の MCP-PMT 実機運用での特性理解のために、衝突データを用いて積算出力電荷と QE 変動を測定した。平均積算出力電荷は 0.3 C/cm^2 と得られ、初期量産型の平均寿命 1.1 C/cm^2 に比べ十分小さい。しかし、一部で予測よりも大きい QE 低下がみられた。差異が生じた原因の理解と QE 変動測定の検証が必要である。まず、原因の候補として温度の違いを考えた。寿命測定試験時は室温 (約 30°C) であり実機は最高 40°C になる可能性がある。寿命改善 ALD 型の PMT を使用した加熱試験と高温環境運用による試験を行い、温度の影響を調べた。加熱試験では、 40°C での QE 変動率を $1.2 \pm 0.8\%$ と得た。高温環境運用による試験では、温度の違いによる QE 低下率の差を $5.6 \pm 2.0\% / (\text{C/cm}^2)$ と得た。これらの結果から温度によって QE 低下が大きくなる可能性が示唆された。次に、QE 変動測定の検証のために、初期量産型 32 本を実機から取り外し QE 測定を行った。QE 低下が疑われる 24 本中 23 本で線形性がみられ (図 2)、QE 変動測定の結果が確かめられた。

この研究により、Belle II 実験終了まで運用可能な長寿命型への交換が必要な PMT を選ぶと共に交換を可能にした。また、TOP カウンターの安定運用に重要な MCP-PMT の QE 変動特性の知見を得た。

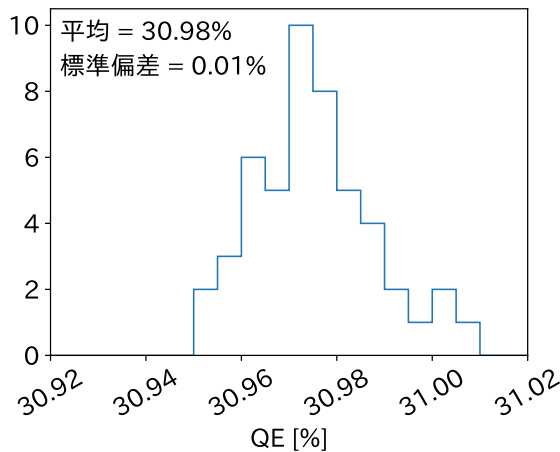


図 1 QE 測定ベンチの測定精度。1 つの PMT を複数回測定し、測定結果のばらつきを調査した結果である。

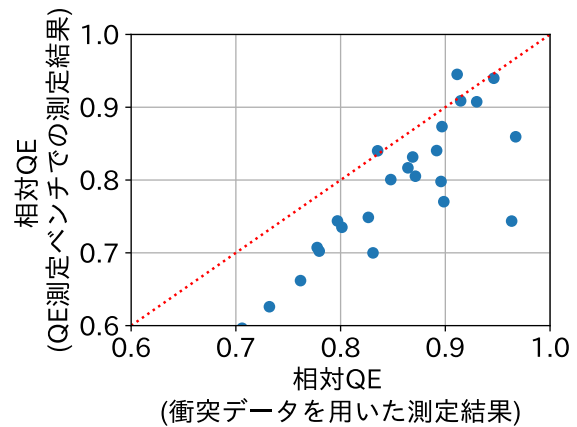


図 2 衝突データを用いた QE 変動測定と QE 測定の比較。相対 QE は実装前を 1 とした QE である。赤点線は直線 $y = x$ を示している。右下の大きく外れた PMT は読み出し回路の不調が原因であり、それ以外の PMT では線形性がみられた。

目次

1	序論	1
2	Belle II 実験	2
2.1	実験背景	2
2.2	SuperKEKB 加速器と Belle II 検出器	4
2.3	粒子識別装置 TOP カウンター	6
2.3.1	TOP カウンターの構造	6
2.3.2	TOP カウンターの粒子識別原理	7
2.4	光検出器 MCP-PMT	8
2.4.1	MCP-PMT の概要	9
2.4.2	MCP-PMT の光電面寿命	11
2.5	TOP カウンターの安定運用に向けた課題	12
3	MCP-PMT 交換に向けた準備	14
3.1	MCP-PMT 交換作業に向けた道具の開発	14
3.1.1	MCP-PMT 交換作業の課題	14
3.1.2	試験用モックアップ	14
3.1.3	HV ボード交換用治具の開発	15
3.1.4	狭い場所のネジを回す作業を可能にするレンチの開発	17
3.1.5	実機での HV ボード取り外し試験	19
3.2	QE 測定ベンチの改良	21
3.2.1	従来の QE 測定ベンチ	21
3.2.2	PMT モジュールを用いた測定	22
3.2.3	QE 測定手法の改良	23
3.2.4	QE 測定精度の改良	27
4	衝突データを用いた QE 変動測定	29
4.1	積算出力電荷測定	29
4.1.1	測定方法	29
4.1.2	測定結果	30
4.2	QE 変動測定	32
4.2.1	測定方法	32
4.2.2	測定結果	33
4.3	寿命測定試験から得られた予測との比較	35
5	QE 低下の原因調査	36
5.1	測定方法	36
5.2	寿命改善 ALD 型での測定結果	37

5.2.1	加熱試験	37
5.2.2	高温環境運用による試験	38
5.3	初期量産型での測定結果	39
5.3.1	加熱試験	39
5.3.2	高温環境運用による試験	40
5.4	考察	42
5.5	追加の検証 (最終版追記分)	43
6	実機 MCP-PMT の QE 測定	46
6.1	測定結果	46
6.2	衝突データを用いた QE 測定結果との比較	49
7	結論	51
	参考文献	53

1 序論

Belle II 実験では高ルミノシティによる大量の B 中間子の精密測定により標準模型の検証や新物理探索を行っており、2032 年に 50 ab^{-1} まで蓄積するための高輝度化を目指している。Time-Of-Propagation (TOP) カウンターは Belle II 検出器の円筒部に設置されたチェレンコフリングイメージ型粒子識別装置であり、識別性能は検出光子数と時間分解能に依存する。Micro-Channel-Plate (MCP) -PMT は、1 光子検出で $\sigma = 34.3 \text{ ps}$ の高時間分解能を持ち実験の要求を満たしている。一方で、積算出力電荷の増加に伴い量子効率 (QE) が低下してしまう特徴がある。現在 TOP カウンターには製造工程が異なる 3 種類の MCP-PMT が実装されており、寿命が最も短い初期量産型の PMT は早期の QE 低下を予想し 2022 年夏から始まる長期保守期間中の交換を計画していた。ルミノシティの増加に伴いバックグラウンドも増加し QE 低下が早まるため、MCP-PMT の QE 変動特性を理解することで TOP カウンターの安定運用を目指す。

PMT の交換は TOP カウンターの実装後初めての試みであるため、交換手法を確立する必要がある。狭く外から見えにくい場所での作業のためネジを容易に回せないが落とせない等の課題がある。これらの問題を解決し失敗なく効率良く交換作業を進められるように、専用の道具の開発を行う。そして、Belle II 実験が MCP-PMT を大量運用する初の実験になるため、実機運用で QE 変動などの特性を理解することは今後の TOP カウンターの運用に重要である。そのため、交換で取り外した PMT の QE を測定し実装前との比較を行う。また、取り外した PMT の QE 低下の予測は 5% 程度であるため、1 ~ 2% の測定精度が必要になる。PMT を取り外した後に速やかに精度良く QE 測定を行えるように QE 測定ベンチの改良を行う。さらに、実機運用での QE 変動特性の理解や TOP カウンターの運用を考える上で、実験期間中の QE 変動を測定することは重要である。そのため、衝突データを用いた積算出力電荷と QE 変動の測定手法を開発と検証を行う。

第 2 章では、Belle II 実験 TOP カウンターの概要と TOP カウンター運用における課題について述べる。第 3 章では、MCP-PMT の交換に向けた道具の開発と QE 測定ベンチの改良について述べる。第 4 ~ 6 章では、衝突データを用いた QE 変動測定手法の開発と検証について述べる。

2 Belle II 実験

2.1 実験背景

現在の素粒子物理学における標準模型には、第3世代のクォークを導入することでCP対象性の破れを説明する小林-益川理論がある。この理論では、弱い相互作用によるクォークの世代間遷移をCKM行列によって記述している。CKM行列は 3×3 のユニタリー行列で式(1)のように表され、CP非対称を引き起こす成分が含まれている。

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ユニタリー条件より、式(1)の相異なる2列の組み合わせによる6つの恒等式が得られる。この6つのうち1列目と3列目の組み合わせによる恒等式は式(2)であり、各項の大きさが同程度であるため大きなCP対称性の破れが見えることが期待される。

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0 \quad (2)$$

式(2)を式(3)のように変形し $-V_{ud}V_{ub}^*/V_{cd}V_{cb}^* = \bar{\rho} + i\bar{\eta}$ と置くことで、複素平面上に $(0,0), (1,0), (\bar{\rho}, \bar{\eta})$ を頂点とする図3のような三角形を描くことができる。この三角形をユニタリー三角形と呼ぶ。

$$\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} + 1 + \frac{V_{td}V_{tb}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} = 0 \quad (3)$$

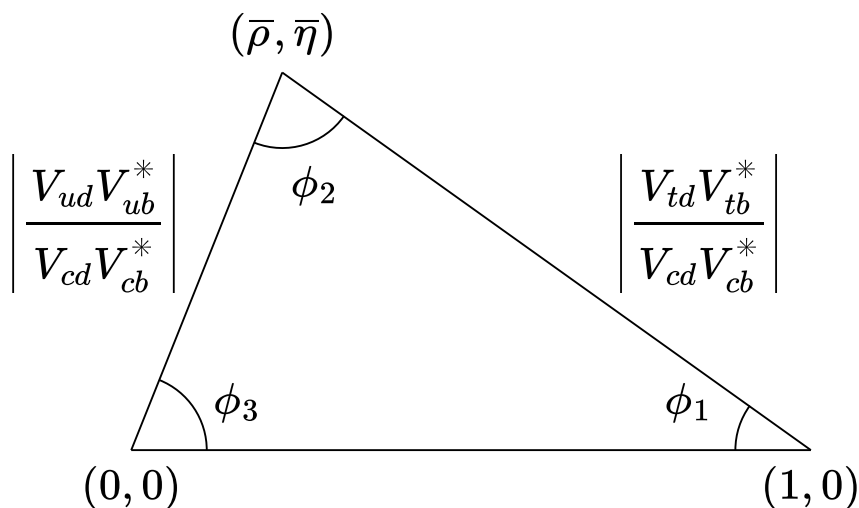


図3 ユニタリー三角形。

ユニタリー三角形の各辺の長さや内角を測定することで標準模型を検証することができる。現在までの測定結果は図4のようになっており、標準模型と無矛盾な結果が得られている。[1]

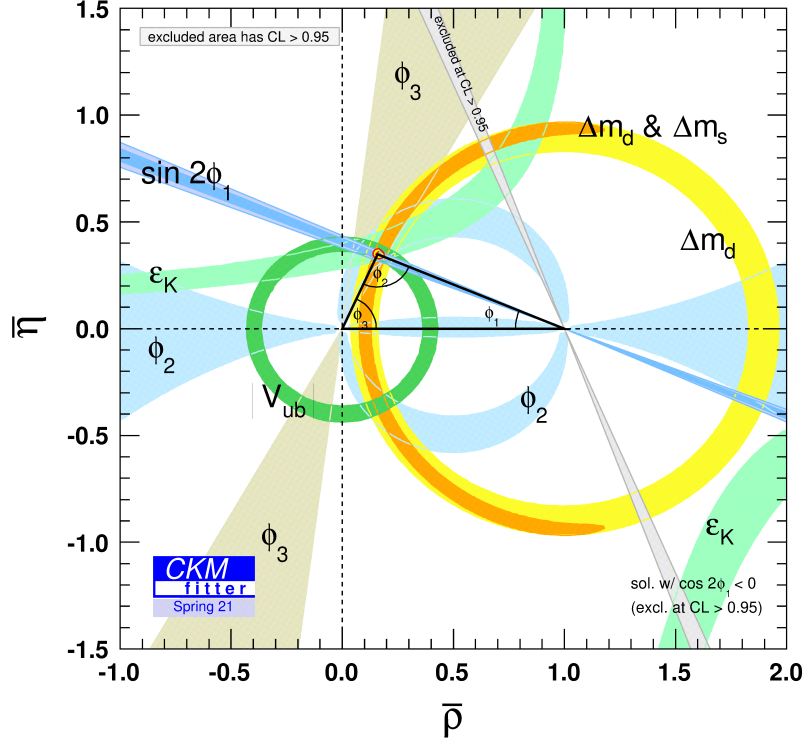


図4 ユニタリー三角形の測定結果。[2]

小林-益川理論によって説明される物理現象には、図5に示すファインマン図で記述される $B^0 - \bar{B}^0$ 混合がある。中間状態である $i, j, W^\pm$ の部分に新粒子の寄与が含まれる可能性がある。新物理の寄与が存在する場合、実際の $B^0 - \bar{B}^0$ 混合の振幅 M_{12}^d は標準模型で予測される振幅 $(M_{12}^d)_{\text{SM}}$ と新物理の相対振幅の絶対値 h_d と位相 σ_d を用いて式(4)で仮定される。

$$M_{12}^d = (M_{12}^d)_{\text{SM}} \times (1 + h_d e^{2i\sigma_d}) \quad (4)$$

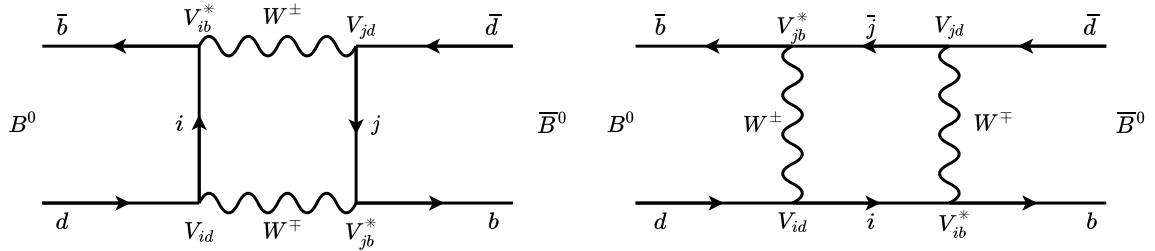


図5 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合のファインマン図。($i, j = u, c, t$)

これまでに行われてきた Belle 実験と BABAR 実験の測定結果から推定される h_d と σ_d は図6左であり、新物理が20～30%寄与する可能性が残っている。Belle II 実験ではこの検証精度の向上を目指しており、実

験終了時には図 6 右のように $h_d < 5\%$ 程度まで制限をかけられると期待されている。[3]

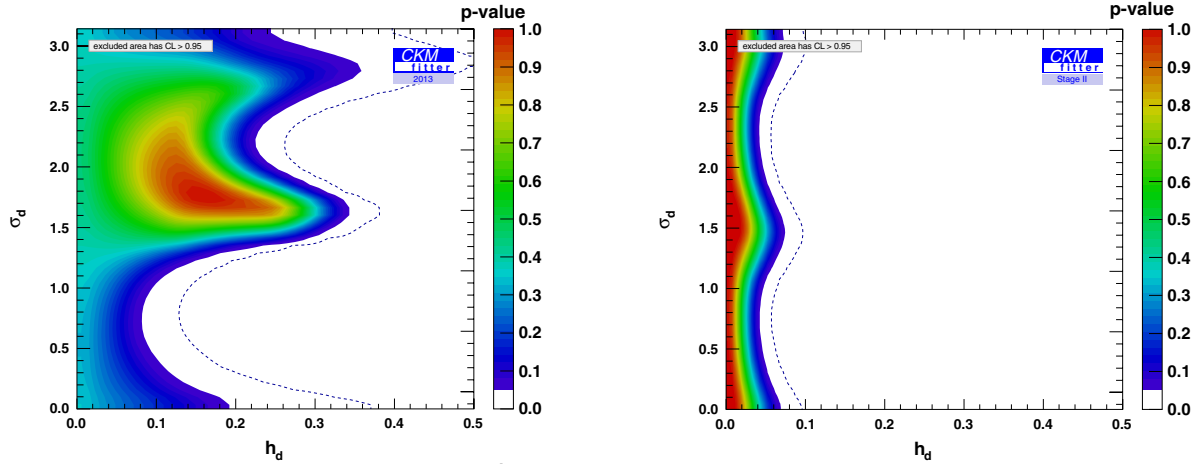


図 6 測定結果から推定される新物理の相対振幅の絶対値 h_d と位相 σ_d 。[3](左：2013 年までの測定結果、右：Belle II 実験 (50 ab^{-1}) と LHCb(50 fb^{-1}) のデータで期待される範囲)

これを達成するためには大統計での精密測定が必要であり、 B 中間子大量生成のための高ルミノシティと高い精度で B 中間子を識別することが重要である。 B 中間子の識別精度向上のためには崩壊粒子の精密測定が求められ、その中でも特に粒子識別性能が重要である。

2.2 SuperKEKB 加速器と Belle II 検出器

Belle II 実験では SuperKEKB 加速器を用いた電子陽電子衝突により様々な粒子を生成し、Belle II 検出器で崩壊点や飛跡、エネルギーを測定し粒子識別を行っている。SuperKEKB 加速器と Belle II 検出器の概要を図 7 に示す。

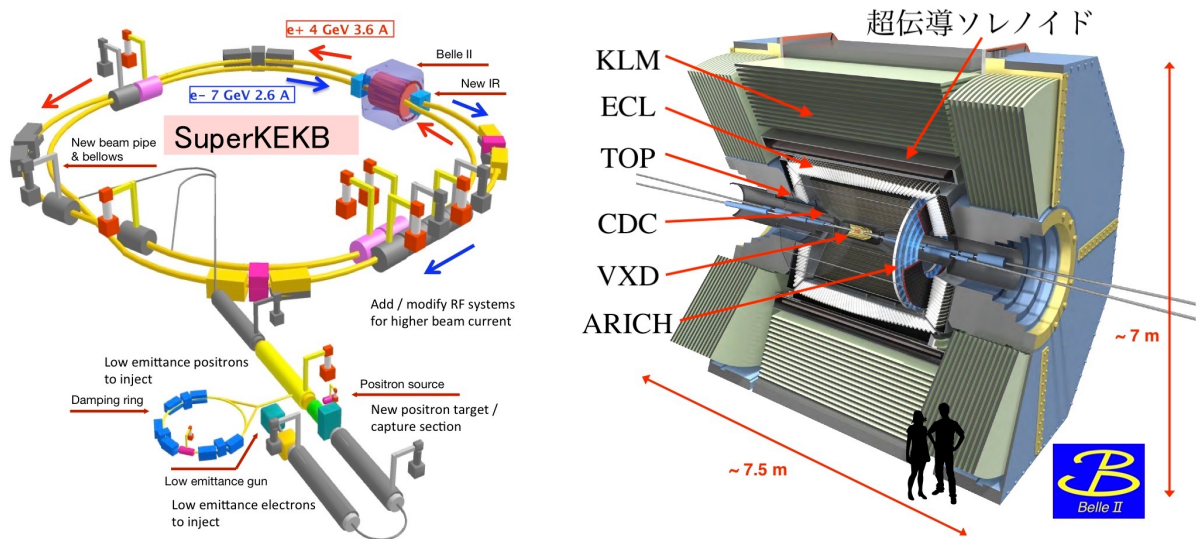


図7 SuperKEKB(左)とBelle II検出器(右)の概要。[4]

SuperKEKB 加速器は電子陽電子加速器であり、加速させた 7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子を衝突させる。重心系エネルギー $\sqrt{s}$ は $\Upsilon(4S)$ の共鳴エネルギーに相当する 10.58 GeV である。 $\Upsilon(4S)$ は 96% 以上の確率で B 中間子対に崩壊するため、SuperKEKB 加速器では効率よく B 中間子を生成することができる。Belle II 検出器は衝突点の周辺に配置された複数種類の検出器の総称であり、生成された粒子の様々な物理量を測定している。Belle II 検出器を構成する検出器の名称と役割を以下に示す。

崩壊点検出器 (Vertex Detector, VXD)

VXD は半導体を利用した検出器であり、内側 2 層のピクセル検出器 (Pixel Detector, PXD) と外側 4 層のシリコンストリップ検出器 (Silicon Vertex Detector, SVD) から構成されている。荷電粒子が通過し信号が発生した位置から荷電粒子の軌跡を求めることで崩壊点を再構成する。

中央飛跡検出器 (Central Drift Chamber, CDC)

荷電粒子のエネルギー損失を小さくするために低物質量の $\text{He} + \text{C}_2\text{H}_5$ ガスとアルミワイヤーで構成されたドリフトチェンバーである。ビーム軸に平行なワイヤーが 5 層と 3 次元測定用に傾けられたワイヤーが 4 層張られている。信号が読み出されたワイヤーの位置から荷電粒子の飛跡を再構成する。また、1.5 T の磁場によって荷電粒子の飛跡は曲げられるため、飛跡の曲率半径から荷電粒子の運動量を測定することができる。

Time-Of-Propagation (TOP) カウンター

Belle II 検出器の円筒部に設置された粒子識別装置である。荷電粒子は石英輻射体を通過した時に発生するチェレンコフ光の伝播時間の違いから粒子を識別する。詳細については次節で述べる。

Aerogel Ring Imaging Cherenkov detector (ARICH)

Belle II 検出器の円底部に設置された粒子識別装置である。荷電粒子がエアロゲルを通過した時に発生するチェレンコフ光を、20 cm 離れた位置に設置された光検出器で検出する。検出されたリングイメージの半径からチェレンコフ放射の角度を算出することで、 K 中間子と π 中間子の識別を行う。

電磁カロリメータ (Electromagnetic Calorimeter, ECL)

CsI(Tl) 結晶を用いた全吸収型のカロリメータで、Belle II 検出器を取り囲むように設置された粒子のエネルギーを測定する装置である。結晶に入射した電子や光子は電磁相互作用により電磁シャワーを発生させエネルギーを失う。損失エネルギーはシンチレーション光に変わり光検出器で読み出される。シンチレーション光の光量から粒子のエネルギーを測定する。

μ 粒子・中間 K 中間子検出器 (K_L -Muon detector, KLM)

Belle II 検出器の最外部に設置され、鉄板と荷電粒子検出器のサンドウィッチ構造の検出器である。透過力の高い μ 粒子と K_L 中間子を、電磁相互作用と強い相互作用の違いから識別する。

2.3 粒子識別装置 TOP カウンター

TOP カウンターは Belle II 検出器の円筒部に設置されたチェレンコフリングイメージ型粒子識別装置であり、石英輻射体と光検出器を基本構造としている。荷電粒子が石英輻射体内で光速を超えるとときに発生するチェレンコフ光を利用し、 K 中間子と π 中間子を識別する。以下では、TOP カウンターの構造と粒子識別原理について述べる。

2.3.1 TOP カウンターの構造

図 8 に示すように TOP カウンターは、Quartz Bar Box (QBB)、石英輻射体、光検出器、読み出し回路と高電圧 (HV) 印加用の HV ボードで構成されている。

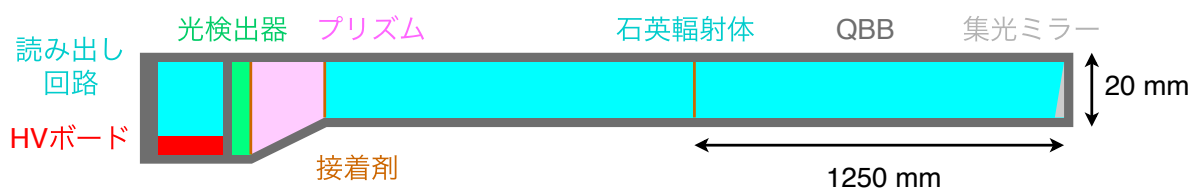


図 8 TOP カウンターの概略図。

QBB

石英輻射体、光検出器、読み出し回路、HV ボードを収めるアルミ製の筐体である。石英輻射体を支える構造、読み出し回路の冷却機構などが備わっている。

石英輻射体

1250 mm × 450 mm × 20 mm の石英板 2 枚、集光ミラー、プリズムを光学接着した構造をしている。石英内部で発生したチェレンコフ光は全反射を繰り返しながら伝播し、端面に取り付けられた光検出器に到達する。

光検出器

光検出器には MCP-PMT を使用している。MCP-PMT の詳細については次節で述べる。MCP-PMT 4 つを 1 組のモジュールとして、8 組のモジュールが TOP カウンター 1 台に実装されている。モジュールは MCP-PMT、波長カットフィルター、基盤、PEEK パーツで構成されており、外観を図 9 と図 10 に示す。波長カットフィルターは波長が 350 nm 以下の光をカットする。これは、波長によって屈折率が変化することでチェレンコフ光のリングが鈍る効果によって、粒子識別性能が悪化することゝを防ぐ効果がある。モジュールを組み立てる時に MCP-PMT と波長カットフィルターはシリコンゴ

ム TSE3023 で接着する。また、波長カットフィルターと石英輻射体のプリズムは TSE3023 を使用したオプティカルクッキーで接着している。読み出し基盤には MCP-PMT を挿すソケットがあり、1 枚で 4 本の PMT に対して HV ボード供給される電圧の分配と読み出し回路への信号の伝達を行なっている。



図 9 モジュールの表面。

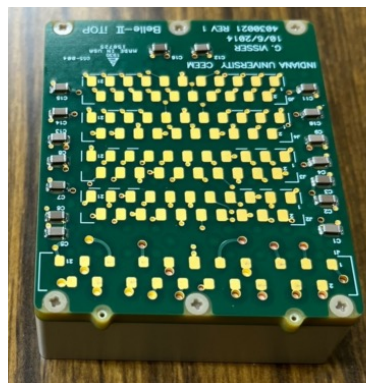


図 10 モジュールの裏面。

読み出し回路と HV ボード

読み出し回路と HV ボードの外観をそれぞれ図 11 と図 12 に示す。QBB 内部ではどちらもモジュールの読み出し基盤側に設置されている。HV ボードは QBB に、読み出し回路は HV ボードにねじ止めされている。ポゴピンによって読み出し基盤と電氣的に接触している。読み出し回路は、PMT からのアナログ信号をサンプリングしデジタル化した後に後段の回路へのデータ転送を行っている。HV ボードは PMT へ動作に必要な 5 種類の HV 供給を行っている。

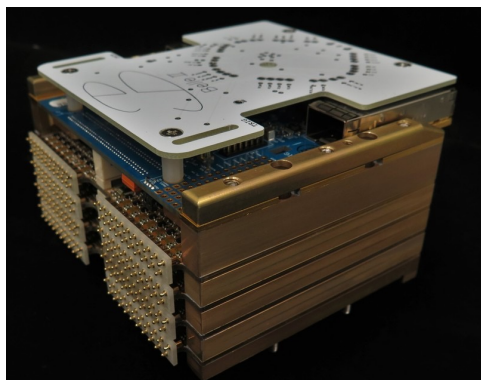


図 11 読み出し回路。

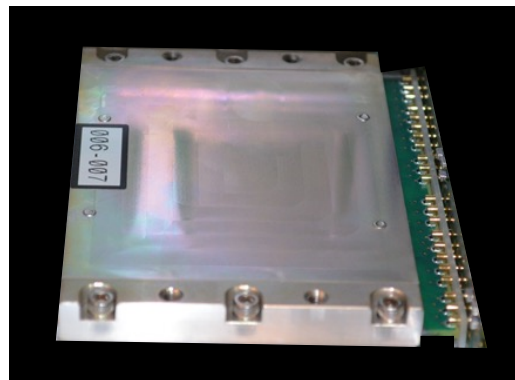


図 12 HV ボード。

2.3.2 TOP カウンターの粒子識別原理

荷電粒子が物質中を通過する際に物質中の光速を超えると、式 (5) で表される開き角 θ の円錐状にチェレンコフ光が発生する。TOP カウンターの石英内で発生したチェレンコフ光は全反射を繰り返して端面に取り付けられた光検出器に到達する。光検出器に到達した時間と位置からリングを再構成する。図 13 に示すように、同じ運動量を持つ異なる粒子では質量 m が異なるため開き角 θ が変化する。リングの再構成により θ を算出

し、他の検出器から得られる p と組み合わせることで粒子識別を行う。その識別性能は検出光子数の平方根に比例し時間分解能に反比例する。そのため、高い粒子識別性能を実現するためには光検出器の検出効率と時間分解能が重要である。

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{m^2 + p^2}}{np} \quad (5)$$

m : 質量、 p : 運動量、 n : 屈折率

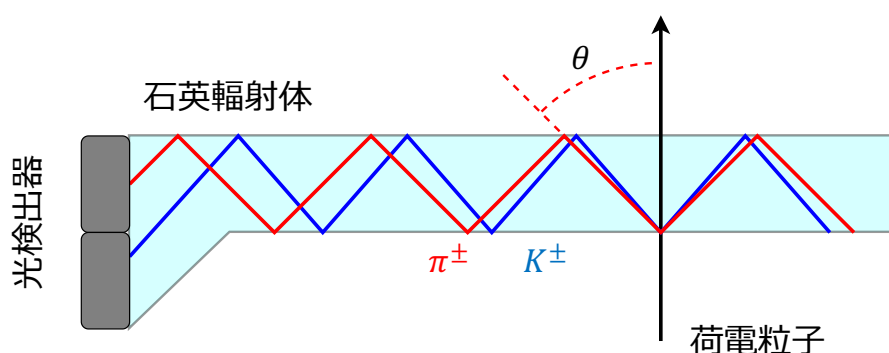


図 13 粒子識別の概略図。

粒子識別性能は、粒子の入射角度と運動量に依存性がある。シミュレーションから期待される、 K 中間子の識別効率と π 中間子の誤識別率を図 14 に示す。 π 中間子の誤識別率を 10% 以下で K 中間子を 90% 以上の精度で識別が可能であると期待される。[5]

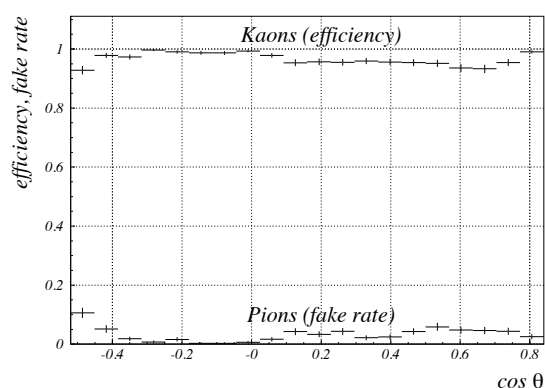


図 14 シミュレーションから期待される粒子識別性能。[5]

2.4 光検出器 MCP-PMT

TOP カウンター用の光検出器として、浜松ホトニクス社と共同開発した Micro Channel Plate (MCP)-PMT を使用している。以下では、MCP-PMT の概要と光電面寿命について述べる。

2.4.1 MCP-PMT の概要

MCP-PMT は直径 $10\text{ }\mu\text{m}$ で 13° 傾いた斜円柱の穴が無数に空いた厚さ $400\text{ }\mu\text{m}$ の MCP を増幅部に使用した光電子増倍管である。光電面には NaKSbCs を使用している。また、MCP-PMT は図 15 に示すように角形の PMT であり、丸型に比べて敷き詰めた際の有感面積が広い特徴がある。MCP-PMT の内部構造を図 16 に示す。MCP-PMT に光が入射すると光電効果により光電子が発生する。この光電子が MCP に入射し MCP の内壁と衝突することで 2 次電子が放出される。これを繰り返すことで最終的には $10^5 \sim 10^6$ 倍に増幅されてアノードで読み出される。

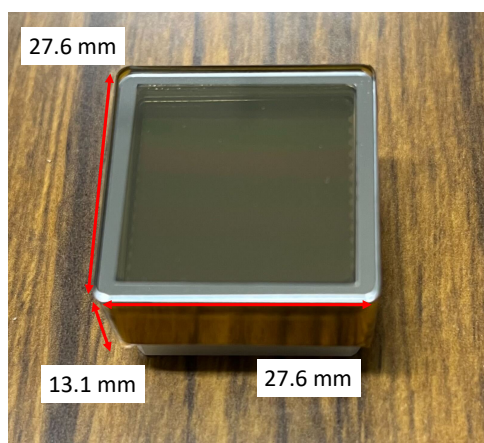


図 15 MCP-PMT の外観。

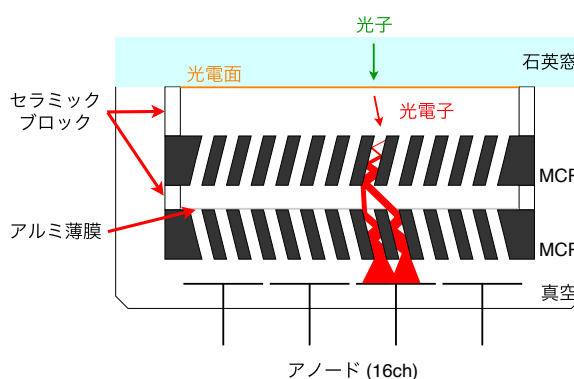


図 16 MCP-PMT の内部構造。

次に、MCP-PMT の典型的な性能を表 1 に示す。但し実際の性能には個体差がある。

表 1 MCP-PMT の典型的な特性。

	値
有感面積	$23.0 \times 23.0\text{ mm}^2$
量子効率 (QE)	29.3%(ピーク波長での値)
増幅率	$10^5 \sim 10^6$
時間分解能	34.3 ps
収集効率	60%

量子効率 (Quantum Efficiency, QE)

QE は光子が光電面に入射した際に、光電効果が起こり光子が光電子に変わる効率である。MCP-PMT の QE には図 17 に示すような波長依存性があり、360 nm 付近で最大となる。

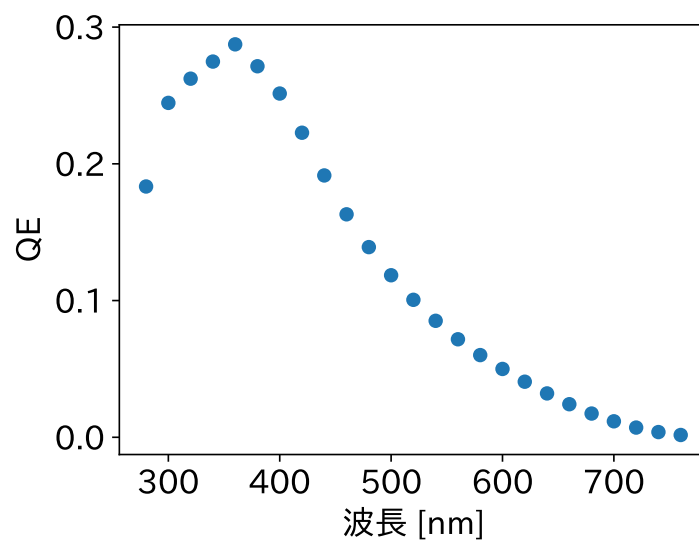


図 17 QE の波長依存性。

増幅率

増幅率は光電子 1 つが最終的に増幅される倍率である。増幅率には図 18 に示すような HV 依存性があり、増幅率 (Gain) と HV の値を用いて式 (6) で近似できる。増幅率が 2×10^6 になる HV を標準電圧とし、性能評価を行う印加電圧の基準にしている。

$$\text{Gain} = \exp(\text{Slope} \cdot \text{HV} + \text{Const}) \quad (6)$$

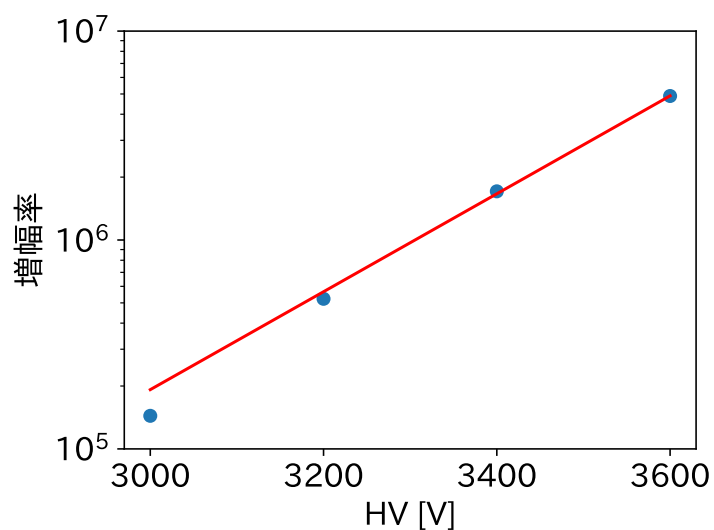


図 18 増幅率の HV 依存性。

時間分解能

一般的に 2 次電子が放出される際には複数の電子が放出される。その方向は一樣ではないため、アノードに到達するまでに電子が飛行する距離にばらつきが生じる。このばらつきが大きいと時間分解能が悪

くなる。MCP-PMT では MCP の短く小さな穴の内部で 2 次電子増幅が行われるため、飛行距離のばらつきが抑制される。これにより 1 光子検出で $\sigma \sim 30$ ps の高い時間分解能を実現できている。

収集効率

収集効率は発生した光電子が MCP の穴に入射し増幅される確率である。MCP の開口率は約 60% であるため、収集効率も同程度の値になる。

磁場特性

実機では 1.5 T の磁場環境下で PMT を運用する。磁場内部では電子の軌道が曲げられてしまい、後段の MCP に入射する電子の広がり方が変化することで増幅率が減少する。実機環境における磁場強度では、磁場がない時の増幅率の 0.3 倍程度になるが、印加電圧を上げることで運用可能である。また、増幅経路が短いため磁場の影響は少なく、収集効率や時間分解能は変化しない。

2.4.2 MCP-PMT の光電面寿命

MCP-PMT には、出力した合計の電荷量 (積算出力電荷量) の増加に伴い QE が低下してしまう特徴がある。これは、MCP 表面や壁面に付着している残留ガスが増幅中の電子によって真空中に飛び出し、光電面と相互作用するためである。製造時の QE を 1 とする相対 QE が 0.8 に到達する積算出力電荷量を寿命として定義している。寿命の単位は $[C/cm^2]$ である。相対 QE R_{QE} は積算出力電荷量 ΣQ と寿命 τ を用いて式 (7) で近似できる。

$$R_{QE} = 1 - 0.2 \left(\frac{\Sigma Q}{\tau} \right)^2 \quad (7)$$

TOP カウンターの運用において、積算出力電荷の増加に伴う QE 低下による検出光子数の減少は粒子識別性能を低下させてしまう。そのため、TOP カウンターの粒子識別性能を維持するためには、寿命を迎え QE が低下した PMT を交換するか、PMT が寿命を迎えないように運用しなければならない。大量の MCP-PMT を運用しているため、頻繁に交換を行うためには大きなコストがかかるため現実的ではない。また、チェレンコフ光子だけでなく背景事象由来の光子でも電荷が出力されるため、PMT が寿命を迎えないようにするためにはビーム強度に制限をかける必要があり、ルミノシティを上げることができない。そのため、MCP-PMT の寿命が短いと Belle II 実験全体に悪影響を与えてしまう。

そこで、MCP-PMT を長寿命化するためにいくつかの改善を行なっている。TOP カウンター用の MCP-PMT には、寿命の改善に向けて製造工程を変更した 3 種類の型がある。型毎の寿命と現在搭載されている本数を表 2 に示す。また、それぞれの型で行なった改善策について以下で述べる。

表 2 TOP カウンターに実装されている MCP-PMT。

型	本数	寿命 $[C/cm^2]$	試験した本数
初期量産型	224	1.1(平均)	12
ALD 型	220	10.4(平均)	8
寿命改善 ALD 型	68	13.6(最小値)	8

初期量産型

前段の MCP よりも後段の MCP の方が大量の 2 次電子が壁面に衝突するため、QE 低下につながるガスの放出源は主に後段の MCP である。そこで、放出されたガスが光電面に到達しないように経路を塞ぐことによって寿命の改善を図った。まず、後段の MCP の上部にアルミニウムの薄膜を設置するこ

とで、電場に沿って光電面に到達するイオン化したガスを抑制した。そして、MCP と側管の間にセラミックブロックを設置することで、ランダムに移動し側面から回り込んで光電面に到達する中性ガスを抑制した。

ALD 型

初期量産型で行われた改善策に加えて、MCP 表面を Atomic Layer Deposition (ALD) コーティングを施している。ALD コーティングを行うことで、表面に付着していたガスが ALD 層によって閉じ込められるためガスの放出を抑制することができる。

寿命改善 ALD 型

ALD 型で行われた改善策に加えて、PMT 内部の真空引きを強化するなどして、残留ガスの絶対量を減らすことで寿命改善を行なった。

2.5 TOP カウンターの安定運用に向けた課題

図 19 に、Belle II 実験の運転計画から予測される積算出力電荷量と MCP-PMT の寿命をもとに試算した QE の推移を示す。

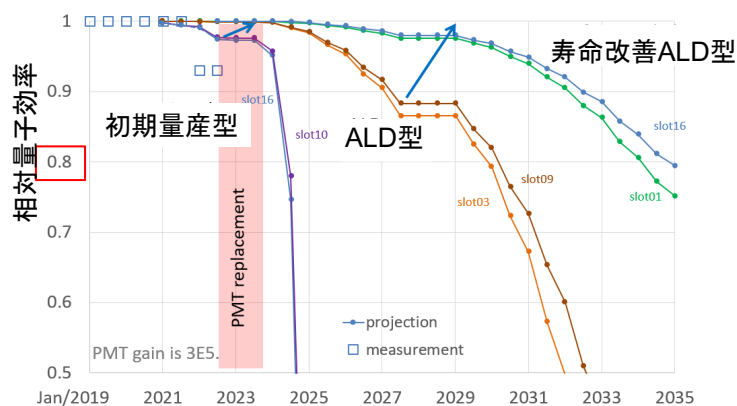


図 19 実験計画と寿命に基づく QE 変動の予測。

3 種類の PMT のうち最も寿命の短い初期量産型の PMT は早期に QE が低下すると予測されるため、2022 年夏から始まる長期保守期間中に新しく生産した寿命改善 ALD 型への交換を計画していた。PMT の交換は TOP カウンターの実装後初めての試みであるため、交換手法を確立する必要がある。MCP-PMT は狭く奥まった場所に設置されており、外から見えにくく容易にネジを回すことができない。また、TOP カウンターが円筒状に設置されているため様々の角度での作業が想定され、特に上部での作業中にネジや道具を落とす可能性が高くなる。Belle II 検出器には磁場がかかることや周囲に回路があることから、ネジ等を落としてしまうと問題になる。これらの問題を解決し失敗なく効率良く交換作業を進められるように、専用の道具の開発を行う。

そして、Belle II 実験が MCP-PMT を大量運用する初の実験になるため、実機運用で QE 変動などの特性を理解することは今後の TOP カウンターの運用に重要である。そのため、交換で取り外した PMT の QE を測定し実装前との比較を行う。また、取り外した PMT の QE 低下の予測は 5% 程度であるため、1 ~ 2% の

測定精度が必要になる。PMT を取り外した後に速やかに精度良く QE 測定を行えるように QE 測定ベンチの改良を行う。

さらに、実機運用での QE 変動特性の理解や TOP カウンターの運用を考える上で、実験期間中の QE 変動を測定することは重要ある。そのため、衝突データを用いた積算出力電荷と QE 変動の測定手法を開発と検証を行う。

3 MCP-PMT 交換に向けた準備

3.1 MCP-PMT 交換作業に向けた道具の開発

3.1.1 MCP-PMT 交換作業の課題

MCP-PMT が設置されているフロントエンド領域を図 20 に示す。フロントエンド領域には、TOP カウンター 1 台あたりに PMT モジュール 8 台、読み出し回路 4 台、HV ボード 4 台が設置されている。

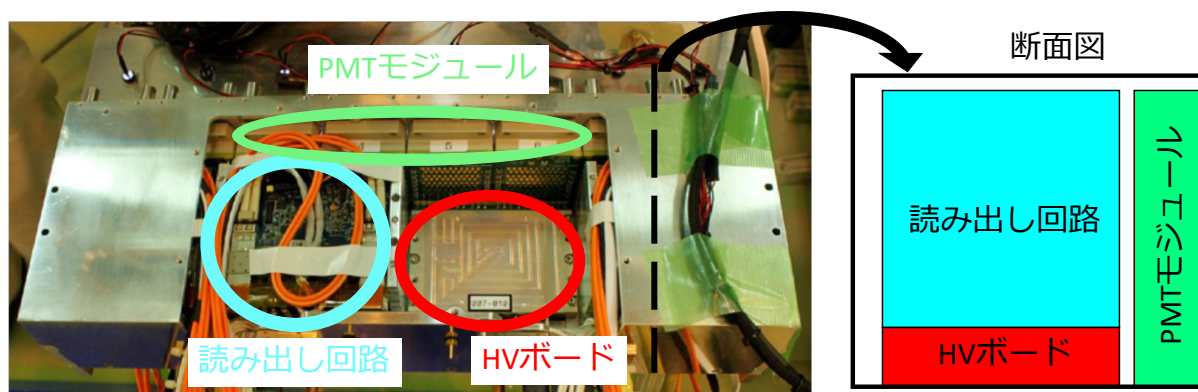


図 20 TOP フロントエンド領域。

MCP-PMT を交換するためには、HV ボードと読み出し回路も着脱する必要がある。これらの作業の中で HV ボードの着脱が最も困難であり、課題を以下に示す。

- 狭く外から見えにくい場所に設置されているため HV ボード固定用のネジを容易に回すことができない。
- 一度設置してしまうと HV ボードを掴むことができない。
- TOP カウンターが円筒状に設置されているため様々な角度での作業が想定され、特に上部検出器作業中にネジを落下させやすい。

1 点目の課題を解決するために、狭い場所のネジを容易に回すことができる専用のレンチを開発した。2、3 点目の課題を解決するために、HV ボードを掴む機構とネジ落下防止機能を兼ね備えた治具を開発した。また、開発したレンチと治具の試験を行うために、フロントエンド領域と HV ボードのモックアップを作成した。

3.1.2 試験用モックアップ

図 21 にフロントエンドのモックアップ、図 22 に HV ボードのモックアップをそれぞれ示す。

フロントエンドのモックアップは、実際の状況を再現するために寸法を合わせて作成した。また、段階的に交換作業の練習を行うために、透明アクリル板を使用し外側から見えるようにした。底面に空いているネジ穴は HV ボード固定用に使用するものである。

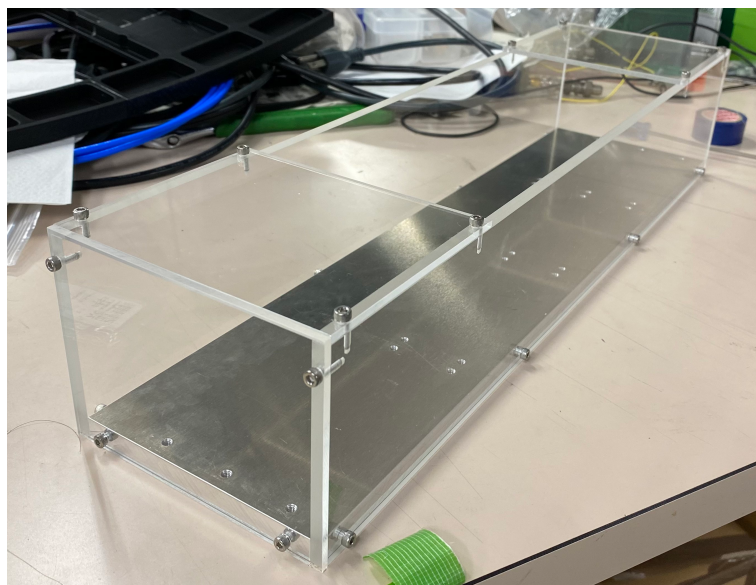


図 21 フロントエンドのモックアップ。

HV ボードのモックアップも、寸法を合わせて作成した。ネジ穴は HV ボード固定用のものと HV ボードの上に設置する読み出し回路固定用のものを再現している。

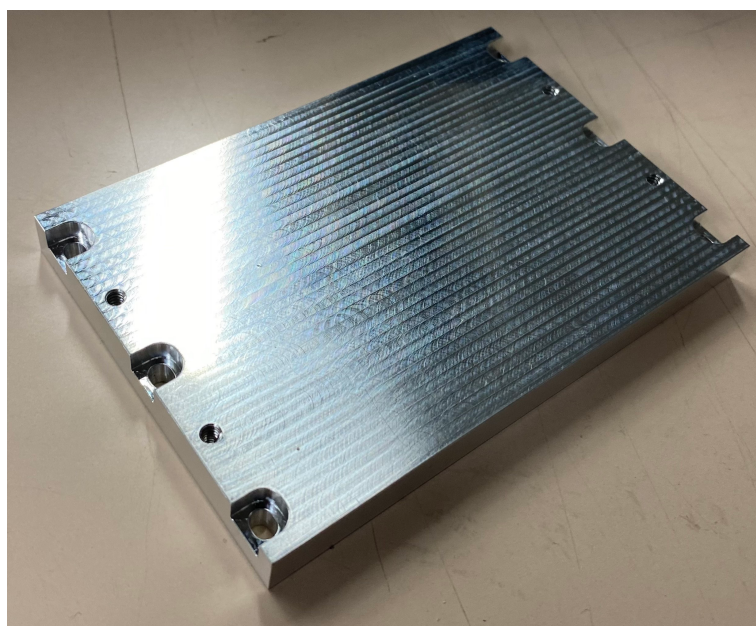


図 22 HV ボードのモックアップ。

3.1.3 HV ボード交換用治具の開発

HV ボード交換用治具に求められる機能は、HV を掴むこと、HV ボード固定用にネジの着脱時にネジの落下を防止することである。また、作成した治具の部品も落下しないように一体化している必要がある。まず、

HV ボードを掴む仕組みを図 23 に示す。HV ボード上は読み出し回路固定用のネジ穴があり、HV ボードの交換時には使用しないためこのネジ穴を活用する。ネジ穴より一回り小さいネジを差し込み両側から力を加えると、ネジ穴とネジが噛み合い抜けなくなる。

次に、ネジの落下防止機能について図 24 に示す。ネジの上部を治具で覆いレンチが通る程度の穴のみにすることで、ネジ頭が通らないためネジの落下を防止できる。

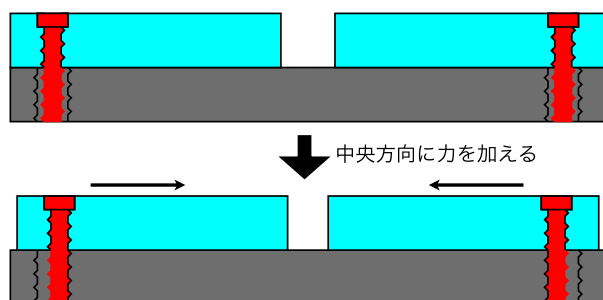


図 23 HV ボードを掴む仕組み (イメージ図)。

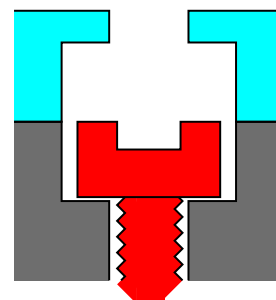


図 24 ネジ落下防止機能の仕組み (イメージ図)。

これらの二つの機能を持つように設計した治具を図 25 に示す。2つの部品の間には金属の柱が通っており、柱の両端を部品にねじ止めしている。ネジ止めの遊びを残すことで前後に稼働することができる。HV ボードを掴む機能のためにキャッチクリップを取り付け中央方向に力が加わるように設計した。また、両側に窪みを作ることによって治具自体を掴みやすくし狭い場所 HV ボードを持つことを可能にした。

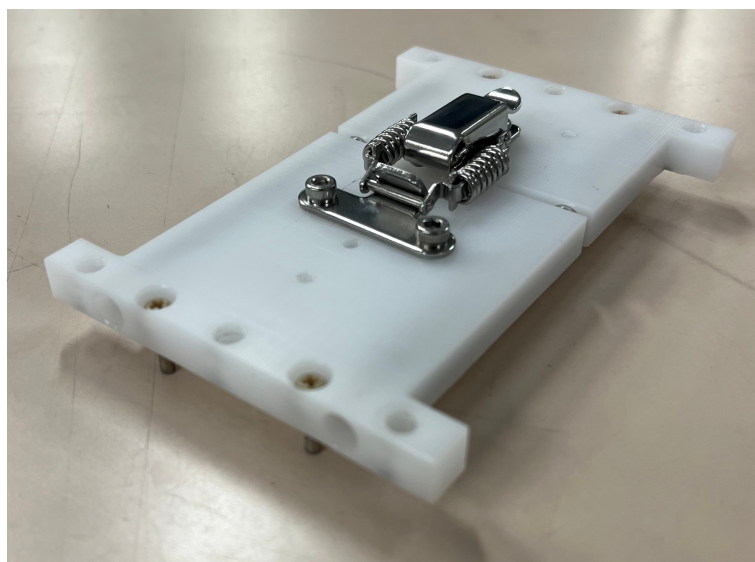


図 25 HV ボード交換用治具。

モックアップを使用した試験の様子を図 26 と図 27 に示す。図 26 で示すように、HV ボードに治具を取り付けた状態で上下の反転や左右への振動ではネジが落下しないことを確認した。図 27 に示すように、フロントエンドの狭い領域でも HV ボードを持つことや治具の着脱が可能であることを確認した。

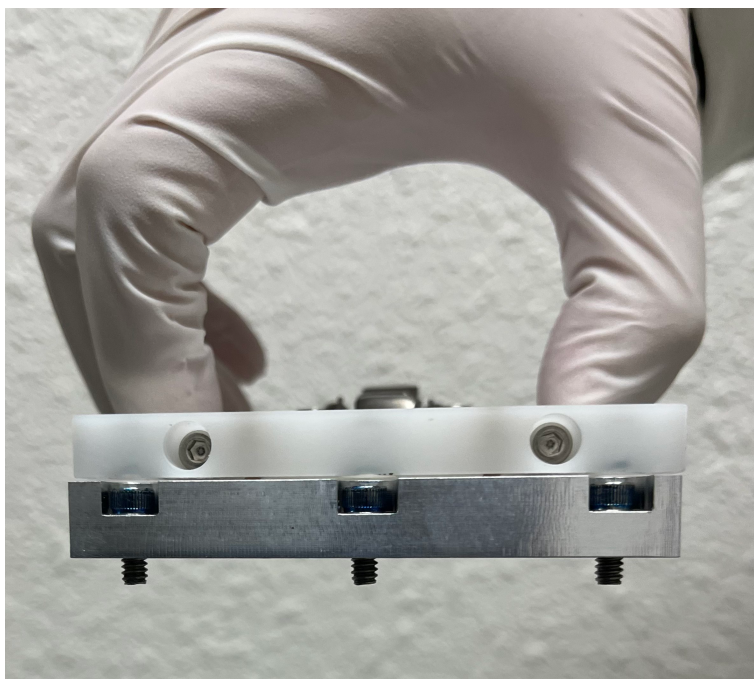


図 26 HV ボードのモックアップを使用した治具の試験の様子。

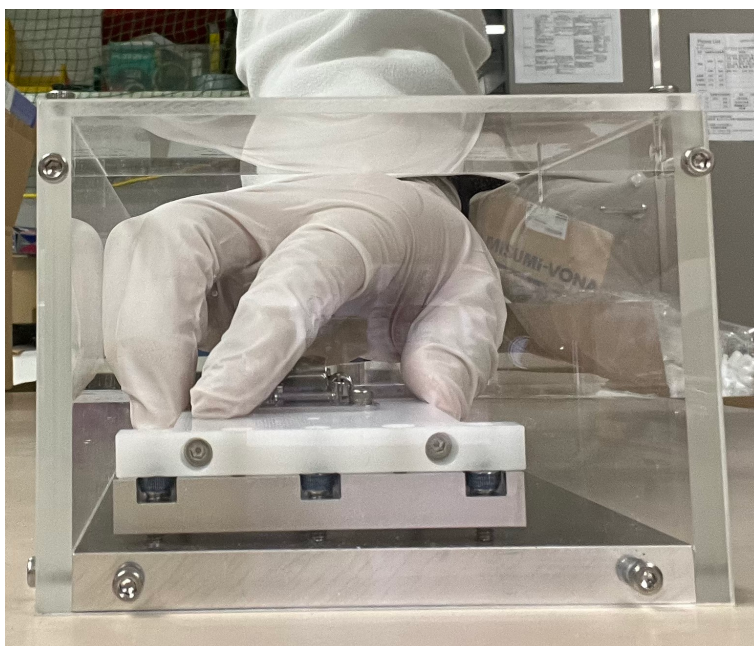


図 27 フロントエンドのモックアップを使用した治具の試験の様子。

3.1.4 狭い場所のネジを回す作業を可能にするレンチの開発

開発したレンチを図 28 に示す。工夫した点を以下に示す。

- 歯車を使用し回転軸を変えることで、フロントエンドの窓の下で作業を可能にした。
- 回す部分に径の大きいハンドルを設置し、持ちやすくすると共により小さな力でネジを回せるようにした。

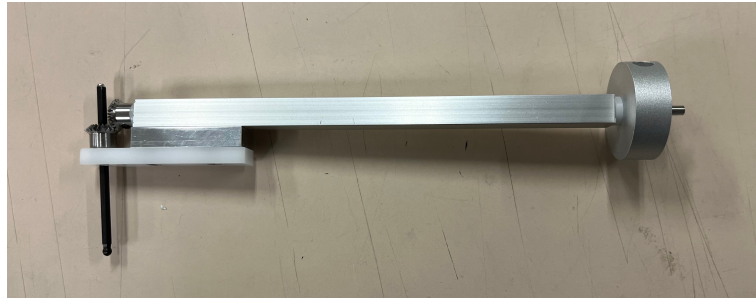


図 28 狭い場所のネジを回す作業を可能にするレンチ。

モックアップを使用した試験の様子を図 29 に示す。最も奥のネジを回す時にはハンドルがフロントエンドの窓の下にあり、広い空間で作業が可能であることを確認した。一方で、HV ボードの着脱試験を行ったが歯車部分の強度が足りずネジの本締め作業を行うことができなかった。そのため、取り付け時の本締め作業と取り外し時の最初のネジを緩める作業は図 30 に示す小型のラチェットレンチを使用することにした。

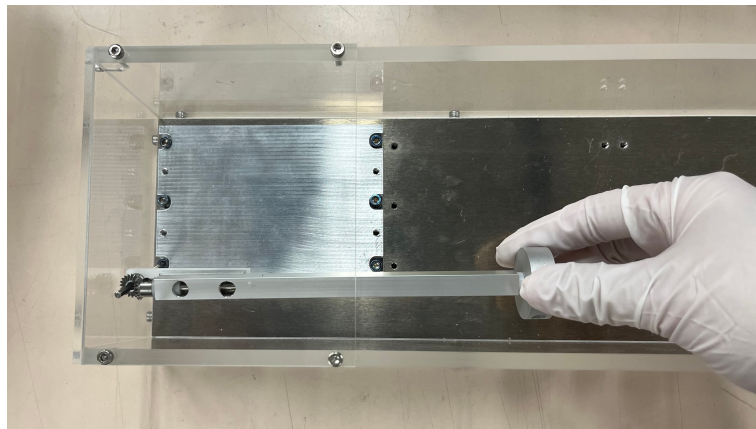


図 29 モックアップを使用したレンチの試験の様子。



図 30 小型のラチェットレンチ。

3.1.5 実機での HV ボード取り外し試験

実機の TOP カウンター 1 モジュールを使用し HV ボード取り外し試験を行った様子を図 31 に示す。HV ボード交換治具については、奥の HV ボードにも取り付け可能であり、HV ボードを取り外したあとに掴むことができた。また、ネジを一度も落とすことなく作業を終えることができた。レンチについては、モックアップでの試験で予想されていた通り最初の緩める作業には強度が足りなかった。さらに、熱伝導用のグリースが固まっており想定よりもネジを回すのに強い力が必要であった。また、想定よりも強い力をかけた際に力に耐えられずレンチが壊れてしまった。



図 31 実機での HV ボード取り外し試験の様子。

レンチが壊れた原因は構造にあった。2 本ある回転軸のうち、持ち手側は持ち手となるアルミフレームの前後で支えているため軸がずれることはない。しかし、六角レンチ側は歯車の下で 1 箇所しか支えておらずレンチの回転を阻害しないように少し大きい穴を開けていた。従って、歯車が回らない状態で強い力をかけたときに六角レンチ側の軸が傾き、力がかかることを想定していない箇所に強い力がかかり壊れてしまった。この軸が傾くことが回す力に制限をかけているため、六角側の軸が傾かないようにレンチを改良した。改良したレンチを図 32 に示す。六角レンチ側の歯車の上部にも軸を支える構造を追加した。この改良により六角レンチ側の軸が傾くことがなくなり力が、歯車の回転に使われるようになったため以前よりも強い力でネジを回すことが可能になった。



図 32 改良したレンチ。

3.2 QE 測定ベンチの改良

従来の測定ベンチでは MCP-PMT を一つずつ測定していた。TOP カウンターには MCP-PMT4 つで 1 組の PMT モジュールとして実装されている。従来の測定ベンチで測定するためには PMT モジュールの解体が必要になるが、磁場中でも PMT が回転しないようにしっかり固定されているため解体するには技術と時間が必要である。PMT を取り外した後に速やかに QE 測定を行えるように、PMT モジュールを解体せずに測定が行えるように測定ベンチを改良する必要がある。また、PMT の交換作業時点での QE 低下の予測は 5% 程度であるため、QE 測定ベンチには 1~2% の精度が要求される。

3.2.1 従来の QE 測定ベンチ

QE 測定ベンチでは図 33 に示すセットアップで MCP-PMT の QE の面分布と波長依存性を測定する。キセノンランプの白色光を分光器に分光しスリットを通すことで、スポットサイズ 1 mm の単色スポット光を作る。この光を PMT に照射し光電面に流れ込む電流量をピコアンメータで測定する。また、光量が測定時期によって変化する可能性があるため、リファレンスとして QE が既知であるフォトダイオード (PD) にも光を照射し流れる電流量を測定する。PMT と PD が設置されている台は可動式になっているため、台を動かすことで光の照射位置を調整している。PMT と PD には光を照射していなくても発生するダークカレントが存在するため、この影響を考慮するために非照射時に流れる電流も測定する。光を照射時の PMT と PD に流れる電流量 $I_{\text{light}}^{\text{PMT}}$, $I_{\text{light}}^{\text{PD}}$ と非照射時の PMT と PD に流れる電流量 $I_{\text{dark}}^{\text{PMT}}$, $I_{\text{dark}}^{\text{PD}}$ と PD の QE から PMT の QE は式 (8) と表される。台を動かし 18×18 点で面分布を測定し、波長を変えて同様の測定を行うことで波長依存性を測定する。面分布の測定結果の例を図 34 に示す。

$$QE^{\text{PMT}} = \frac{I_{\text{light}}^{\text{PMT}} - I_{\text{dark}}^{\text{PMT}}}{I_{\text{light}}^{\text{PD}} - I_{\text{dark}}^{\text{PD}}} \times QE^{\text{PD}} \quad (8)$$

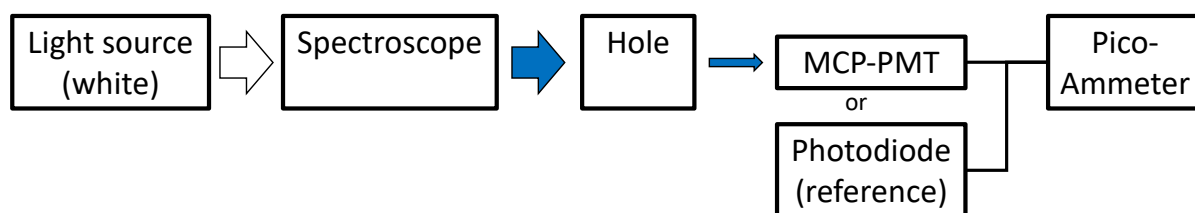


図 33 QE 測定のセットアップ。

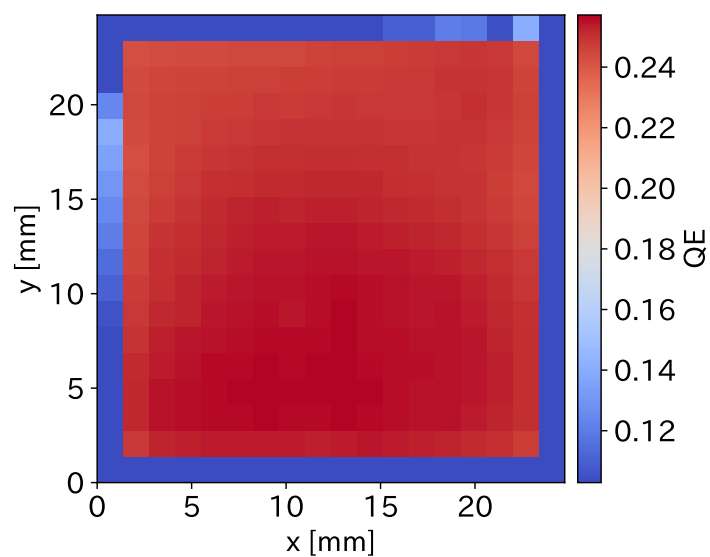


図 34 400 nm での QE 面分布。

3.2.2 PMT モジュールを用いた測定

MCP-PMT は 4 個 1 組の PMT モジュールとして TOP カウンターに実装されている。そのため、MCP-PMT を取り外した後に速やかに QE 測定を行えるように、測定ベンチを PMT モジュールに対応させる必要がある。

測定ベンチに PMT をモジュールを固定する台を作成した。作成した台と PMT モジュールを設置した様子を図 35,36 に示す。PMT モジュールの前面・下面・片側面を基準に位置を固定し、バネに使用し上部と下部に力を加えることで回転を抑制している。この台を使用することで PMT モジュール単位での測定が可能になった。

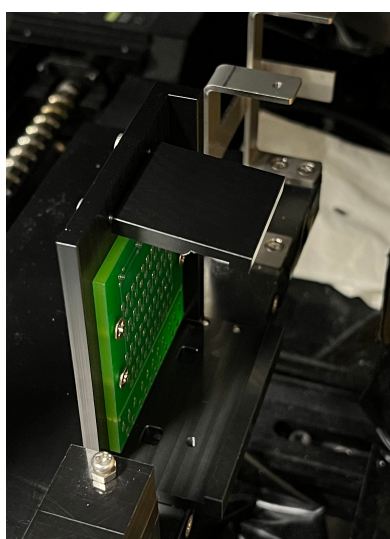


図 35 PMT モジュールを固定する台。

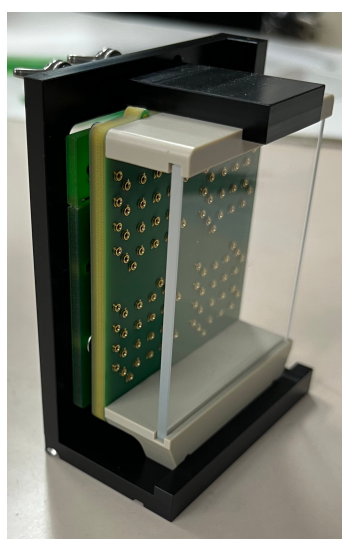


図 36 PMT モジュールを設置した様子。

3.2.3 QE 測定手法の改良

ダークノイズには、光を当てていなくても PMT の光電面から電子が出て発生するダークカレントと PMT を接続していなくても回路由来で発生するノイズがある。ノイズ成分の一様性を確認するために PMT をモジュールに取り付けずに測定を行った (図 37)。この結果からノイズ成分には主に上下方向に位置依存性があることが分かった。

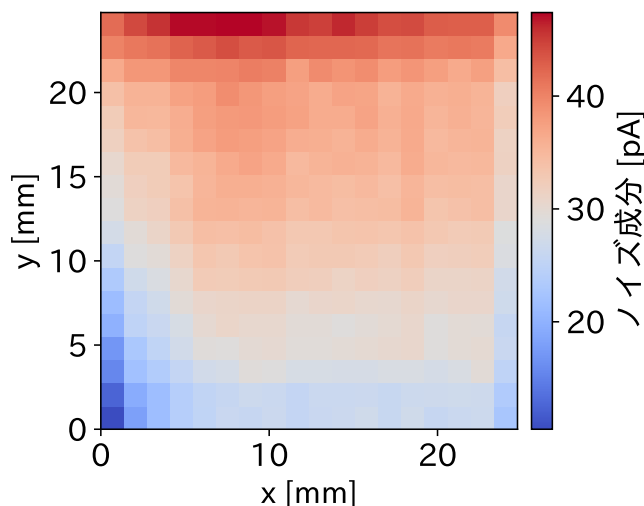


図 37 改良前のノイズ成分の位置依存性。

図 38 の左に示すように、従来はダークノイズを PMT 下部の固定点で測定していた。従来の測定手法ではダークノイズの上下方向位置依存性を打ち消すことができない。また、PMT モジュールを使用した測定では PMT を設置した位置によってダークノイズの影響が異なる。これらを考慮しダークノイズの測定位置を図 38 の右のように、スキャンする場所と同じ高さで PMT から横方向にずらした位置で測定するように変更した。変更後のノイズ成分の位置依存性は図 39 のようになっており、横方向の位置依存性が見えているがノイズ成分を一桁削減することができた。

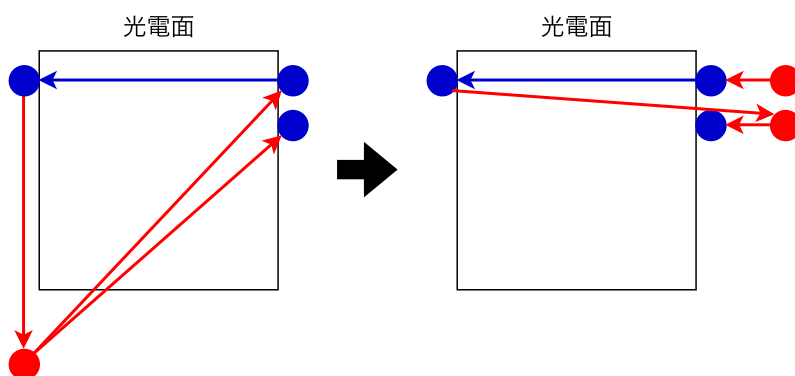


図 38 ダークノイズの測定位置 (左：従来、右：変更後)。

青丸は $I_{\text{light}}^{\text{PMT}}$ の測定位置、赤丸は $I_{\text{dark}}^{\text{PMT}}$ の測定位置をそれぞれ示している。

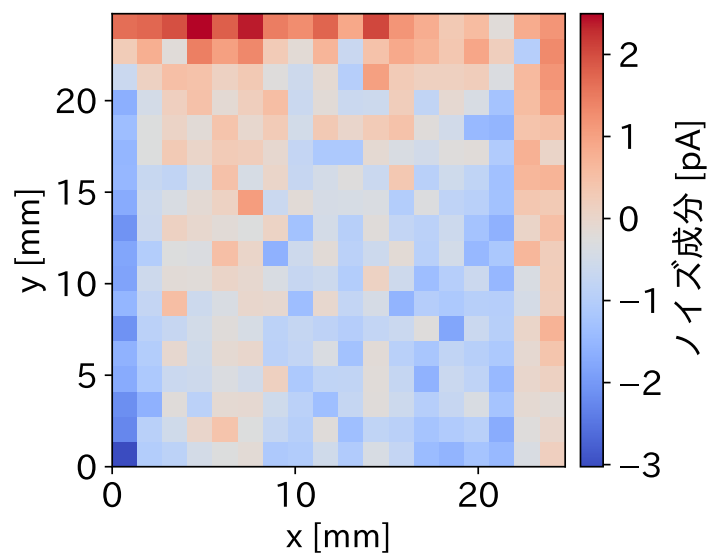


図 39 変更後のノイズ成分の位置依存性。

そして、PMT モジュールには波長カットフィルターが取り付けられているため、その影響を補正する必要がある。波長カットフィルターの影響には波長カットフィルターの内部透過率と波長カットフィルターを取り付けることにより生じる界面での反射がある。波長カットフィルター有無による光が通過する物質の違いを図 40 に示し、構成要素の屈折率の波長依存性は図 41 のようになっている。

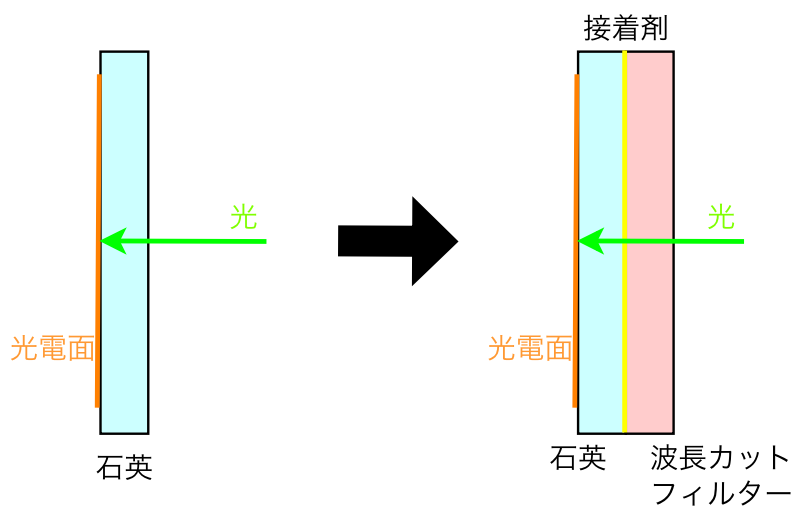


図 40 光が通過する物質 (左: 波長カットフィルター無し、右: 波長カットフィルター有り)。

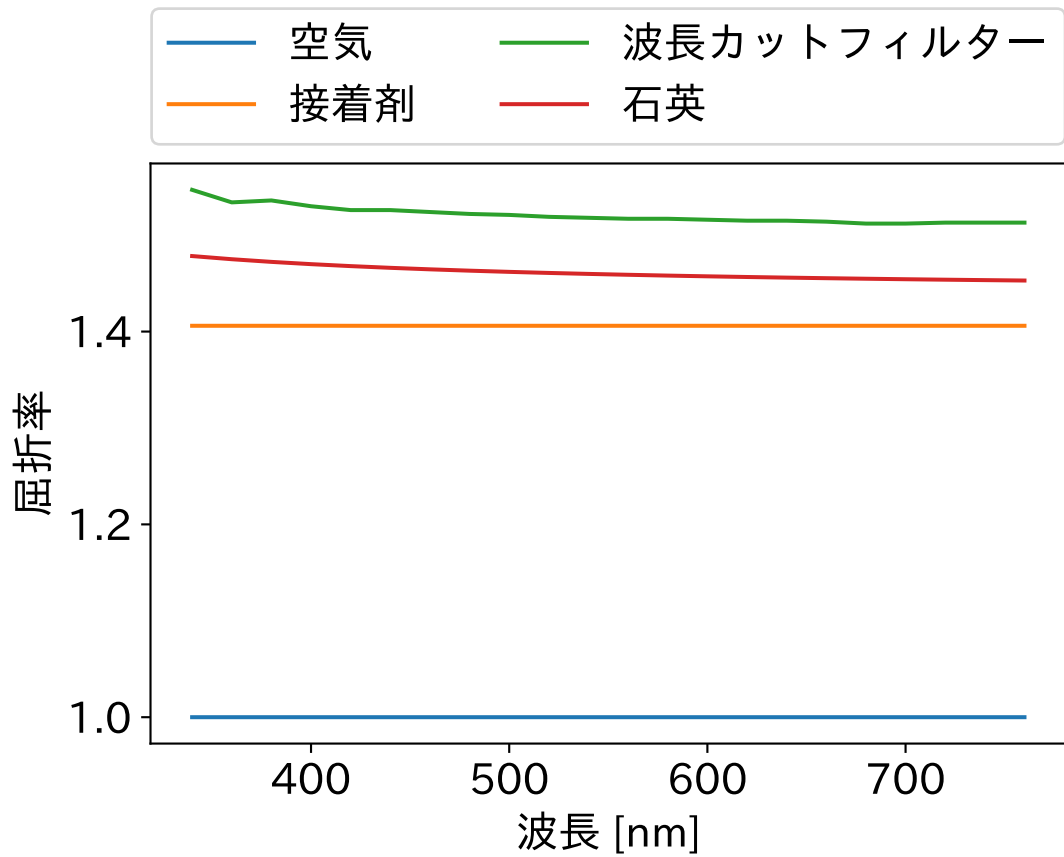


図 41 構成要素の屈折率の波長依存性。

これらより、補正関数 $f(\lambda)$ は式 (9) で表される。ここで添字はそれぞれ、qu は石英、adh は接着剤、fil は波長カットフィルターであり、 $Tr_{A-B}(\lambda)$ は A と B の界面での透過率、 $Tr_{fil}(\lambda)$ はフィルターの内部透過率である。式 (9) 右辺の各項と補正関数 f の波長依存性を図 42 に示す。

$$f(\lambda) = Tr_{air-fil}(\lambda) \times Tr_{fil}(\lambda) \times Tr_{fil-adh}(\lambda) \times Tr_{adh-qu}(\lambda) \div Tr_{air-qu}(\lambda) \quad (9)$$

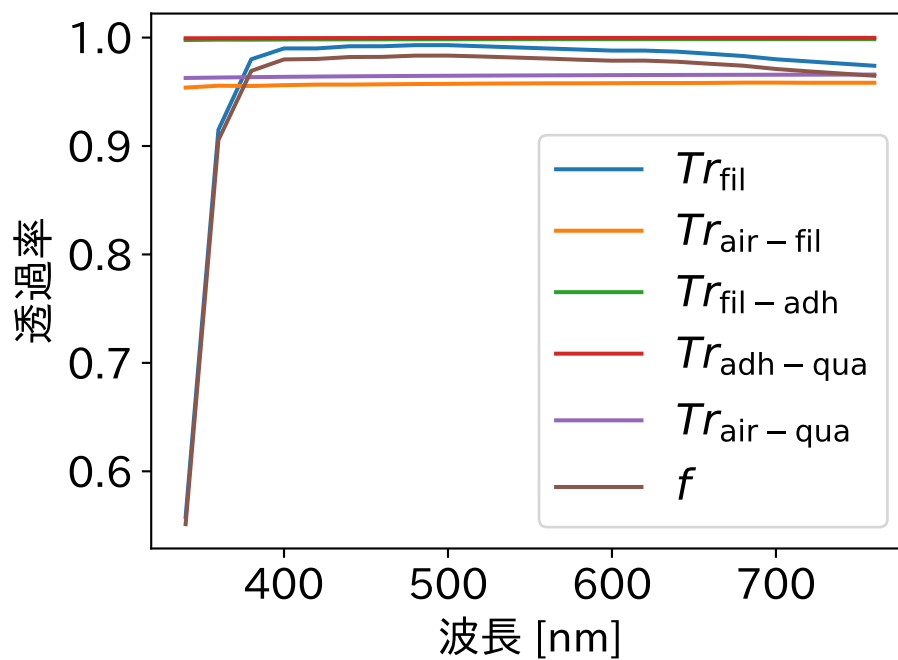


図 42 式 (9) 右辺の各項と補正関数 f の波長依存性。

波長カットフィルター有り無しで同じ PMT を測定し、補正関数 f を用いた補正で波長カットフィルターの影響を正しく補正が行えるか確認した。波長カットフィルターの有無による測定結果の比較を図 43 に示す。280 nm と 300 nm の結果については、波長カットフィルターの内部透過率が 10^{-3} であり、測定ベンチの測定限界を越えているためうまく補正できていない。波長カットフィルター有りの測定結果をどの PMT でも 1% の精度で補正することができた。

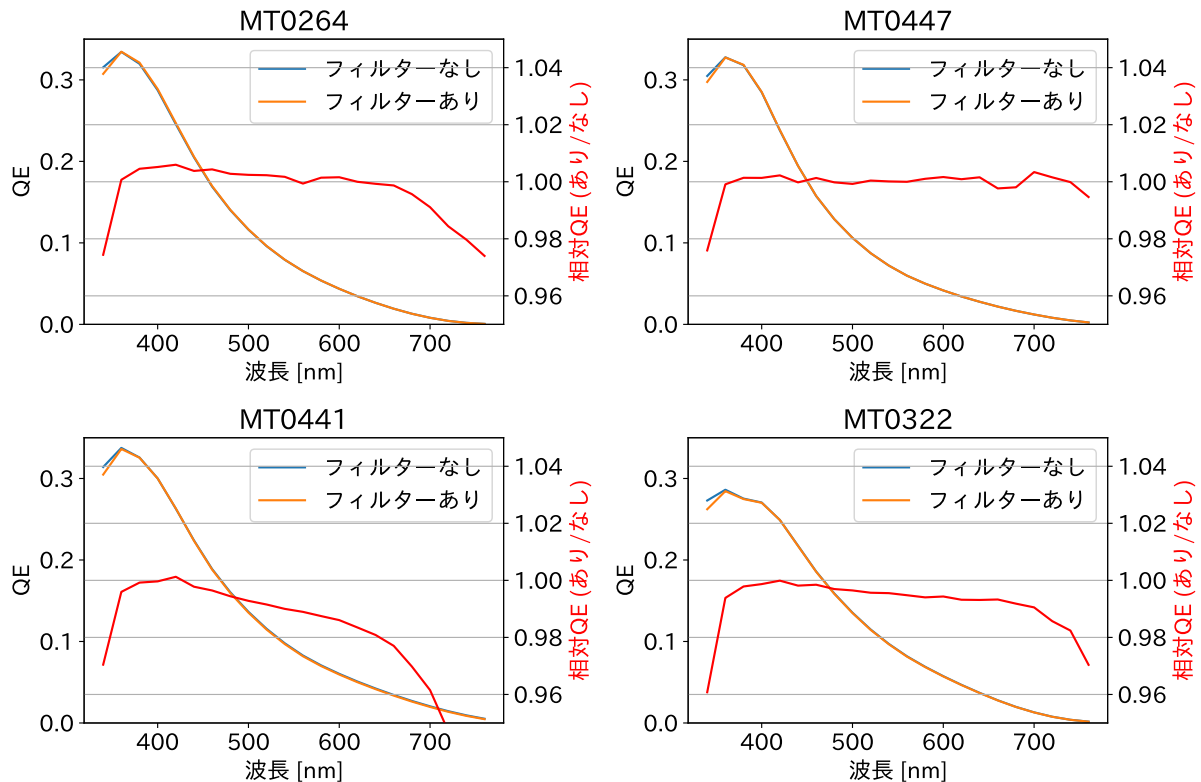


図 43 波長カットフィルターの有無による測定結果の比較。青色の線は波長カットフィルターなしでの測定結果、橙色の線は波長カットフィルターありでの測定結果を f を用いて波長カットフィルターの影響を補正した結果を示しており、左側の縦軸に対応している。赤色の線は波長カットフィルターの有無での測定結果の比を相対 QE として示しており右側の縦軸に対応している。

3.2.4 QE 測定精度の改良

取り外した MCP-PMT の QE を測定し、取り付ける前と比較するためには測定精度が重要である。PMT の交換作業時点での QE 低下の予測は 5% 程度であるため、QE 測定ベンチには 1~2% の精度が要求される。1 つの PMT を複数回測定し測定精度を評価した結果、ダークノイズの測定では差し引けていないランダムノイズが原因で測定結果がふらつくことがわかった。光源の光量を 10 倍に増加させ相対的にランダムノイズの影響を抑えた。光量調整前後の比較を図 44 に示す。光量調整後の測定結果は図 45 であり、標準偏差で 0.01% の精度での QE 測定を可能にした。

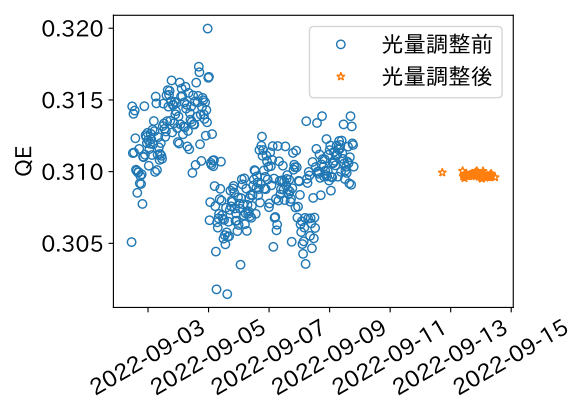


図 44 光量調整前後の測定結果の比較。

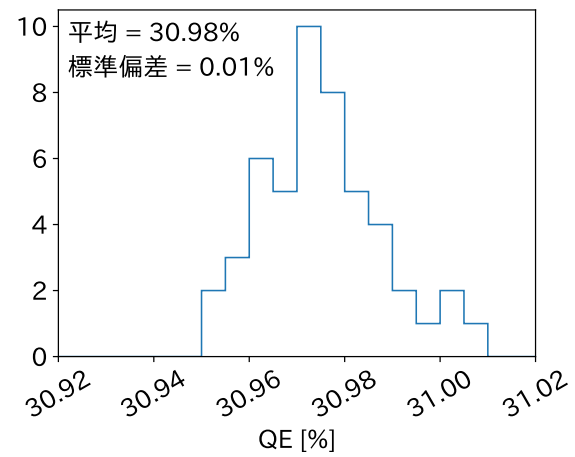


図 45 光量調整後の測定誤差評価結果。

4 衝突データを用いた QE 変動測定

衝突データから QE 変動を測定する流れを図 46 に示す。この章ではそれぞれの測定手法と測定結果についてまとめる。

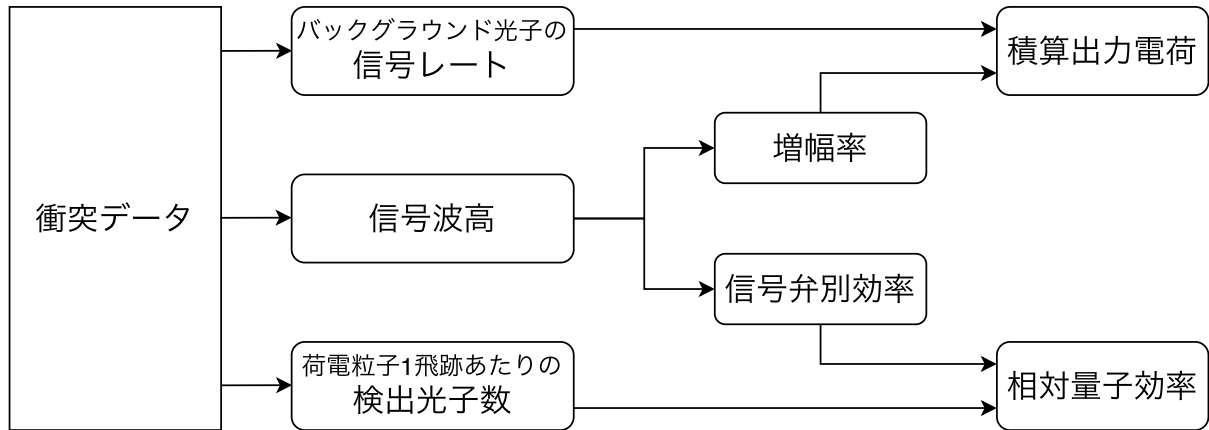


図 46 衝突データから QE 変動を測定する流れ

4.1 積算出力電荷測定

4.1.1 測定方法

PMT からの出力電荷量 Σ_Q は、PMT の背景事象を含む信号レート F と増幅率 G と素電荷 e を用いて式 (10) で計算することができる。信号レートと増幅率の測定方法を以下に述べる。

$$\Sigma_Q = e \int G(t)F(t)dt \quad (10)$$

信号レート

物理ラン中は PMT の信号のうち一定の閾値電圧を超えた信号をスケーラーでカウントしている。10 秒毎に信号レートを記録している。

増幅率

物理ラン中は 1PMT あたり 1 MHz を超える信号レートであるため、波高や波幅などの波形の特徴量のみを保存することで高速の読み出しを可能にし取得データの容量を抑えている。従って波高から増幅率を算出する必要がある。波高と増幅率の関係を調べるために、物理ランとは別に較正用のレーザーランを行なっている。レーザーランではサンプリングした波形を全て記録できるため、信号波高に加えて出力電荷量を得られる。また、得られた出力電荷量から増幅率を算出している。レーザーランでは図 47 に示すような増幅率を得られ、平均値を用いて評価する。HV を変更して同様の測定を行うことで、図 48 のような平均波高 h と平均増幅率 G の関係を得られ、フィッティングパラメータ a 、 b を用いて式 (11) で近似できる。このようにして得られた波高と増幅率の関係を使用し、1 日毎に平均波高から平均増幅率を算出している。

$$G = a \cdot h^b \quad (11)$$

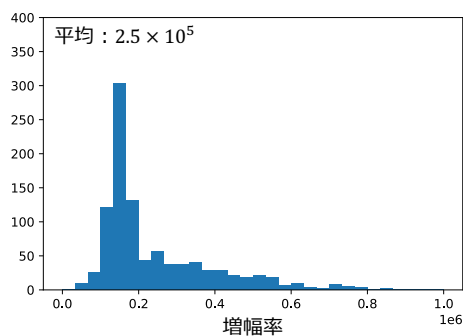


図 47 レーザーランで得られる増幅率の例。

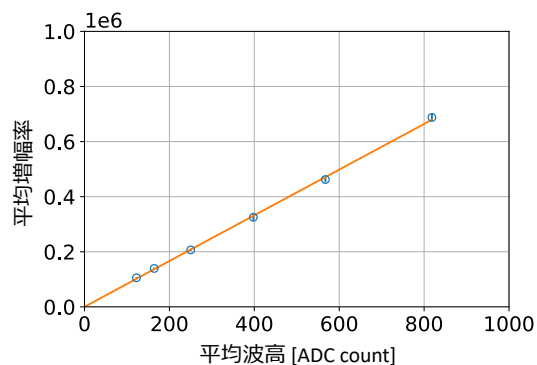


図 48 レーザーランで得られる増幅率と波高の関係。

4.1.2 測定結果

PMT の型毎の平均積算出力電荷量の推移を図 49 に示す。また、2022 年 7 月時点での全 PMT の積算出力電荷量を図 50 に示す。積算出力電荷量は $0.2 \sim 0.4 \text{ C/cm}^2$ であり、最も寿命の短い初期量産型の平均寿命 1.1 C/cm^2 に比べて十分に小さい。よって、初期量産型の一部を除いて QE は低下していないと予想される。

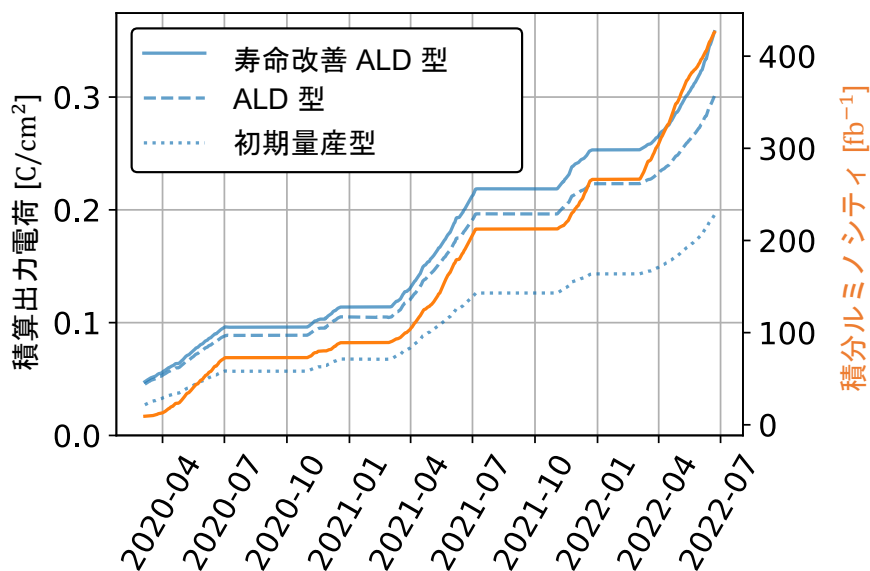


図 49 PMT の型毎の平均積算出力電荷量の推移。

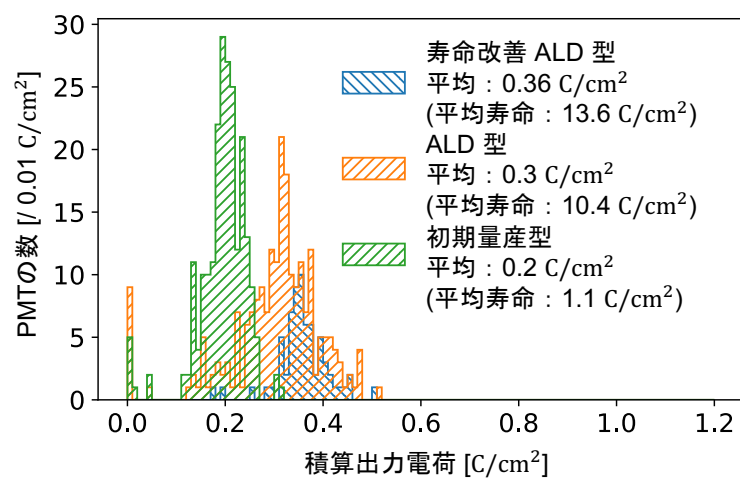


図 50 2022 年 7 月時点での積算出力電荷量。0 付近のピークには読み出し回路の不調によって正しく積算出力電荷量を計算できていない PMT が含まれている。

4.2 QE 変動測定

4.2.1 測定方法

発生する光子数が一定になる物理事象を使用し検出光子数の変動を見ることで、MCP-PMT の QE の変動を調べることができる。そのようなイベントとして、ダイミュオン事象 ($ee \rightarrow \mu\mu$) を使用する。このイベントは 2 体崩壊であるため重心系ではミュオンの運動量が一意に定まる。実験室系では TOP カウンターに入射した角度を固定することで運動量を一定にすることができる。発生するチェレンコフ光子数は運動量に依存するため、この事象で発生する光子数は一定になる。

TOP カウンターにミュオンが入射したときに PMT から出る信号には、チェレンコフ光由来の信号とそれ以外の背景信号が存在する。そのため、TOP カウンターにミュオンが入射していないときの信号数 N_0 を測定し、TOP カウンターにミュオンが 1 つ入射したときの信号数 N_1 から引くことでミュオン 1 飛跡あたりの検出光子数を算出する。

また、QE 以外の要因で検出光子数が減少する効果の補正が必要である。図 51 のように、1 光子を検出した際の PMT から信号は増幅率に幅がある。そのため、一定の閾値電圧で信号弁別を行うと増幅率が低い信号はカットされてしまう。MCP-PMT には運転中に増幅率が低下する特徴があり閾値電圧を変更していないため、信号弁別効率が低下し検出光子数が減少しているように見えてしまう。平均増幅率と信号弁別効率の関係は図 52 のようになり、各 PMT についてこの関係を測定し補正を行う必要がある。

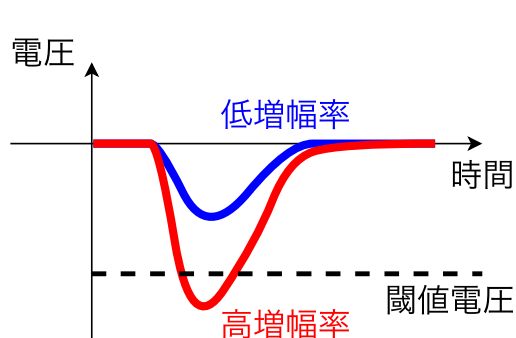


図 51 PMT から出力される信号のイメージ図。

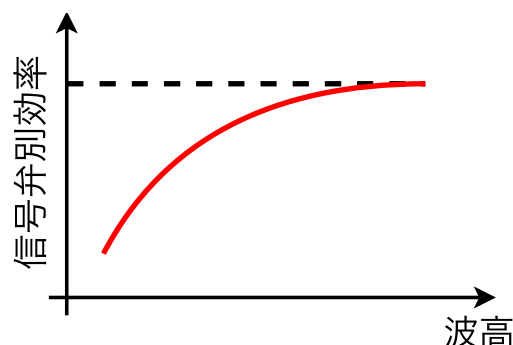


図 52 平均増幅率と信号弁別効率の関係。

平均増幅率と信号弁別効率の関係を調べるために、前述のレーザーランの結果を使用する。レーザーの入射回数に対する検出された信号数の割合を信号弁別効率とする。基準電圧に対して $-150 \text{ V} \sim 150 \text{ V}$ の範囲で HV を変更して同様の測定を行うことで、図 53 のような平均波高 h と信号弁別効率 Eff の関係が得られ、フィッティングパラメータ a, b, c, d を用いて式 (12) で近似する。得られた関係を利用し、1 日毎の平均波高から信号弁別効率を算出する。

$$Eff = a \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{h-b}{c}\right) + \left(\frac{h-b}{d}\right)^2 \times \sin(h-b) \quad (12)$$

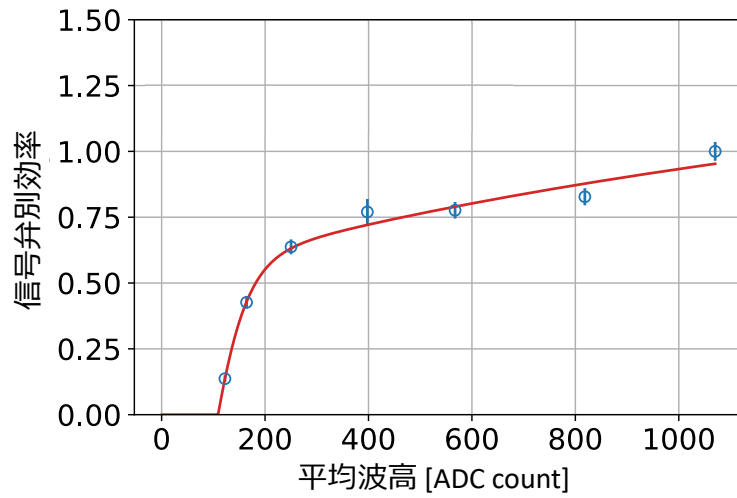


図 53 レーザーランから得られる信号弁別効率と平均波高の関係。

以上の結果を使用し、初期の QE を 1 とした相対 QE (Rel.QE) は式 (13) で与えられる。

$$\text{Rel. QE}(t) = \frac{N(t)}{N(0)} \cdot \frac{\text{Eff}(0)}{\text{Eff}(t)}, \quad N = N_1 - N_0 \quad (13)$$

4.2.2 測定結果

それぞれの PMT の QE 変動を図 54 に示す。2022 年 7 月現在の相対 QE を図 55 に示す。

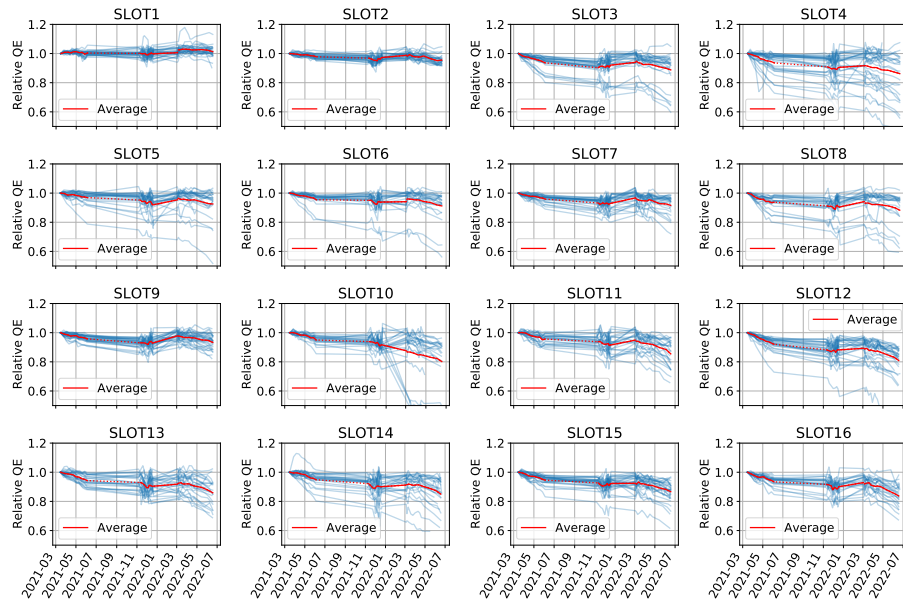


図 54 それぞれの PMT の QE 変動。青色の線は PMT1 つずつの QE 変動、赤色の線は SLOT 毎に平均を取った QE 変動を示している。中央値から大きく外れた PMT は含めずに平均を取っている。

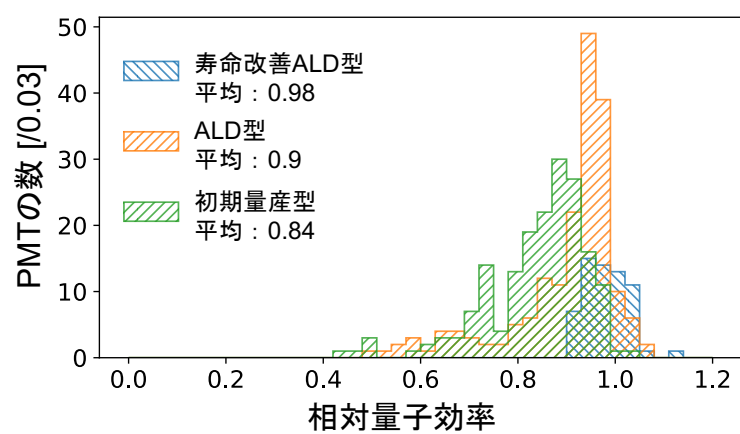


図 55 2022 年 7 月現在の相対 QE。

4.3 寿命測定試験から得られた予測との比較

PMT の型毎の平均 QE 変動と事前の測定で得られた QE 変動予測との比較を図 56 に示す。初期量産型の PMT の平均値は、事前測定で得られた初期量産型の最小寿命である 0.3 C/cm^2 よりも大きく QE が低下している。また、ALD 型の PMT は事前測定では平均寿命 10.4 C/cm^2 と得られていたが、初期量産型の平均寿命である 1.1 C/cm^2 よりも大きく QE が低下している。

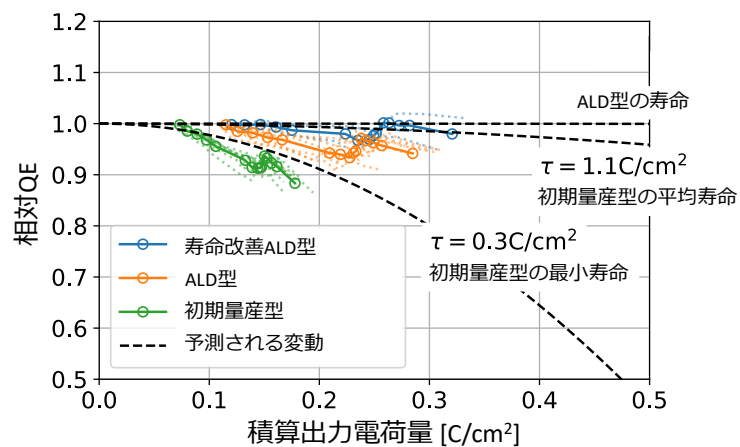


図 56 寿命測定試験から得られた予測との比較。

この結果を評価するために、予測と測定結果で差異が生じた原因の理解と QE 変動測定の検証が必要である。

5 QE 低下の原因調査

MCP-PMT の QE が低下する要因は、電子の増幅過程で MCP 表面から残留ガスが放出され光電面に到達することで光電面と反応してしまうことである [6]。そのため衝突データを用いた QE 変動測定で予測よりも大きい低下が見られた原因の一つとして、事前に行った寿命測定試験時と実機では温度が異なることが考えられる。温度が異なると、増幅時に放出されるアウトガスの増加や光電面とアウトガスとの反応が変化する可能性があるためである。寿命測定試験時は室温 (20 ~ 30°C) であり、実機は PMT 周辺の回路等の影響によって最大で 40°C まで上がる可能性がある。この温度の違いが QE 変動に与える影響を調べるために、加熱試験と高温環境運用による試験を行った。

5.1 測定方法

加熱試験では温度のみが QE に与える影響を調査し、高温環境運用による試験では高温環境下で電圧を印加しながら光を照射し電荷を出力させることで温度が電荷出力による QE 低下に与える影響を調査した。

加熱試験

後述する高温環境運用による試験と同じ期間で温度を変化させ、温度が QE に与える影響を調査する。

また、電荷出力を行う高温環境運用試験との対照実験であるため、リファレンスとしても使用する。

高温環境運用による試験

以前の寿命測定のセットアップ [6] を恒温槽内に再現した。恒温槽の内部は以前使用していた暗箱の内部よりも狭いため新たに PMT や LED を固定する台を設計し製作した。恒温槽内部のセットアップを図 57 に示す。LED の照射タイミングを基準に PMT からの信号を測定することで、LED 照射 1 回当たりの平均出力電荷量を得ることができる。LED の照射レートと照射 1 回当たりの平均出力電荷量から積算出力電荷量を得る。この測定に加えて定期的に QE 測定を行い、積算出力電荷と QE 変動の関係をj得る。室温 (20 ~ 30°C) と高温 (40°C) に保った状態でこれらの測定を行う。

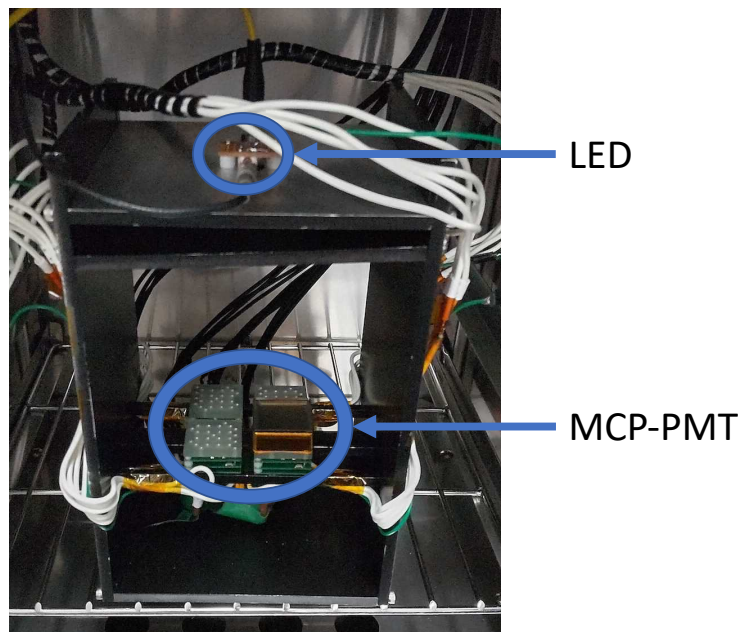


図 57 恒温槽内部のセットアップ。

5.2 寿命改善 ALD 型での測定結果

5.2.1 加熱試験

寿命改善 ALD 型 PMT の中で以前寿命測定で使用し様々な相対 QE のものを用いて測定を行った。使用した PMT の積算出力電荷量と相対 QE を表 3 に示す。

表 3 加熱試験に使用した寿命改善 ALD 型 PMT。

PMT ID	積算出力電荷量 [C/cm^2]	相対 QE
YH0208	7.7	1.04
KT0488	5.5	1.01
YH0206	12	0.99
YH0203	31.9	0.87

約 3 週間加熱試験を行い、試験前後の QE 変動を図 58 に示す。QE 変動の平均値は $1.2 \pm 0.8\%$ と得られた。

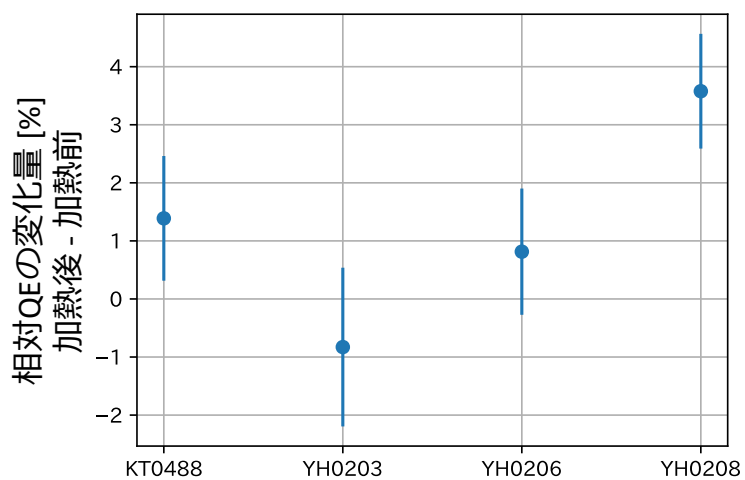


図 58 寿命改善 ALD 型の加熱試験前後の QE 変動。

5.2.2 高温環境運用による試験

使用した PMT の開始時の積算出力電荷量と相対 QE を表 4 に示す。

表 4 高温環境運用による試験に使用した寿命改善 ALD 型 PMT。

型番	積算出力電荷量 [C/cm ²]	相対 QE
MT0334	10.2	0.94
MT0437	10.3	0.88
MT0472	7.1	0.92
MT0481	7.2	0.87

積算出力電荷と QE 変動の測定結果の例を図 59 に示す。それぞれの温度の測定結果を 1 次関数でフィットし、傾きの差分をとることで温度が QE 変動に与える影響を調べた。その結果を図 60 に示す。

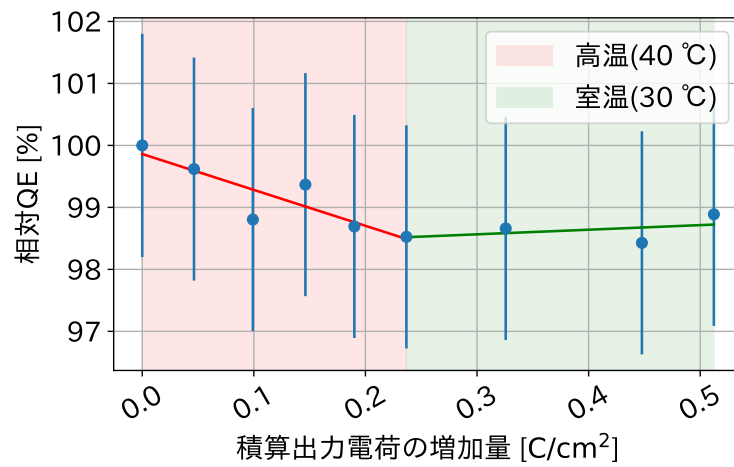


図 59 積算出力電荷と QE 変動の測定結果。

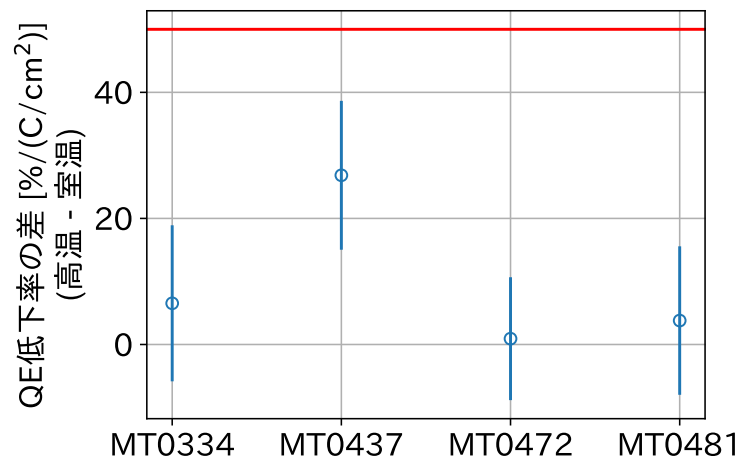


図 60 寿命改善 ALD 型 PMT を用いた高温環境動作による試験結果。赤線は衝突データを用いた QE 変動測定でみられている、予測よりも大きい QE 低下率 50%/(C/cm²) を示している。

5.3 初期量産型での測定結果

5.3.1 加熱試験

使用した PMT の積算出力電荷量と相対 QE を表 5 に示す。

表 5 加熱試験に使用した初期量産型 PMT。

PMT ID	積算出力電荷量 [C/cm ²]	相対 QE
JT0936	12.6	0.41
JT0940	11.3	0.34
XM0205	3.7	0.21
XM0267	1.2	0.70

各 PMT の測定結果を図 61 に示す。どの PMT でも最初の室温での測定では QE の変化はほとんどないが、40 °C に変えた次の QE 測定で 2 ～ 3% の低下がみられた。そして、室温に戻してから測定では QE が徐々に回復している。

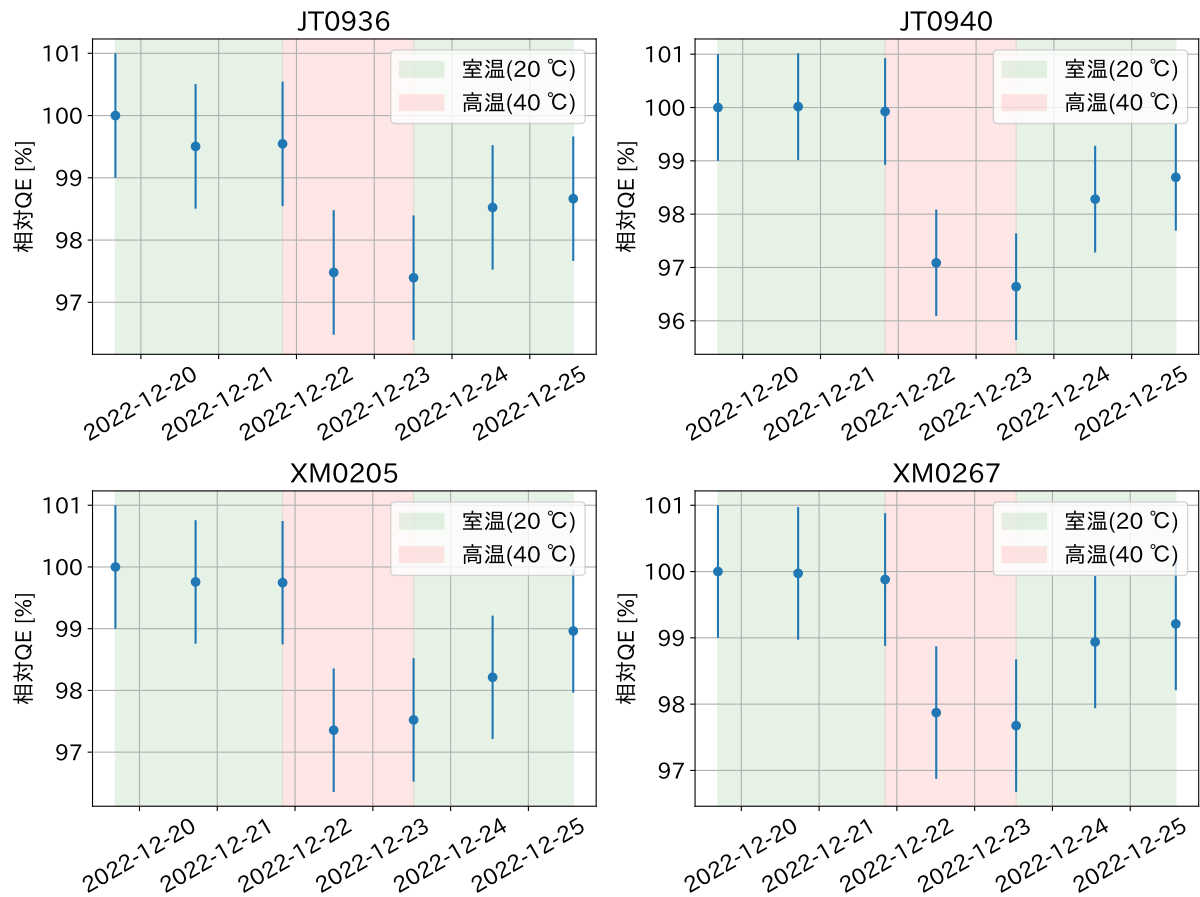


図 61 初期量産型での加熱試験の結果。

5.3.2 高温環境運用による試験

使用した PMT の積算出力電荷量と相対 QE を表 6 に示す。

表 6 加熱試験に使用した初期量産型 PMT。

型番	積算出力電荷量 [C/cm ²]	相対 QE
JT0695	2.1	0.67
JT0898	2.3	0.65
JT0901	0.7	0.51
XM0376	2.8	0.77

各 PMT の測定結果を図 62 に示す。温度を変えた後の測定では加熱試験の結果と同じように QE が大きく変動している可能性があるため、各温度での測定点のうち 2 点と 3 点目を使用して傾きを算出した。後半の室温での測定には加熱試験でみられた QE の増加の効果が含まれているため、前半の室温と高温の結果を用いて算出した QE 低下率の差を図 63 に示す。測定誤差が大きく 2 点のみ傾きであるため誤差がかなり大きいですが、どの PMT でも 40 °C での測定の方が QE が大きく低下する傾向が見えている。

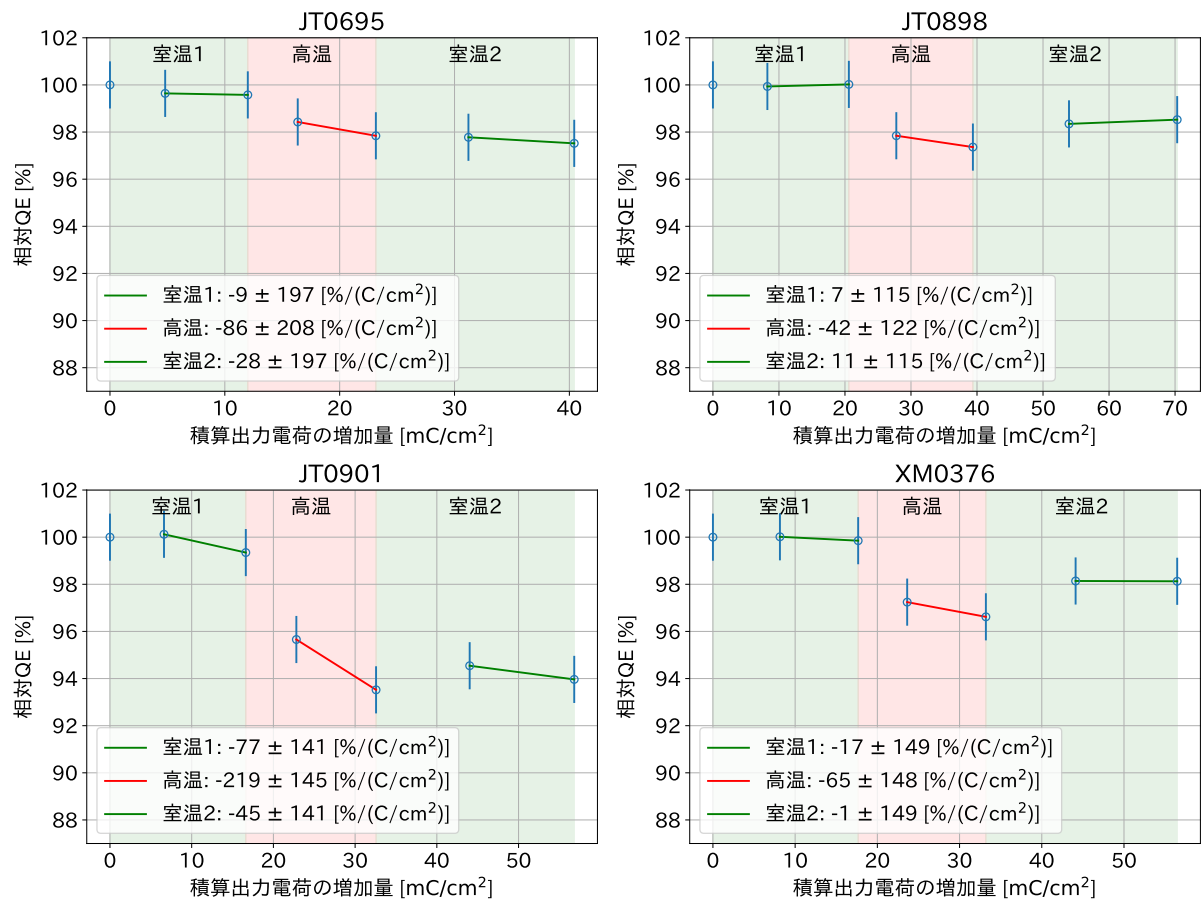


図 62 初期量産型での高温環境運用による試験の結果。

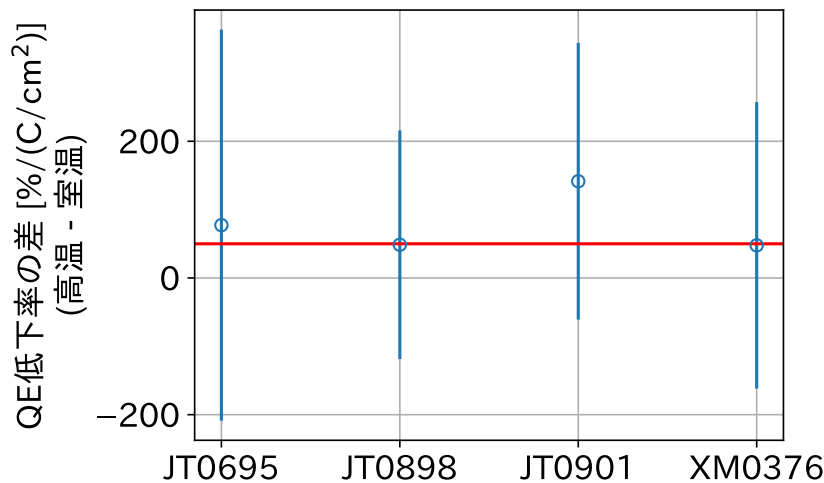


図 63 室温と高温の QE 低下率の差。赤線は衝突データを用いた QE 変動測定でみられている、予測よりも大きい QE 低下率 50%/(C/cm²) を示している。

5.4 考察

寿命改善 ALD 型

加熱試験と高温環境運用による試験の結果で温度による QE 低下の兆候がみられた。しかし、現在の TOP カウンターで見えている 50%/(C/cm²) に比べて十分小さいことから、温度は大きな QE 低下の主要な原因ではない可能性がある。

初期量産型

加熱試験では、温度を上げた後の測定で大きな QE 低下がみられたが、温度を下げると徐々に回復する傾向がみられた。このことから、PMT 内の温度と QE に関係があることが考えられる。例えば、PMT 内の温度が上昇すると光電面のアルカリバランスが変化し QE が低下して見えるという可能性がある。また高温環境運用による試験の結果でも温度による QE 低下の兆候がみられた。温度の変化 20 °C をエネルギーに換算すると 2 meV 程度であり、電場による加速は O(keV) であるため、温度によって残留ガスが光電面に与える衝突エネルギーの変化量は小さい。温度による QE 低下が正しいとすれば、QE の低下には光電面と残留ガスの化学的な反応が影響していると考えられる。

今回の測定では測定精度の問題で温度の影響を正しく評価できていないため、今後さらなる検証が必要である。また温度による QE 低下が確かめられた場合、PMT の冷却機能を実装し 20 °C で運用することで温度による QE 低下を抑えて安定運用可能であると考えられる。

加熱試験により寿命改善 ALD 型では温度の違いによる大きな QE 変動は見られず、初期量産型では高温ほど QE が大きく低下する特性が見られた。この二つの型には製造工程において ALD コーティングの有無と残留ガス対策に違いがあり、初期量産型の方が PMT 中の残留ガスや放出されるガスの量が多い。そのため、温度の増加に伴い真空中へ放出されるガスの量も増加することで、光電面との反応が促進され QE が早く低下すると考えられる。今回試験を行っていない ALD 型では ALD コーティングによって残留ガスの放出を抑制しているため、温度の違いによる大きな QE 低下は起こらないと予想される。

しかし、衝突データを用いた QE 変動測定では ALD 型についても予測より大きい QE 低下がみられている。そのため、温度以外にも QE が大きく低下して見える要因があると考えられる。他に考えられる要因の 1 つは、電荷出力を行う期間によって寿命が変化する可能性である。寿命測定試験では高頻度で光を当てることで短期間に大量の電荷を出力しているが、実際の運転では長期間にわたって少しずつ電荷を出力している。短期間に大量に電荷出力を行うことで残留ガスの放出量が飽和する場合、少しずつ電荷出力を行うときと比較して電荷出力あたりの光電面に与える影響は小さくなると考えられる。時間あたりの電荷出力量が寿命に与える影響を調査するために追加の検証が必要である。

5.5 追加の検証 (最終版追記分)

初期量産型を使用した加熱試験と高温環境運用による試験によって、温度による QE 低下の促進が示唆された。MCP の温度が QE 低下の促進に影響している場合、外部からの加熱だけでなく高電圧の印加による温度上昇も影響する可能性がある。また、使用している MCP-PMT の QE が低いことため QE 測定ベンチの測定で QE にばらつきがみられている。これらの理由から測定の条件をさらに分割して温度による影響を調査した。1 つ目の条件では、温度変化や PMT の運用を行わずリファレンスとして QE 測定ベンチの誤差評価を行った。2 つ目の条件では、前述の加熱試験と同様に温度変化のみを行い、MCP-PMT 内部の温度が QE に与える影響を調査した。3 つ目の条件では、温度変化に加えて高電圧を印加し、温度と高電圧の印加が QE に与える影響を調査した。4 つ目の条件では、前述の高温環境運用による試験と同様に温度変化と PMT の運用を行い、温度が電荷出力による QE 変動に与える影響を調査した。

測定結果を図 64 に示す。まず 1 つ目の条件での測定結果より、QE 測定ベンチの測定誤差は相対値で 0.45% と定めた。次に 2 つ目の条件での測定結果から、温度変化に伴う QE 低下が見られた。温度上昇に伴い QE が低下し温度を下げると QE が上昇することから、この QE 変動は永続的な QE の劣化ではなく温度変化による光電面の性質の変化であると考えられる。他の条件での測定においても温度変化の際に QE が変動することを考慮する必要がある。そして、3 つ目の条件での測定では、温度を変化させた際に 2,3 日程度 QE の変動がみられた。2 つ目の条件ではこの変動はみられなかったため、高電圧を印加したことによる変動であると考えられる。温度変化から 3 日後には QE が安定しているため、4 つ目の条件での測定において温度が電荷出力による QE 変動に与える影響を調査する際には、温度変化から 3 日分の測定結果を使用せずに評価を行う。

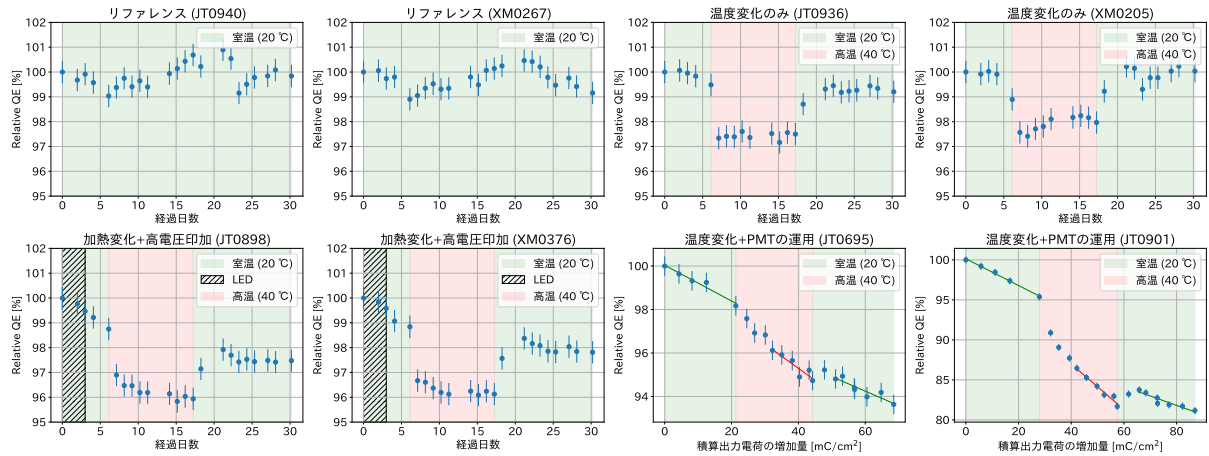


図 64 4 パターンの加熱試験の測定結果。上段左側の 2 つのグラフは 1 つ目の条件での測定結果、上段右側の 2 つのグラフは 2 つ目の条件での測定結果、下段左側の 2 つのグラフは 3 つ目の条件での測定結果、下段右側の 2 つのグラフは 4 つ目の条件での測定結果を示している。それぞれのグラフにおいて、背景が緑色の期間では室温環境で試験を行っており、赤色の期間では高温環境で試験を行った。下段右側の 2 つのグラフ除いた 6 つのグラフにおいては、横軸は試験を始めてからの経過日数、縦軸は試験開始時の QE を 100% とする相対 QE を示している。また、下段右下の 2 つのグラフにおいては、横軸は測定開始からの積算出力電荷の増加量、縦軸は測定開始時の QE を 100% とする相対 QE をそれぞれ示している。

積算出力電荷と相対 QE の関係は式 (7) で近似されるため、QE 変動の傾き $SLOPE$ は積算出力電荷量 Q と寿命 τ を用いて式 (14) のように表せる。式 (14) を使用し、測定結果から得られる QE 変動の傾きと積算出力電荷量から寿命を算出し、温度による寿命の変動を調査した。その結果を図 65 に示す。この結果から、温度の上昇に伴い QE 低下が促進され寿命が短くなることがわかった。温度は QE 低下の原因の一つではあるが、衝突データを用いた QE 変動測定でみられている予測よりも早い QE 低下を完全に説明することはできないため、他の原因についても調査する必要がある。

$$SLOPE = -0.4 \cdot \frac{Q}{\tau^2} \quad (14)$$

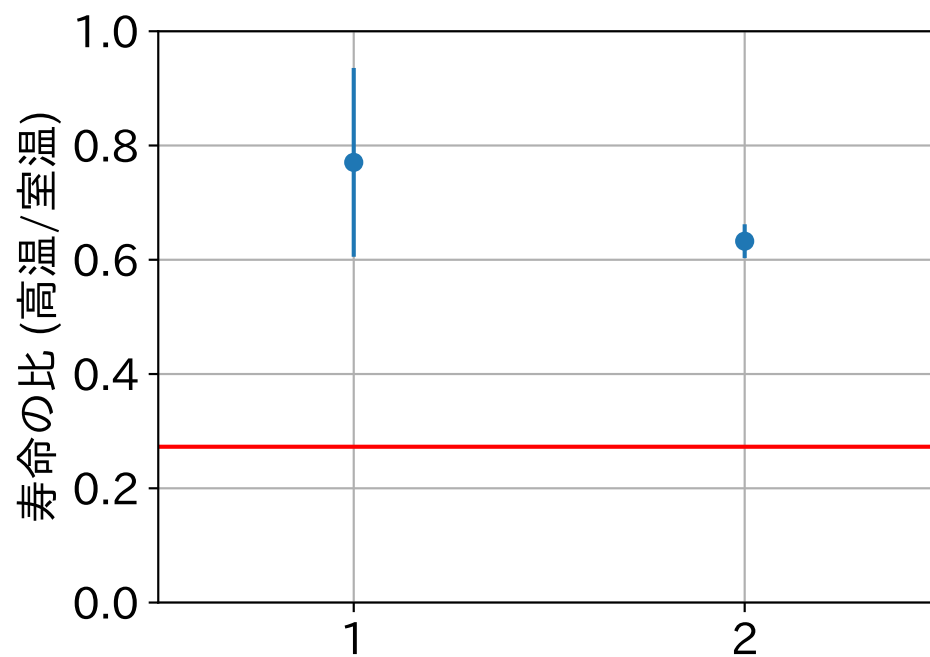


図 65 温度による寿命の変化。縦軸は算出された寿命の比を示している。赤線は衝突データを用いた QE 変動測定でみられている予測よりも早い QE 低下の比 (0.3/1.1) を示している。

6 実機 MCP-PMT の QE 測定

衝突データを用いた QE 変動測定の結果を検証するために、スロット 16 に実装されている初期量産型の PMT32 個を取り外し、名古屋で QE 測定を行った。このスロットには、読み出し回路の不調により途中から HV をかけておらず積算出力電荷が小さい PMT も含まれている。これらの PMT は QE が低下していないと予想されるため、同じ環境に置いてあったリファレンスとして比較することができる。

6.1 測定結果

測定した 32 本のうち 1 モジュール分にあたる 4 つの PMT の測定結果を図 66 に示す。どの PMT でも長波長側ほど QE が大きく低下しており、この関係は以前行った寿命測定でも同様に見えていた。

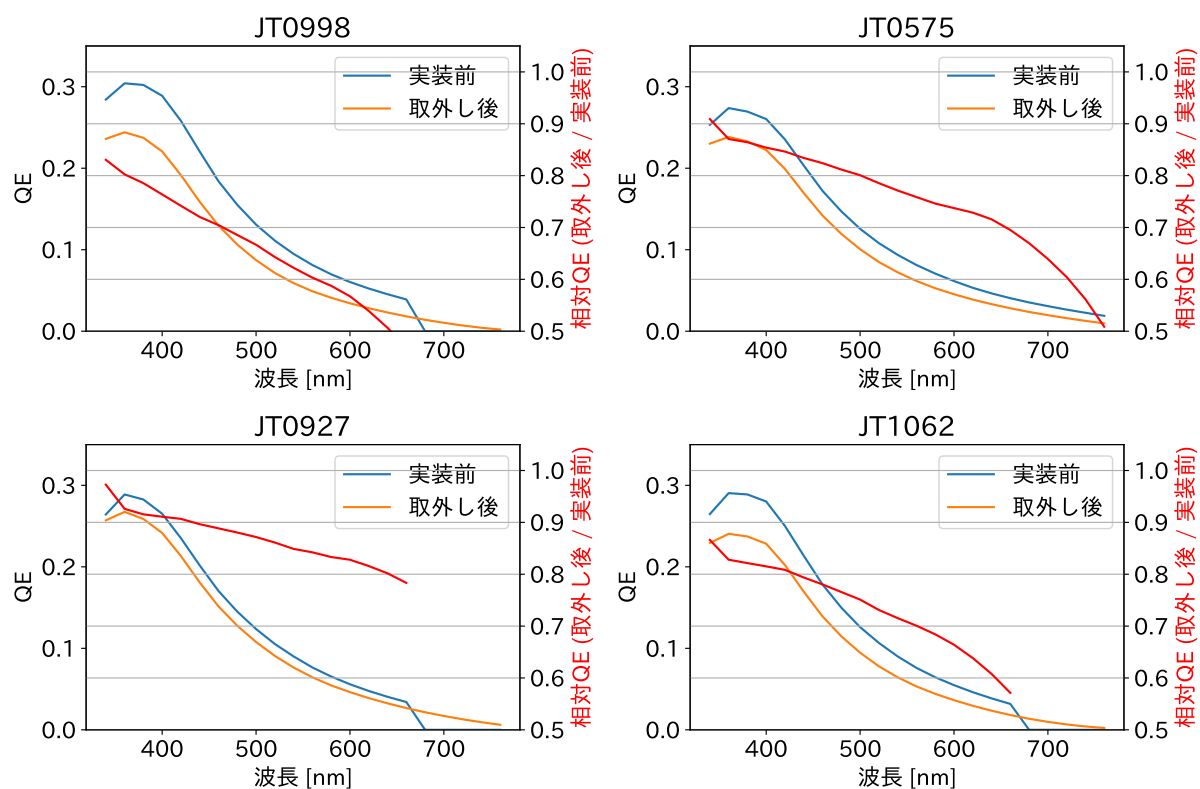


図 66 モジュール 8 の測定結果。青色の線は TOP に実装する前の測定結果、橙色の線は取外し後の測定結果を波長カットフィルターの影響を補正した結果を示しており左側の縦軸に対応している。赤色の線は実装前と取外し後の比を相対 QE として示しており右側の縦軸に対応している。

次に、運転の途中で HV を印加しておらず、積算出力電荷量が小さいモジュール 4 の測定結果を図 67 に示す。モジュール 8 の PMT に比べると QE の低下は小さいが、大きいもので 10% ほど低下している。PMT の QE は低下していないと予測されるため、波長カットフィルターや接着剤の透過率が放射線などの影響により劣化することによって補正が正しく行えず QE が低下して見える可能性が考えられる。

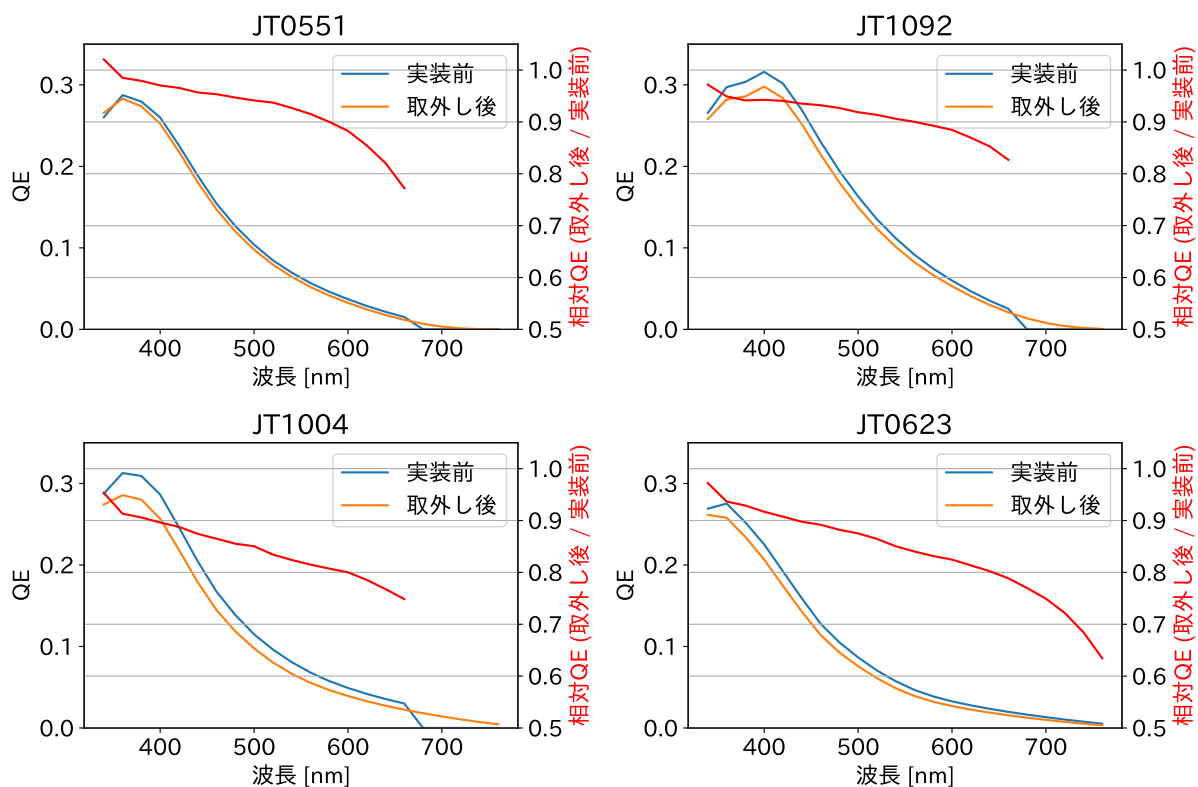


図 67 モジュール 4 の測定結果。

波長カットフィルターや接着剤が劣化している場合全ての測定結果を補正する必要があるため、モジュール 2 つ (モジュール 4 と 8) を解体し再度 QE 測定を行い比較した。その結果を図 68 に示す。どの PMT でも波長カットフィルターの有無によって測定された QE は 1% の精度で一致しているため、波長カットフィルターや接着剤の透過率の劣化はないと考えられる。

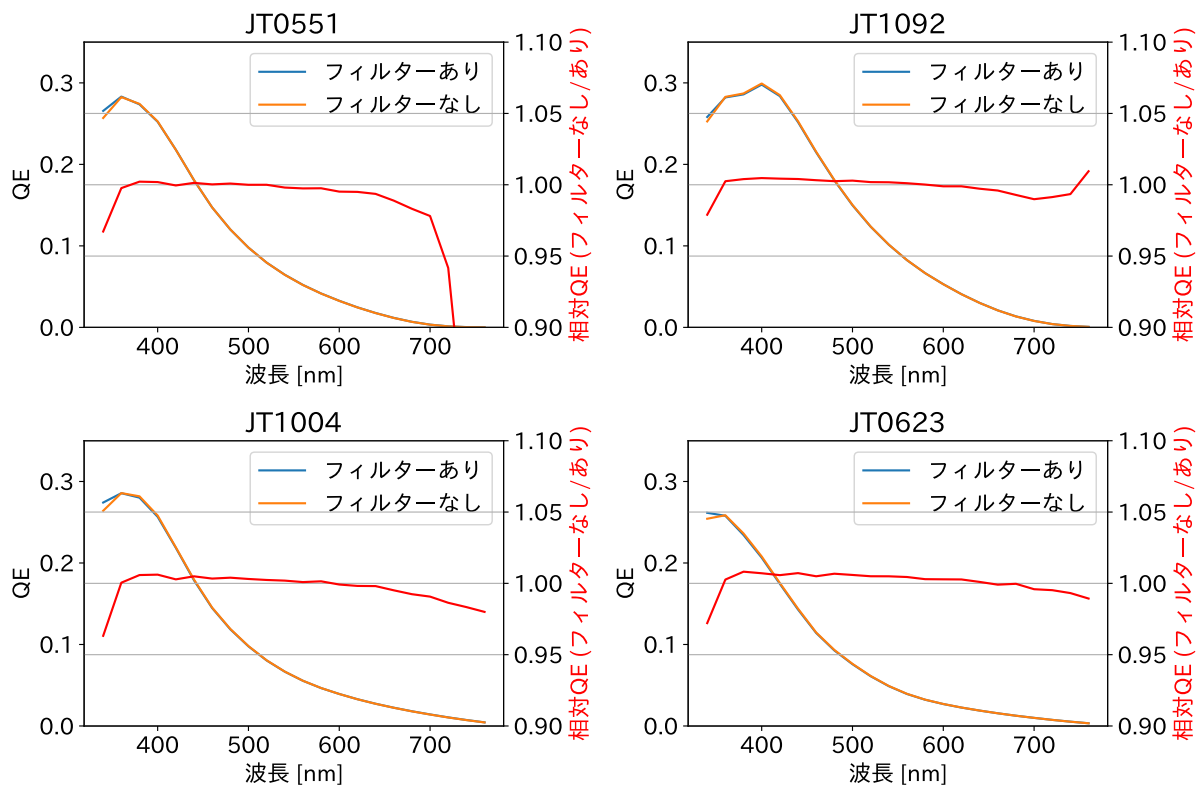


図 68 モジュール 4 での波長カットフィルターの影響比較結果。

6.2 衝突データを用いた QE 測定結果との比較

衝突データを用いた QE 変動測定では発生するチェレンコフ光の波長を全て含んだ QE であるため、名古屋での QE 測定の結果をチェレンコフ光と波長カットフィルターの透過率を考慮した波長分布を用いて重み付け平均を行い結果を比較する。チェレンコフ光の発生確率は λ^2 に反比例するため平均の重み W は式 (15) のように表せる。図 69 に 式 (15) 右辺の各項の波長依存性、図 70 に平均の重み W の波長依存性を示す。

$$W(\lambda) = \frac{1}{\lambda^2} \times Tr_{qu-adh}(\lambda) \times Tr_{adh-fil}(\lambda) \times Tr_{fil}(\lambda) \times Tr_{fil-adh}(\lambda) \times Tr_{adh-qu}(\lambda) \quad (15)$$

ここで添字はそれぞれ、qu は石英、adh は接着剤、fil は波長カットフィルターであり、 $Tr_{A-B}(\lambda)$ は A と B の界面での透過率、 $Tr_{fil}(\lambda)$ はフィルターの内部透過率である。

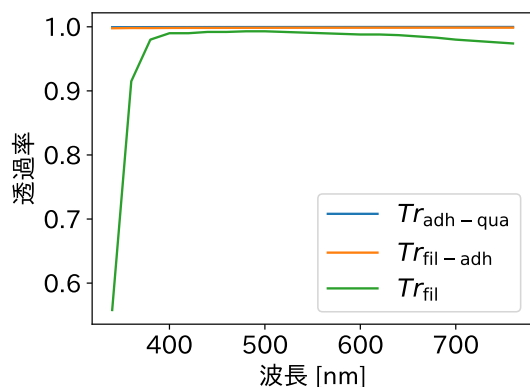


図 69 式 (15) 右辺の各項の波長依存性。

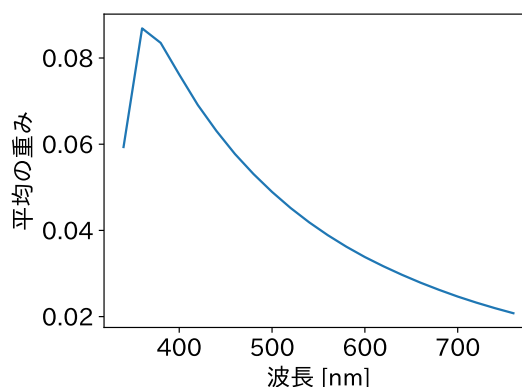


図 70 平均の重みの波長依存性。

衝突データを用いた QE 変動測定結果と QE 測定ベンチでの測定結果の比較結果を図 71 に示す。右下の 1 点は読み出し回路の不調により衝突データを用いた測定では正しく QE を算出できていないため、他の点から大きく外れている。この点を除けば双方の測定においてよい線形性が見えている。QE 低下が大きい PMT ほど 2 つの測定での差が大きくなっている。この原因の 1 つとして、相対 QE の基準が異なることが考えられる。衝突データを用いた QE 測定では相対 QE の基準を 2021 年頭の QE を基準にしているが、名古屋での QE 測定は実装前の QE を基準にしている。QE 低下が大きい PMT ほど 2021 年頭の時点で既に QE が低下している可能性があるため、衝突データを用いた測定では名古屋での測定よりも相対 QE が大きく評価される。この仮定が正しい場合、2021 年の頭まではモジュール 4 の PMT にも HV を印加していたため、モジュール 4 でみられた QE 低下についても説明することができる。

この検証により衝突データを用いた QE 測定の結果が確かめられたため、今後交換する PMT や交換時期の決定に衝突データを用いた結果を使用できる。

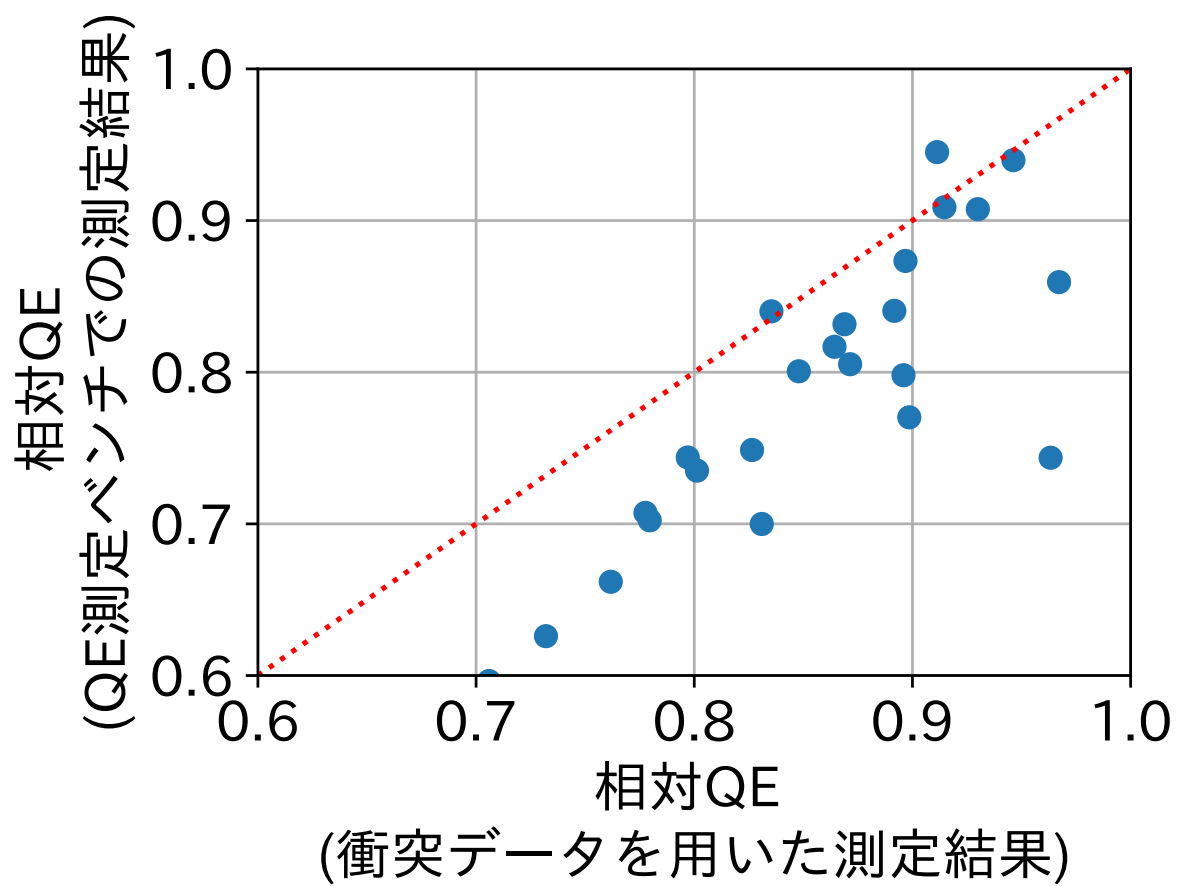


図 71 衝突データを用いた QE 変動評価との比較。

7 結論

MCP-PMT は TOP カウンターの要求を満たす高い時間分解能を持つが、積算出力電荷の増加に伴い QE が低下してしまう特徴がある。ルミノシティの増加に伴いバックグラウンドも増加し QE 低下が早まるため、TOP カウンターの安定運用において MCP-PMT の QE 変動特性を理解することは重要である。

寿命の最も短い初期量産型の PMT は早期の QE 低下を予想し 2022 年夏から始まる長期保守期間中の交換を計画していた。MCP-PMT の交換作業は実装以降初の試みであるため交換手法の確立が必要である。まず、交換作業を効率的に行うために専用の治具とレンチの開発を行った。そして、実機での交換作業の試験を行い治具は上手く機能することを確認した。また、取り外した PMT の QE を測定し実装前と比較するために、効率良く 1% の精度で QE を測定できるように測定ベンチの改良が必要である。取り外した PMT モジュールを分解せずに測定することを可能にし、1% の精度で測定できるように改良した。これらによって、実機 MCP-PMT の交換と運用前後での QE の比較を可能にした。

また大量の MCP-PMT 実機運用での特性理解のために、衝突データを用いて積算出力電荷と QE の変動を測定した。平均積算出力電荷は 0.3 C/cm^2 と得られ、初期量産型の平均寿命 1.1 C/cm^2 に比べ十分小さい。しかし、一部の PMT で予測よりも大きい QE 低下がみられた。この結果を評価するために、差異が生じた原因の理解と QE 変動測定の検証が必要であった。まず、差異が生じた原因の理解に向けて温度の影響を調査するために、加熱試験と高温環境運用による試験を行った。寿命測定試験は室温 ($20 \sim 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) であり実機は最高 $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ になる可能性がある。寿命改善 ALD 型を用いた試験では、加熱試験で QE 低下を $1.2 \pm 0.8\%$ 、高温環境運用による試験では QE 低下率の差を $-5.6 \pm 2.0\% / (\text{C/cm}^2)$ と得た。初期量産型を用いた試験では、加熱試験で温度変化に伴う QE 変動がみられ、高温環境運用による試験では高温ほど QE 低下率が大きくなる傾向がみられた。次に、衝突データを用いた QE 変動測定の検証のために、全 512 本のうち初期量産型 32 本を実機から取り外し QE 測定を行った。衝突データを用いた評価から QE 低下が疑われる 24 本中 23 本で線形性がみられた。この検証により衝突データを用いた QE 測定の結果が確かめられたため、今後交換する PMT や交換時期の決定に衝突データを用いた結果を使用する。

本研究により、交換が必要な PMT の選出と交換を可能にした。交換後は Belle II 実験終了まで運用可能になると期待される。また実機初の大量運用により、TOP カウンターの長期安定運用に重要な MCP-PMT の QE 変動特性が実機環境では試験環境と異なる振る舞いをするという知見を得た。取り外した PMT を詳細に調べることでこの差異が理解され、MCP-PMT の性能向上につながるだろう。

謝辞

本研究を行う上でたくさんの方にお世話になりました。特に、飯嶋徹教授と居波賢二准教授には熱心なご指導を頂きました。飯嶋徹教授には、研究の進め方や考え方を教えていただきました。居波賢二准教授には、測定系のセットアップや開発した道具のデザインについて多くのご助言をいただきました。また、松岡広大特任准教授を始めとする Belle II グループのスタッフの方々にも、研究を進める上で多くのご助言をいただきました。そして、大久保亮吾さんを始めとする Belle II グループの先輩方には、解析手法等について多くのご助言をいただきました。また、同期を始めとする N 研究生の皆様には、日々の研究生活において相談に乗っていただきました。この場を借りて心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1] R.L Workman et al. (Particle Data Group). *The Review of Particle Physics(2022)*. <https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/rpp2022-rev-ckm-matrix.pdf>.
- [2] CKMfitter Group (J. Charles et al.). Eur. Phys. J. C41, 1-131 (2005) [HEP-PH/0406184], Updated results and plots available at: <http://ckmfitter.in2p3.fr/>.
- [3] Z. Ligeti S. Monteil M.Papucci J. Charles, S. Descotes-Genon and K. Trabelsi. Future sensitivity to b_d , b_s , and k mixings. *Physical Review D*, 2014. DOI: 10.1103/PhysRevD.89.033016.
- [4] https://www.belle2.org/project/super_kekb_and_belle_ii/.
- [5] Z. Doležal and S. Uno. Belle ii technical design report.
- [6] 室山玄太. 高時間分解能光検出機 mcp-pmt の内部残留ガスによる光電面劣化のメカニズムの研究, 2018.